

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104876

基于 DGS 的小型化 UWB-MIMO 天线的设计*

南敬昌 韩欣欣 高明明 王明寰 王艺扉 王纪禹
(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105)

摘 要:根据目前无线通信系统发展趋势,设计了一款具有高隔离度的小型化双单元超宽带(UWB)多输入多输出(MIMO)天线,整体尺寸仅为 18 mm×22 mm×1 mm。该天线贴片采用刻蚀六角星的矩形结构,并在其右侧上下位置分别挖去“w”形及小矩形,实现了天线的宽带化;采用缺陷地(DGS)结构,在接地板顶端刻蚀两个半径相等的半圆形槽,实现了天线的高隔离度。仿真与实测结果基本吻合,天线最终的工作带宽为 2.75~10.64 GHz(相对带宽达到 117.85%),且在带宽范围内隔离度均大于 22 dB,包络相关系数(ECC)小于 0.015。由此,所设计的天线不仅尺寸极小、结构简单,且性能方面良好,可广泛应用于无线通信系统中。

关键词:小型化;超宽带;缺陷地;高隔离度;多输入多输出(MIMO)天线

中图分类号: TN822+.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Design of miniaturized UWB-MIMO antenna based on DGS

Nan Jingchang Han Xinxin Gao Mingming Wang Minghuan Wang Yifei Wang Jiyu
(School of Electronics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: According to the current development trend of wireless communication systems, a miniaturized dual-unit ultra-wideband (UWB) multiple-input multiple-output (MIMO) antenna with high isolation is designed, and its overall size is only 18 mm×22 mm×1 mm. The antenna's radiation patch adopts a rectangular structure etched with a hexagonal star, and a “w” shape and a small rectangle are cut out on the upper and lower positions on the right side of the antenna to realize the broadbandization of the antenna. The high isolation of the antenna is achieved by using defective ground (DGS) structure and etching two semicircular slots of equal radius at the top of the ground plate. The simulation results are basically consistent with the actual measurement results. The final operating bandwidth of the antenna is 2.75~10.64 GHz (relative bandwidth reaches 117.85%), and the isolation within the bandwidth range is greater than 22 dB, and the envelope correlation coefficient (ECC) is less than 0.015. Therefore, the designed antenna is not only extremely small in size, simple in structure, but also good in performance, and can be widely used in wireless communication systems.

Keywords: miniaturization; ultra-wideband; defective ground structure; high isolation; multiple-input multiple-output (MIMO) antenna

0 引 言

当今无线通信随着社会科学的进步而发展迅猛,天线的小型化与宽带化研究早已走入学者们的视野,超宽带(ultra wide band, UWB)实现技术也层出不穷。同时对于即将到来的 6 G 时代,多输入多输出(multiple-input

multiple-output, MIMO)天线的需求进一步扩大,这种天线通过创造多个并行空间信道独立地传输信息,实现了高的通信容量和频谱利用率,对无线通信系统的发展产生深远的影响。

多年来,通过对天线表面进行刻蚀、开槽、渐变结构、多层耦合馈电等技术^[1-5],无数研究者在实现天线的小型化、宽带化上做出了不懈努力。文献[6]在辐射贴片

收稿日期: 2021-11-05 Received Date: 2021-11-05

* 基金项目:国家自然科学基金(61971210)、辽宁省特聘教授项目(551710007004)、国家自然科学基金青年科学基金(61701211)、辽宁工程技术大学横向课题:基于压缩感知的图像传输与重构技术研究(21-2067)项目资助

上刻蚀两条直角形窄缝隙,并对接地板进行挖槽改进。文献[7]选择在叉形辐射贴片上设置 U 形槽、倒 U 形槽及互补谐振环结构,整体尺寸为 $21.5\text{ mm} \times 57\text{ mm} \times 1.64\text{ mm}$ 。在 MIMO 天线的设计中,为了降低耦合、提高隔离度提出了隔断、抵消、滤波的去耦思路^[8-9],加载寄生单元、中和线、设置缺陷地结构、采用解耦网络等是常见的去耦技术^[10-13]。文献[14]采用 CPW 馈电方式设,在改进贴片的同时,对接地板采用 DGS 结构实现天线单元间的去耦。文献[15]中尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 1.524\text{ mm}$ 的天线利用锥形传输线将不同的结构组合,并采用正交排列的简化对称布局和加载倒“C”形结构等来实现带宽及隔离度。诸如此类的成果很多,虽然在一定程度上实现小型化超宽带高隔离特性,但是天线尺寸及设计程度仍有改进空间。

本文设计了一种具有高隔离度的小型化 UWB-MIMO 天线,天线整体尺寸极小,仅为 $18\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。该天线通过在矩形辐射贴片上设置六角星结构,并在矩形右侧上下分别挖去“w”形及小矩形结构,拓展了天线的带宽。同时采用缺陷地结构(defective ground structure, DGS)对接地板进行改进,使得该 MIMO 天线隔离度整体提高。最终天线的工作带宽为 $2.75 \sim 10.64\text{ GHz}$,隔离度均大于 22 dB ,远远超出 MIMO 天线隔离度 S_{21} 大于 15 dB 要求。与其他大多数已发表 MIMO 天线相比,文中设计的天线结构简单,在不添加任何去耦结构的情况下就可以实现较高隔离度。

1 MIMO 天线设计

1.1 天线单元设计

文中设计的小型化 UWB 天线单元尺寸为 $18\text{ mm} \times 11\text{ mm}$,选用介电常数是 4.4 的 FR4 材料做为印制电路板,设置其厚度为 1 mm ,并选用 $50\text{ }\Omega$ 微带馈线来进行馈电。天线单元改进过程如图 1 所示。首先,选用最基本的矩形作为天线的辐射单元,由超宽带的实现原理可以知道,若要拓宽天线工作带宽,可通过增加天线表面电流路径来实现,所以本文的设计是将天线辐射贴片进行改进。在辐射贴片上将圆心位于贴片中心、半径 R_1 为 3.9 mm 的大圆与正六角星结构进行布尔运算,此时的天线单元仅为简单的超宽带单极子天线。

1.2 MIMO 天线设计

在得到上述六角星超宽带单极子天线后,将其对称放置形成二单元 MIMO 天线,然后在贴片右侧上方挖去“w”形、在下方挖去小矩形结构,这种改进方法实际上增加了贴片与接地板间电流的流经,使得天线在高频处的匹配性能得到改善,实现的工作带宽为 $2.75 \sim$

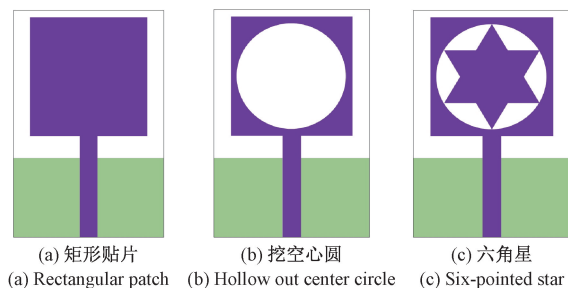


图 1 天线单元改进过程结构

Fig. 1 Antenna element improvement process

10.64 GHz 。但是,此时的天线仅在带宽上达到要求,天线两单元之间存在的耦合强度极大。为了实现较高隔离度,接下来对接地板采用 DGS 结构加以改进,最终所设计的 MIMO 天线结构图如图 2 所示。

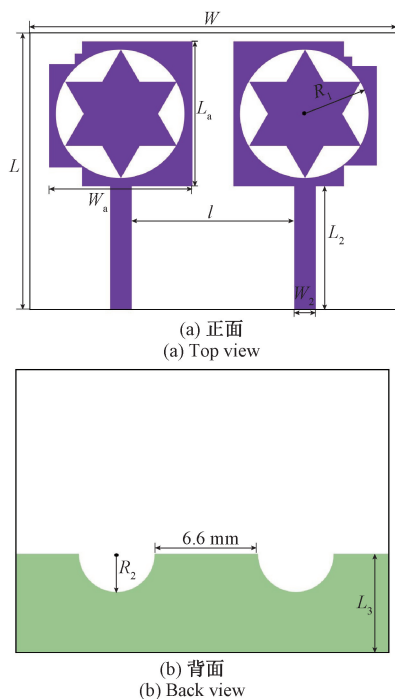


图 2 MIMO 天线结构

Fig. 2 Geometry of proposed antenna

1.3 DGS 结构设计

在天线接地板上刻蚀周期性或非周期性的 DGS 结构,可以令电路衬底材料的有效介电常数的分布情况发生改变,进而使天线具有带隙特性^[16-20]。从机理上讲,该结构可以等效为一个并联 LC 谐振电路, $50\text{ }\Omega$ 微带馈线看作是电路的等效电感,刻蚀的缝隙为等效电容,其等效电路图如图 3 所示。

在等效的谐振电路中,等效电容与等效电感可以由式(1)和(2)直接算出。

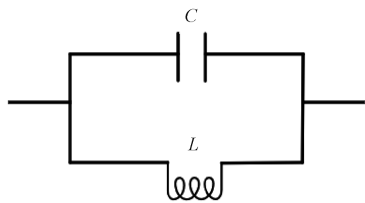


图3 DGS 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of DGS

$$C = \frac{\omega_c}{2Z_0(\omega_0^2 - \omega_c^2)} \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (2)$$

其中, ω_c 与 ω_0 分别表示截止角频率和谐振角频率; Z_0 表示传输线的特性阻抗; f_0 表示谐振频率。相较于其他方法, DGS 技术优势在于不需要加载任何结构, 就可以在某个频率点产生谐振, 使隔离度降低, 且改变 DGS 结构的参数也必将影响 MIMO 天线单元的性能。

因此为满足 MIMO 天线隔离度性能要求, 对地板板采用 DGS 结构, 在天线馈线正后方刻蚀半圆形槽结构。通过 HFSS15.0 仿真软件不断对其进行参数优化, 得到本文设置的半圆形槽 DGS 结构的半径 R_2 优选为 2.2 mm。天线的其他各项参数如表 1 所示。

表1 MIMO 天线设计参数

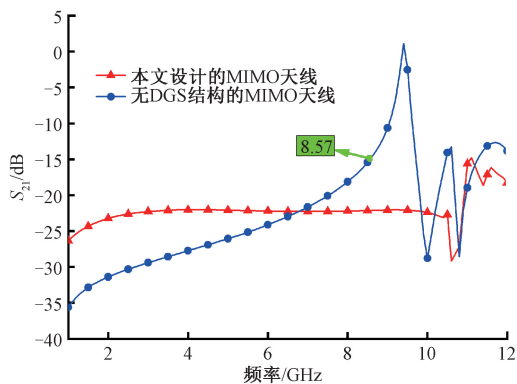
Table 1 MIMO antenna design parameters (mm)

参数	数值	参数	数值
L	18.0	W	22.0
L_2	8.0	W_2	1.2
L_a	9.6	W_a	9.0
R_1	3.9	R_2	2.2
L_3	5.5		

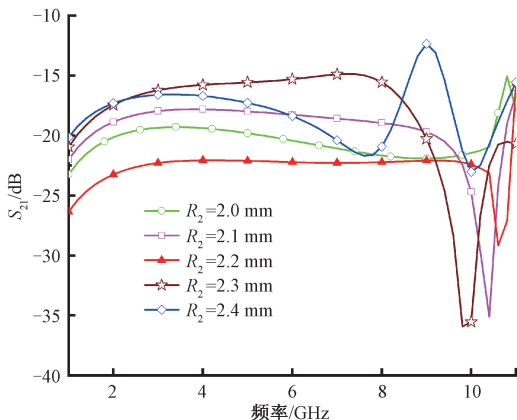
2 高隔离度实现原理分析

文中设计的 MIMO 天线采用 DGS 结构, 对天线接地板挖两个半径相等、位置对称的开口半圆形槽结构, 图 4 展示了天线有无 DGS 结构时 S_{21} 的变化结果。可以看出, 当接地板为简单的矩形时, 天线的整体隔离度性能较差, 在 8.57 GHz 以右隔离度超出 -15 dB; 当对天线接地板进行 DGS 结构设计后, 天线在 2.75~10.64 GHz 带宽内隔离性能良好, 整体提高至 22 dB。

DGS 的设计改变了接地板表面上的电流分布, 从而减小了两天线端口之间的耦合, 来获得带阻特性和慢波特。此结构的作用简单来讲, 就是在地板上开缝隙, 切断两天线之间的耦合电流, 从而延长了天线单元间的电流路径, 相当于天线单元间的距离增加。

图4 S_{21} 结果Fig. 4 S_{21} results

同时, 在设计过程中, R_2 取值的不同对天线隔离度也有较大影响。如图 5 所示, 当 $R_2 = 2.2$ mm 时, 天线的隔离度相较于其他取值整体提高了 2~7 dB, 这也说明 DGS 结构的设计会影响隔离度, 且结构中部分参数的改变直接使得隔离度发生改变。按照文中设计的参数, 天线性能也可由电流分布图看出。图 6(a)、(b)、(c) 展示了激励端口分别在 3、6、9 GHz 下两天线单元表面上电流分布的情况。可以看出, 电流集中分布于右边天线及 DGS 结构上, 同样证明了该 DGS 结构的有效性。

图5 R_2 不同取值下的 S_{21} 结果Fig. 5 S_{21} results under different values of R_2

3 仿真与实测结果分析

3.1 S 参数分析

通过 HFSS15.0 仿真软件对本文天线进行了仿真设计, 结果如图 7 所示。不同贴片结构的设计也会对天线的性能产生影响。当贴片仅为矩形时, 天线工作带宽低频处仅为 5.66 GHz; 当天线上方刻蚀“w”形结构时, 天线带宽拓展为 3.61~10.64 GHz; 而本文设计的上下方同时

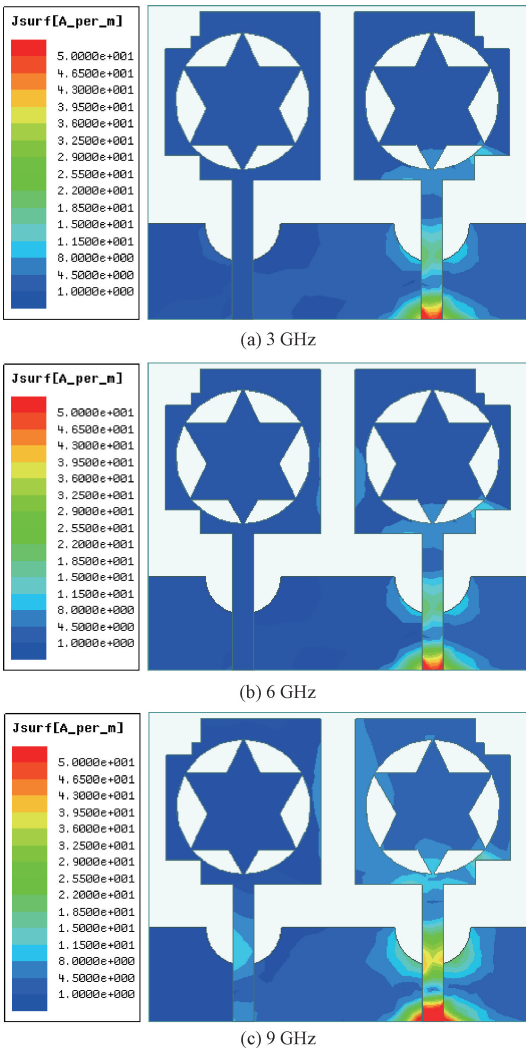


图 6 MIMO 天线表面电流分布
Fig. 6 Surface current distribution

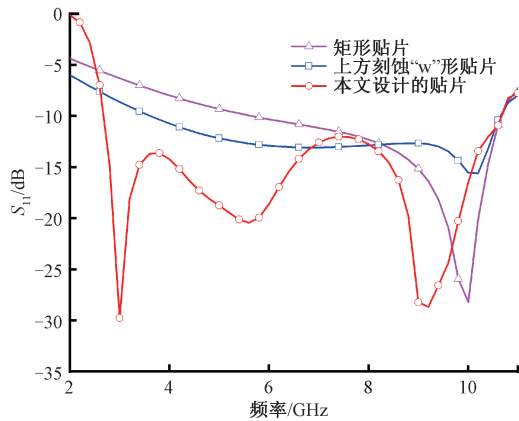


图 7 不同贴片结构时 S_{11} 仿真结果

Fig. 7 S_{11} simulation results for different patch structures

刻蚀槽结构的贴片在低频处拓宽至 2.45 GHz, 得到相对

带宽为 117.85% 的超宽带天线。

实物天线如图 8 所示, 对该天线进行实测所得 S 参数结果如图 9 所示。谐振频率约为 7.15 GHz, 且在 7.15 GHz 处, S_{11} 值约为 -30.90 dB, 隔离度也完全符合要求。所得 S_{11} 、 S_{21} 曲线图未完全重合, 原因可能是在测试过程中杂波的干扰, 或者天线制板加工过程中有其他阻焊材料等掺入, 引起一些固定参数值改变等, 但整体上仿真与实测结果大致相同, 不影响该天线的实际应用。

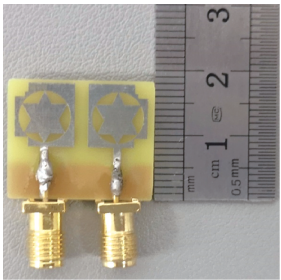


图 8 MIMO 天线实物

Fig. 8 Photograph of fabricated antenna

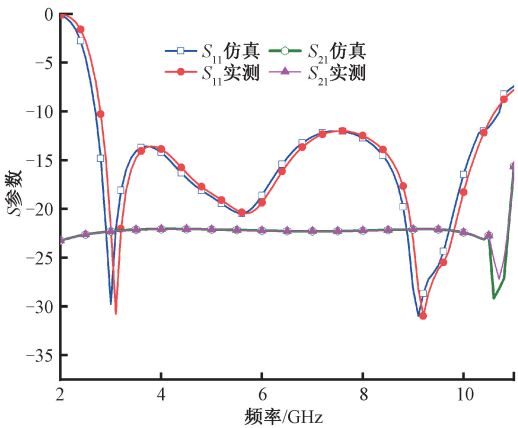


图 9 S 参数仿真与实测结果

Fig. 9 Simulated and measured S -parameters of antenna

3.2 包络相关系数(ECC)分析

文中设计的 MIMO 天线包络相关系数测试图如图 10 所示, 由图 10 中可以看出, 包络相关系数整体小于 0.015, 表明两天线单元间的相关性能良好, 也就是说两个天线单元接收信号的独立性很高, 符合超宽带 MIMO 天线 ECC 的要求。

3.3 辐射特性分析

天线方向图是衡量天线性能的关键图, 图 11(a)、(b)、(c) 分别展示了天线在 3、6、9 GHz 处的 E 面、H 面仿真与实测方向图。

由图 11 可知, 在实际测试中, 由于测试条件以及天线单元间的互相影响, E 面主极化方向不再是 0° 和 180° ,

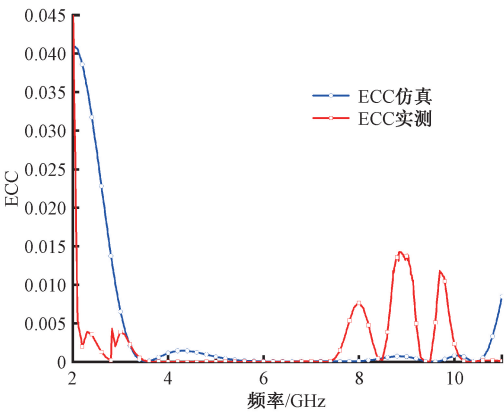


图 10 ECC 结果
Fig. 10 ECC result

H 面辐射图也略发生畸变。绝大部分原因是由于天线使用的介质基板为 FR4 板材,这种材料相较于其他材料来说,虽然有一定的优点,但是它的介电常数会随频率发生变化。当频率升高时,介电常数会有所降低,使天线表面的电磁损耗增大,从而降低天线的辐射效率与增益,因此会出现在高频处的辐射能力较不理想的情况。但是,从整体上看,随着频率的增加,E、H 面呈现出近似对称,表明天线仍然具有稳定的辐射特性。

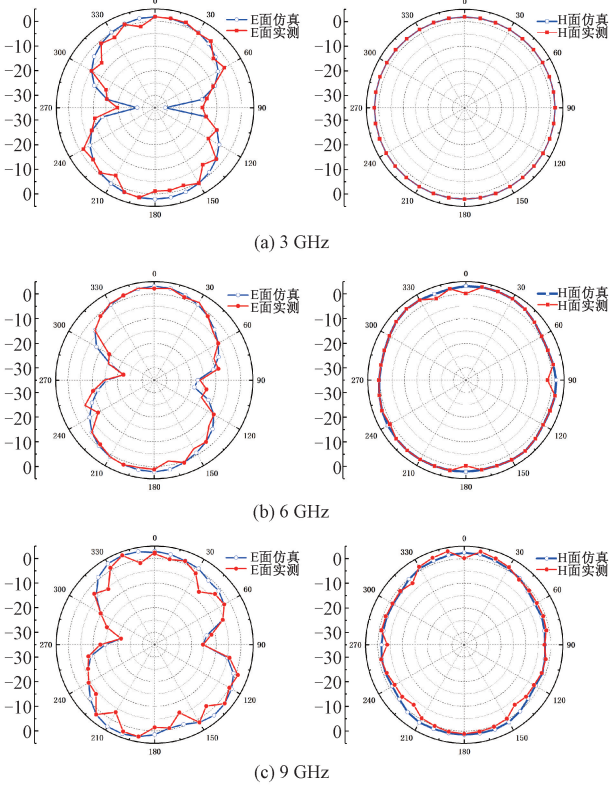


图 11 E、H 面仿真与实测结果

Fig. 11 The radiation patterns of E-plane and H-plane

3.4 天线性能比较

将部分文献设计的二端口 UWB-MIMO 天线和采用 DGS 结构设计的多端口 UWB-MIMO 天线与文中设计做出对比,结果如表 2 所示。可以看出,在二端口 MIMO 天线中,无论是否采用了 DGS 技术提高隔离度,文中设计的天线在尺寸、相对带宽、隔离度和 ECC 性能指标上都明显优于大部分同类天线;在多端口 MIMO 天线中,根据各类天线指标参数,仍然可以证明应用的 DGS 技术可以降低天线单元间的耦合,实现较高隔离性能。由此对比,既验证了采用 DGS 的有效性,又证实了本文设计的天线在各方面都具有较大的优势。

表 2 MIMO 天线性能对比

Table 2 Antenna performance comparison							
文献	端口数	是否采用 DGS	尺寸/mm	工作带宽/ GHz	相对带宽/%	隔离度/ dB	ECC
[6]	2	否	26×28×0.8	2.9~10.8	115.33	>15	<0.5
[7]	2	否	21.5×57×1.64	3.64~12.2	108.33	≥15	≤0.027
[12]	2	是	18×34×1.6	3.1~11	112.06	>15	<0.01
[13]	2	是	20×20×0.8	2~12	142.80	>25	<0.05
[14]	2	是	41.5×26×1.6	3.1~11.5	115.07	>15	<0.005
[15]	4	是	40×40×1.524	3.1~10.6	109.49	>16	<0.13
[16]	4	是	45×45×1.6	2~10.6	136.51	>17	<0.005
[17]	4	是	44×44×1.6	2.95~10.8	114.18	>15.5	<0.1
[18]	8	是	——	2.84~11	117.91	>15	<0.015
文中	2	是	18×22×1	2.75~10.64	117.85	>22	<0.015

4 结 论

本文设计了一款具有高隔离度的小型化 UWB-MIMO 天线,天线尺寸很小,仅为 18 mm×22 mm×1 mm。通过对天线辐射贴片进行刻蚀六角星结构的改进,增大了电流流经路径,拓宽了工作带宽;通过刻蚀 DGS 结构,在接地板顶端刻蚀两个半径相等的半圆形槽,分析其原理并对结构参数进行优化,实现了天线的高隔离度。设计的小型化 UWB-MIMO 天线结构简单,实际加工方便快捷,各类性能指标良好,符合当天线发展趋势,可广泛应用于无线通信系统中。

参考文献

[1] 南敬昌,刘银玲,高明明,等. 小型化分形结构 UWB 天线的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(12): 18-25.
NAN J CH, LIU Y L, GAO M M, et al. Research on a miniaturized fractal UWB antenna [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 18-25.
[2] 何存富,闫天婷,宋国荣,等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J]. 仪器仪表学报,2017, 38(2):

- 361-367.
- HE C F, YAN T T, SONG G R, et al. Optimization design study of microstrip patch antenna strain sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2):361-367.
- [3] 严冬,程亚军,汪册,等. 基于结构合成法的微型化双频 WLAN 印刷天线设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6):1421-1432.
- YAN D, CHENG Y J, WANG P, et al. Design of miniaturized dual-band WLAN printed antenna based on structure synthesis method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6):1421-1432.
- [4] LI X P, XU G, MA M R, et al. UWB dual-band-notched lanky-leaf-shaped antenna with loaded half-square-like slots for communication system[J]. Electronics, 2021, 10(16):1991.
- [5] SANDHU M Y, AFRIDI S, ANJUM M R, et al. Ultra wide band (UWB) horseshoe antenna for future cognitive radio applications [J]. Wireless Personal Communications, 2022, 122(2):1087-1099.
- [6] ZHAO Y, ZHANG F S, CAO L X, et al. A compact dual band-notched MIMO diversity antenna for UWB wireless applications[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2019, 89:161-169.
- [7] SOHI A K, KAUR A. Hexa-band suppression characteristics from a fork-shaped UWB-MIMO antenna loaded with complementary split-ring resonator and slots[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2020, 34(16): 2194-2219.
- [8] JABIRE A H, ZHENG H X, ABDU A, et al. Characteristic mode analysis and design of wide band MIMO antenna consisting of metamaterial unit cell[J]. Electronics, 2019, 8(1): 68.
- [9] HUSSAIN N, JEONG M J, ABBAS A, et al. Metasurface-based single-layer wideband circularly polarized MIMO antenna for 5G millimeter-wave systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 130293-130304.
- [10] TIWARI R N, SINGH P, KANAUIA B K. A compact UWB MIMO antenna with neutralization line for WLAN/ISM/mobile applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer - Aided Engineering, 2019, 29(11): e21907.
- [11] MATHUR R, DWARI S. A compact UWB - MIMO with dual grounded CRR for isolation improvement [J]. International Journal of RF and Microwave Computer - Aided Engineering, 2019, 29(1): e21500.
- [12] KHAN M K, FENG Q Y, ZHENG Z L. Experimental investigation and design of UWB MIMO antenna with enhanced isolation [J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2021, 107: 287-297.
- [13] SHARMA M K, KUMAR M, SAINI J P. Design and analysis of a compact UWB-MIMO antenna with improved isolation for UWB/WLAN applications [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 119(4): 2913-2928.
- [14] BANERJEE J, KARMAKAR A, GHATAK R, et al. Compact CPW-fed UWB MIMO antenna with a novel modified Minkowski fractal defected ground structure (DGS) for high isolation and triple band-notch characteristic[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2017, 31(15): 1550-1565.
- [15] SINGH D, KHAN A A, NAQVI S A, et al. Inverted-c ground MIMO antenna for compact UWB applications[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2021, 35(15): 2078-2091.
- [16] TRIPATHI S, MOHAN A, YADAV S. A compact Koch fractal UWB MIMO antenna with WLAN band-rejection[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1565-1568.
- [17] LIU Y Y, TU Z H. Compact differential band-notched stepped-slot UWB-MIMO antenna with common-mode suppression [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 16: 593-596.
- [18] 王新延,高振斌,郑宏兴. 具有缺陷地结构的低耦合阵列天线设计[J]. 河北工业大学学报, 2021, 50(1): 37-43.
- WANG X Y, GAO ZH B, ZHENG H X. Design of low-coupled array antenna with defective ground structure[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2021, 50(1): 37-43.
- [19] BEHERA S B, BARAD D, BEHERA S. Back - lobe mitigation of a compact DGS microstrip patch antenna using an artificial magnetic conductor surface [J]. International Journal of RF and Microwave Computer - Aided Engineering, 2021, 31(8): e22727.
- [20] ATALLAH H A, EL NEGM YOUSEF M M A, ABDEL-RAHMAN A B. Efficiency improvement of dual-band wireless power transfer (DB-WPT) system with U-shape resonator and capacitively loaded e-shape defected ground structure (DGS) [J]. Wireless Personal Communications, 2021, 119(3): 2083-2091.

作者简介



南敬昌, 分别在 1993 年、2003 年于辽宁工程技术大学获得学士学位及硕士学位, 2007 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为射频电路与器件、多媒体信息编码、通信系统仿真等。

E-mail: nanjc886@sina.com

Nan Jingchang received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Liaoning Technical University in 1993 and 2003, Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2007, respectively. Now he is a professor in Liaoning Technical University. His main research interests include RF circuits and devices, multimedia information coding and communication system simulation.



韩欣欣, 2020 年于辽宁科技学院获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为超宽带天线、多输入多输出天线等。

E-mail: 820611563@qq.com

Han Xinxin received a B. Sc. degree from Liaoning Institute of Science and Technology in 2020, and is now a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include ultra-wideband antennas and multiple-input multiple-output antennas.



高明明, 分别在 2003 年、2009 年和 2015 年于辽宁工程技术大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为智能射频技术、功放设计、建模和线性化技术。

E-mail: gaomingming2080@163.com

Gao Mingming received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Liaoning Technical University in 2003, 2009 and 2015, respectively. Now she is an associate professor in Liaoning Technical University. Her main research interests include intelligent RF technology, PA design modeling and linearization techniques.



王明寰, 2019 于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为小型化超宽带天线、多输入多输出天线。

E-mail: 944959060@qq.com

Wang Minghuan received a B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interests include miniaturized ultra-wideband antennas and multiple-input multiple-output antennas.



王艺扉, 2019 年于辽宁科技学院获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为可重构超宽带天线、多频天线等。

E-mail: 1052932573@qq.com

Wang Yifei received a B. Sc. degree from Liaoning Institute of Science and Technology in 2019, and is currently a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interests include reconfigurable ultra-wideband antennas and multi-frequency antennas.



王纪禹, 2020 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为超宽带天线、陷波多输入多输出天线等。

E-mail: 798360187@qq.com

Wang Jiyu received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2020, and is now a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interests include ultra-wideband antenna, trap multi-input multi-output antenna, etc.