

引用格式: 陈攀, 李高升. 基于铁氧体的宽带高增益微带天线设计[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 134–138, 219.
CHEN P, LI G S. Design of ferrite-based broadband high gain microstrip antenna[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 134–138, 219.

基于铁氧体的宽带高增益微带天线设计



扫码阅读全文

陈攀, 李高升*

湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082

摘 要: [目的] 为了有效提高天线的增益和带宽, 提出一种基于铁氧体材料的适用于 WLAN 的低成本、可调控层叠式微带天线。[方法] 通过加载磁性材料铁氧体作为微带天线基板, 以实现天线对外加电磁场的响应和天线性能的可调控; 采用层叠式基板结构调整方向特性, 以提高天线增益; 在金属贴片周围按顺时针方向排布椭圆寄生贴片, 以有效改善天线的带宽特性。[结果] 实测数据与仿真结果的吻合度较高, 均覆盖了 WLAN 系统 5.15~5.35 GHz 的频带范围; 根据测试结果, 天线在 C 波段的相对带宽为 19%, 最大增益为 9.15 dBi。[结论] 研究成果可为小型化天线和磁可调控天线的设计提供参考。

关键词: 微带天线; 可调控天线; 铁氧体; 寄生贴片

中图分类号: U665.26; TN823

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02582

Design of ferrite-based broadband high gain microstrip antenna

CHEN Pan, LI Gaosheng*

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: [Objectives] In order to effectively improve the gain and bandwidth of antennae, a low-cost and tunable stacked microstrip antenna based on ferrite is proposed for WLAN. [Methods] By adopting magnetic ferrite as the substrate of the microstrip antenna, its performance and response to external electromagnetic fields can be adjusted. Its directional characteristics can also be tuned via a laminated substrate structure to improve the gain. By arranging elliptical parasitic patches in a clockwise direction around the metal patch, the bandwidth characteristics of the antenna can be effectively improved. [Results] The measured data and simulation results are in good agreement, covering the entire frequency band range of 5.15–5.35 GHz in the WLAN system. According to the test results, the relative bandwidth of the antenna in the C-band is 19% and its highest gain is 9.15 dBi. [Conclusions] The results of this study can provide references for the design of miniaturized and magnetically tunable antennas.

Key words: microstrip antenna; adjustable tunable antenna; ferrite; parasitic patch

0 引 言

随着通信技术的快速发展, 设备对参数可调控、性能可变更的天线要求日益严苛, 例如天线频率的调控^[1-2]、天线极化的调控^[3]。目前, 天线的可调控与可重构是主流设计方向, 大部分电可调控天线均通过添加偏置电流予以实现, 除了对天线主体进行设计之外, 还需考虑交直流电路耦合并采用对天线性能影响较小的直流偏置电路, 这

也是可重构天线的设计难点。磁控天线取消了对天线性能影响较大的直流偏置电路, 转而采用对传统天线无影响的外磁场进行铁氧体铁磁参数调控, 从而成功解决了天线可重构的难题, 其中微带天线因体积小、重量轻、成本低等优点而备受青睐^[4], 但其也存在带宽窄、增益低、效率低等缺点。为此, 学界采用了多种天线设计技术来增加微带天线的带宽, 例如切 U 槽^[5-6]、割缝隙^[7]、使用磁电复合基板^[8]、加载寄生贴片^[9]、组阵^[10]、利用耦

收稿日期: 2021-11-05 修回日期: 2022-05-17 网络首发时间: 2022-08-16 14:52

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073130)

作者简介: 陈攀, 男, 1998 年生, 硕士生。研究方向: 天线理论与技术。E-mail: chenpan@hnu.edu.cn

李高升, 男, 1980 年生, 博士, 教授。研究方向: 天线理论与技术, 电磁兼容与防护技术。E-mail: gaosheng7070@163.com

*通信作者: 李高升

合实现天线的多模^[11-12]等。对于双层微带天线而言,对天线性能影响最大的是顶层介质基板,而底层介质基板参数变化的影响则相对较小;同时,当采用各向同性材料时,微带天线的波束宽度与增益成反比,即不能同时满足高增益和宽波束的要求,所以本文将使用各向异性材料铁氧体作为天线的顶层介质基板,并利用铁氧体材料在外加磁场环境下呈各向异性的特点^[13-14],对铁氧体磁导率进行调控以优化天线性能并缩小天线尺寸。

因此,本文拟设计一种加载铁氧体材料的可调控宽带微带天线,使用层叠式微带天线来提高增益和效率^[15-16],并采用添加寄生贴片的方法来拓展带宽。为了应对加工制作与外磁场添加限制等问题,该层叠式天线的底层介质基板将使用 RT/D 5880 材料,顶层介质基板使用铁氧体材料,基板之间使用临近耦合馈电,以保留外加磁场对天线性能的调控功能。通过在铁氧体基板上添加 4 个环绕型椭圆寄生贴片,从而实现一种适用于无线局域网(wireless local area network, WLAN)的可调控宽带天线。

1 天线设计

1.1 天线设计原理

天线设计有 2 个关键点:一是铁氧体材料的加载,二是层叠式结构的设计。以均匀平面波在磁化铁氧体中的传播为例,当外加磁场方向与平面波垂直时,磁化铁氧体的磁导率 μ 为张量,即

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & 0 \\ \mu_{21} & \mu_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中:

$$\begin{cases} \mu_{11} = \mu_{22} = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_c \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2} \right) \\ \mu_{12} = -\mu_{21} = j\mu_0 \frac{\omega \omega_m}{\omega_c^2 - \omega^2} \\ \mu_{33} = \mu_0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: $\mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{22}, \mu_{33}$ 均为张量 μ 的分量; μ_0 为真空磁导率; $\omega_c = \gamma\mu_0 H_0$,为拉莫角频率,其中 γ 为荷值比(即电子电荷量的绝对值与电子质量的比值), H_0 为天线外加磁场的磁场强度; $\omega_m = \gamma\mu_0 M_s$,为与饱和磁化强度呈正比的共振角频率,其中 M_s 为铁氧体的饱和磁化强度; j 为虚数; ω 为角频率。

当外加磁场方向反置时,磁导率张量中 μ_{12} 和 μ_{21} 互换;当无外加磁场时, $\omega_m = 0$,则 $\mu_{12} = \mu_{21} = 0$, $\mu_{11} = \mu_{22} = \mu_{33}$,此时铁氧体的磁导率为标量,呈各向同性。因此,利用铁氧体在不同磁场环境下的

材料磁导率不同的特点,可将铁氧体作为微带天线的介质基板,通过添加不同强度的外加磁场,即可改变铁氧体基板的磁化强度,从而实现外加磁场对天线的调控。由于部分铁氧体材料表面光滑,不易实现高精度镀铜和挖孔,为了降低天线的制作难度,可将天线整体设计为层叠式结构,将铁氧体基板作为层叠式基板的顶层基板,以保证天线的可调控特性。对于具有饱和磁导率的铁氧体,可以采用与铁氧体介电常数相同的物质代替,从而近似求解堆叠式天线的尺寸^[17-18]。

1.2 天线结构

天线由圆形贴片、椭圆寄生贴片和 2 块基板构成,如图 1 所示。顶层基板采用了铁氧体材料,介电常数为 15.1,饱和磁导率为 1 200 Oe。天线外加磁场 H_0 垂直向上,其磁化强度范围为 0~1 250 Oe。圆形贴片的圆心为顶层基板的中心,4 个椭圆寄生贴片的长轴与基板边长 L 的夹角分别为 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$,且各个寄生贴片与基

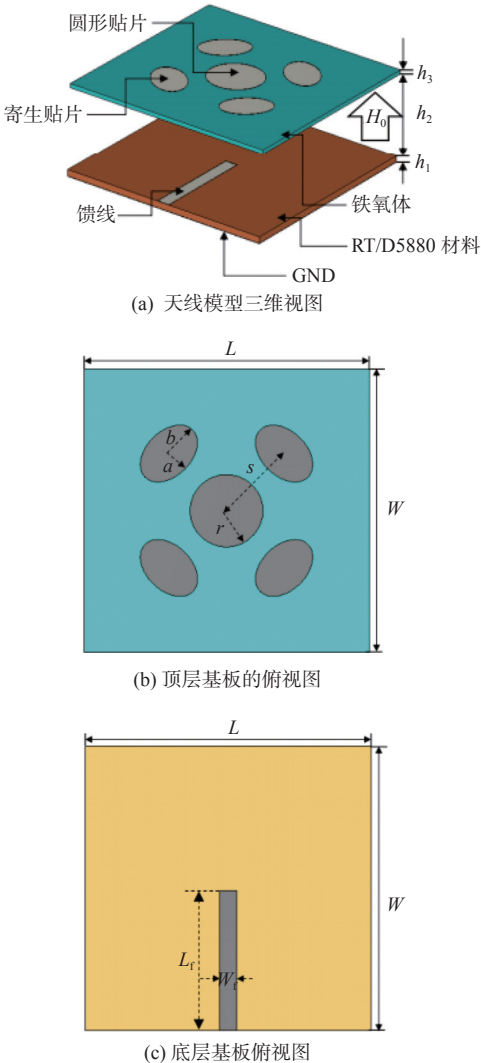


图 1 天线模型

Fig. 1 Antenna model

板中心的距离相等,以有效拓展天线的带宽。整个天线由位于底层基板表面的馈线进行耦合馈电,底层基板 RT/D 5880 材料的介电常数为 2.2,损耗角正切为 0.000 9。图 1 中: h_1, h_2, h_3 分别为底层基板的厚度、2 块基板之间空气层的厚度、铁氧体基板的厚度; W 为底层基板和铁氧体基板的宽度; a 和 b 分别为椭圆寄生贴片的长轴长度与短轴长度; r 为圆形贴片的半径; s 为寄生贴片与圆形贴片的距离; L_f 和 W_f 分别为馈电线的长度和宽度。

2 天线参数

影响天线谐振频点的因素主要包括:圆形贴片的尺寸、寄生贴片与圆形贴片的距离 s 以及外加磁场的磁化强度 H_0 。通过合理控制距离 s ,即可有效引导天线表面电流的流向和流速,从而拓展天线的工作带宽。图 2 所示为天线回波损耗 S_{11} 随距离 s 的变化情况,随着距离 s 的增加,天线谐振频点将逐渐向高频移动,但天线带宽则呈先增后减的趋势。

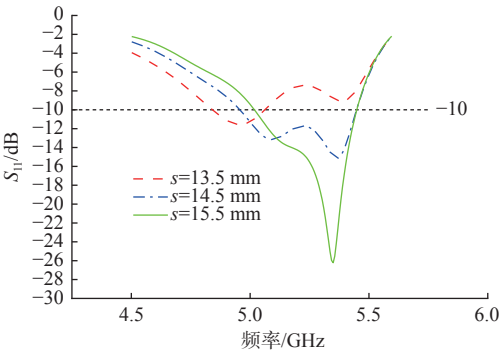


图 2 距离 s 对天线 S_{11} 的影响
Fig. 2 The influence of the distance s on the S_{11} of antenna

由图 2 可知,天线的回波损耗响应曲线存在 2 个谐振频点,通过参数扫描显示,高频谐振频点由圆形贴片产生,而低频谐振频点则由寄生贴片产生。图 3 所示为 S_{11} 随外加磁场磁化强度 H_0 的变化情况,当天线周围不存在外加磁场时,谐振频率为 5.15 GHz;当周围存在外加磁场时,天线的谐振频点随着 H_0 的增加而逐渐向高频移动,但绝对带宽基本保持不变。

图 4 所示为天线在不同外加磁场环境下的方向图,随着 H_0 的变化,天线方向性未发生明显变化,仅最高增益出现了微小改变,这说明外加磁场不会破坏天线的方向性。图 4 中,E 面和 H 面分别为天线的最大辐射方向与电场方向、磁场方向所组成的平面。

图 5 所示为天线贴片在谐振频点 5.15 GHz 时的表面电流分布图,可知在不同相位下,寄生贴片上流过了不同电荷的电流,这说明寄生贴片可

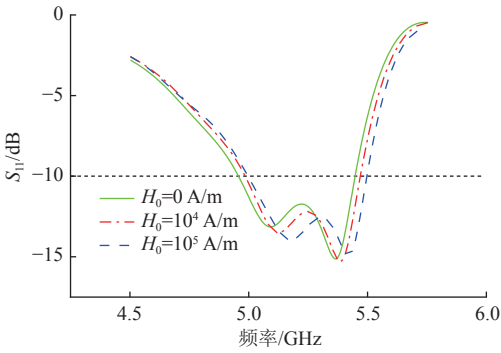


图 3 不同外加磁场环境下的 S_{11}
Fig. 3 S_{11} under different applied magnetic fields

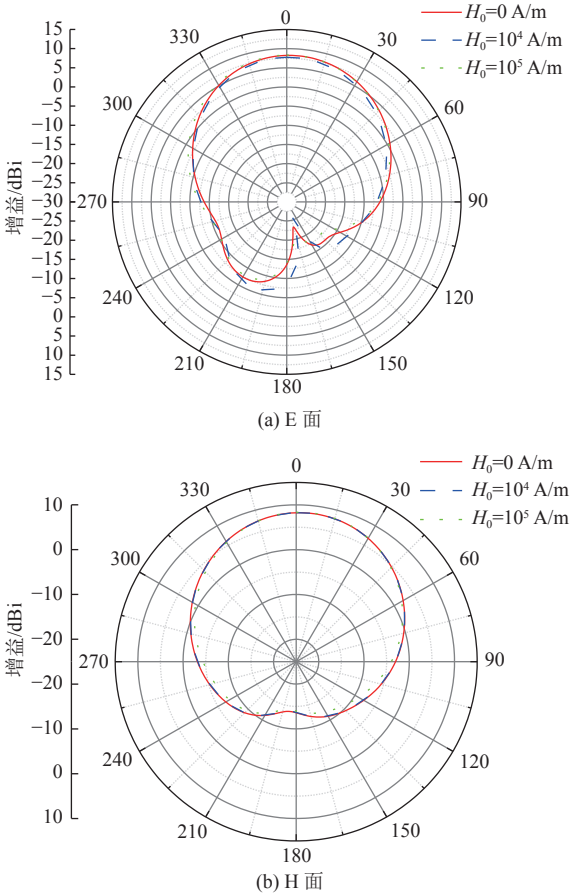


图 4 不同外加磁场环境下的天线方向图
Fig. 4 Patterns of antenna under different applied magnetic fields

有效引导天线表面的电流路径,拓宽天线的带宽。
利用电磁仿真软件进行计算和优化,最终得到如表 1 所示的天线模型尺寸参数。

3 测试结果分析

根据层叠式天线的设计尺寸参数,本文开展了实物加工制作,并使用 Keysight 公司的 E5063A 矢量网络分析仪进行测试,测试频段为 4~8 GHz。通过调节永磁铁与天线之间的距离,即可控制天线外加磁场的磁化强度,测试仪器为 CH-1600 高斯计。图 6 所示为天线实物与测试环境。

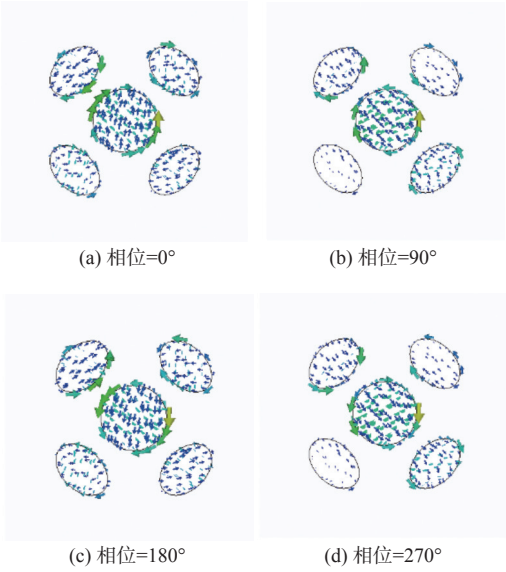


图 5 天线表面的电流分布
Fig. 5 Current distribution on antenna surface

表 1 天线模型参数

Table 1 Dimensions of antenna model			
参数	数值/mm	参数	数值/mm
h_1	1.575	r	6.5
h_2	0.7	a	6
h_3	1	b	4
L	50.8	L_f	25
W	50.8	W_f	1
s	14.5		

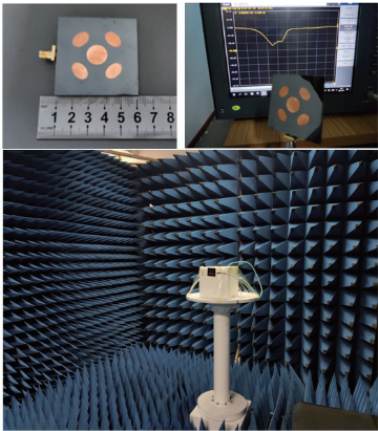


图 6 天线实物与测试环境
Fig. 6 Antenna object and test environment

图 7 所示为天线实物在不同外加磁场环境下的 S_{11} 变化曲线, 当周围不存在外加磁场时, 天线的谐振频点为 5.15 GHz, 且谐振频点将随着外加磁场磁化强度的增加而逐渐向高频移动。由此可见, 天线实物测试与仿真模拟所表现的特性一致。在无磁场环境下, S_{11} 小于 -10 dB 的阻抗带宽为 4.75 ~ 5.73 GHz, 绝对带宽为 980 MHz, 在 C 波

段的相对带宽为 19%, 即实测带宽略大于仿真带宽, 究其原因, 可能是天线组装时 h_2 的精度不足, 从而使天线 2 层基板之间的空气层变高, 整体的等效介电常数减小, 最终导致品质因数 Q 减小, 带宽增大。基板中间空气层的高度约为 0.7 mm, 难以避免组装偏差所导致的上层基板微小倾斜, 从而使 2 层基板整体呈现为阶梯形, 这也最终导致了实测带宽略大于仿真带宽。

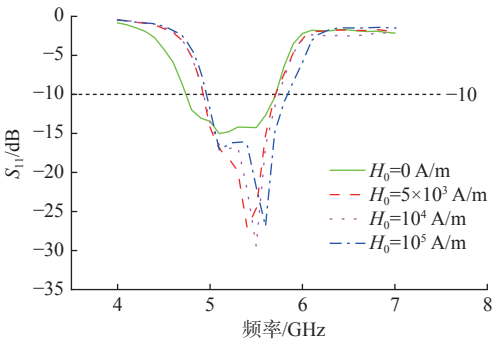


图 7 位于不同外加磁场环境下的 S_{11} 实测数据
Fig. 7 Measured data of S_{11} in different external magnetic fields

图 8 所示为天线在 E 面与 H 面内的实测方向图。天线实测方向图具有良好的对称性, 同一频率上随着外加磁场磁化强度的变化, 天线方向性没有明显的变化。3 个频点处的最大增益都均大于 9 dBi, 且天线在频点 5.15 GHz 的增益达到了 9.15 dBi。因此, 仿真结果与实测结果验证了该天线可以满足宽带、高增益、可调控等设计要求, 即证实了本文设计方法的可行性。

表 2 所示为本文与 7 篇近年来国内外文献在宽带天线方面的研究成果对比。设定天线波长为 λ_0 (其值为光速与天线中心频率之比), 为了对比工作在不同频段的天线尺寸参数, 表 2 的天线尺寸 (长 × 宽 × 高) 将以 λ_0 为基准进行表述。本文设计的天线在带宽、增益、尺寸等方面具有明显优势。

4 结 语

本文设计了一种基于铁氧体材料的可调控层叠式微带天线, 与现有文献中的宽带微带天线相比, 具有更高的增益、更小的体积和更优越的性能。不仅利用铁氧体介电常数高的特性减小了天线尺寸 (实际尺寸为 0.050 8 m × 0.050 8 m × 0.003 275 m), 还利用铁氧体磁导率在磁场环境下各向异性的特点实现了天线的可调控, 可为磁可调控天线的设计和应用提供参考。需注意的是, 由于磁控天线受制于外置磁铁, 因此需预留一定空间来放置磁铁, 这也是磁控天线的局限性所在。

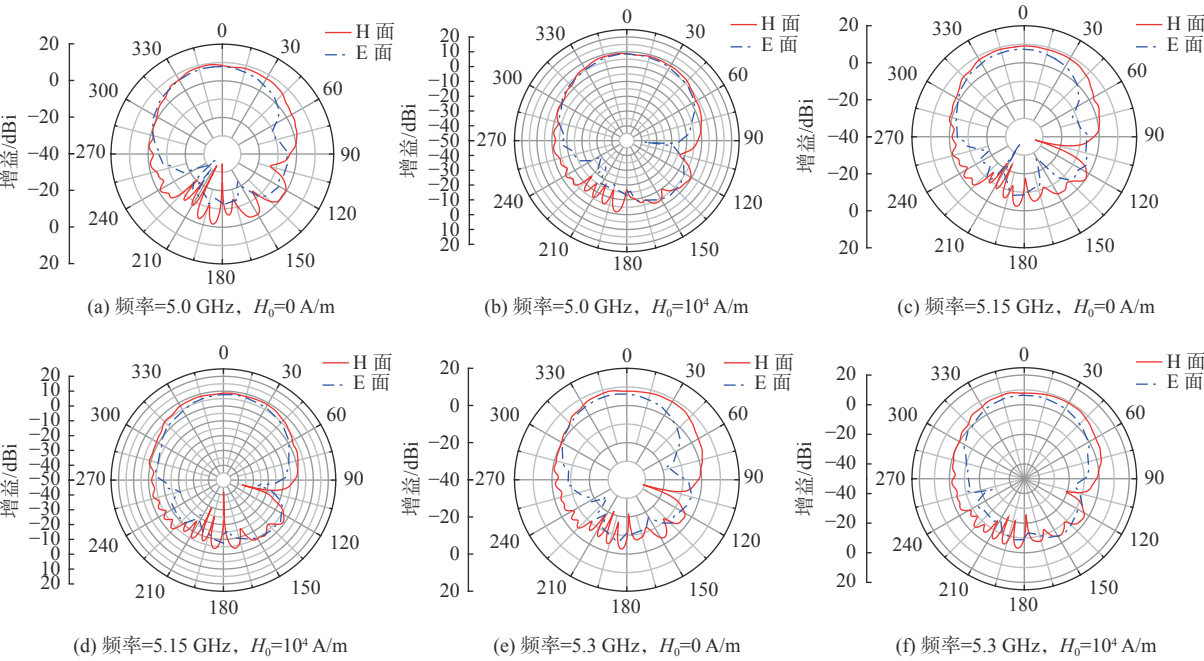


图 8 实测的天线方向图

Fig. 8 Measured patterns of antenna

表 2 天线性能对比结果

Table 2 Comparison results of antenna performance

分析对象	天线尺寸/m	阻抗带宽/MHz	最大增益/dBi
文献[5]	$1.23\lambda_0\times1.36\lambda_0\times0.058\lambda_0$	640	7.92
文献[9]	$0.74\lambda_0\times0.74\lambda_0\times0.1\lambda_0$	1 944	9
文献[10]	$1.18\lambda_0\times1.18\lambda_0\times0.028\lambda_0$	970	10
文献[11]	$1.29\lambda_0\times1.01\lambda_0\times0.044\lambda_0$	2 360	5.26
文献[12]	$0.84\lambda_0\times0.68\lambda_0\times0.06\lambda_0$	2 330	6.2
文献[14]	$0.43\lambda_0\times0.43\lambda_0\times0.21\lambda_0$	1 680	9.36
文献[17]	$0.68\lambda_0\times0.68\lambda_0\times0.025\lambda_0$	620	7.9
本文	$0.87\lambda_0\times0.87\lambda_0\times0.056\lambda_0$	980	9.15

参考文献:

[1] SATHI V, EHTESHAMI N, NOURINIA J. Optically tuned frequency-reconfigurable microstrip antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 1018–1020.

[2] TAN L R, WU R X, WANG C Y, et al. Ferrite-loaded SIW bowtie slot antenna with broadband frequency tunability[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 325–328.

[3] FARZAMI F, KHALEDIAN S, SMIDA B, et al. Reconfigurable linear/circular polarization rectangular waveguide filtenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(1): 9–15.

[4] MAITY S, GUPTA B. Cavity model analysis of 30°–60°–90° triangular microstrip antenna[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(6): 923–932.

[5] KHIDRE A, LEE K F, ELSHERBENI A Z, et al. Wide band dual-beam U-slot microstrip antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(3): 1415–1418.

[6] TONG K F, LUK K M, LEE K F, et al. A broad-band U-slot rectangular patch antenna on a microwave substrate[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(6): 954–960.

[7] DESHMUKH A A, RAY K P. Compact broadband slot-ted rectangular microstrip antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 1410–1413.

[8] 于永杰, 杨成韬. 层状磁电复合基板微带天线设计及应用[J]. *电子学报*, 2010, 38(9): 2021–2024.

YU Y J, YANG C T. Bilayered magnetoelectric composites substrate microstrip antenna design and application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 2021–2024 (in Chinese).

[9] WU J J, YIN Y Z, WANG Z D, et al. Broadband circularly polarized patch antenna with parasitic strips[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 14: 559–562.

[10] LIANG Z X, LIU J H, ZHANG Y Y, et al. A novel microstrip quasi Yagi array antenna with annular sector directors[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(10): 4524–4529.

[11] AN W X, LI S R, SUN W Y, et al. Low-profile wide-band microstrip antenna based on multiple modes with partial apertures[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1372–1376.

[2]

LIU C, YAO Y L. FEM-based process design for laser forming of doubly curved shapes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2005, 7(2): 109–121.

[3]

徐兆康. 船体复杂曲面板件成形方法及其适用性探讨[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2006, 5(3): 9–12.
XU Z K. Discuss on forming method for complex curved plate and its applicability[J]. Journal of Wuhan Shipbuilding Institute, 2006, 5(3): 9–12 (in Chinese).

[4]

UEDA Y. Development of computer-aided process planning system for plate bending by line heating (report 1): relation between the final form of plate and the inherent strain[J]. Transactions of JWRI, 1991, 20(2): 275–285.

[5]

UEDA Y, MURAKAWA H, RASHWAN A M, et al. Development of computer-aided process planning system for plate bending by line heating (report 2)-practice for plate bending in shipyard viewed from aspect of inherent strain[J]. Journal of Ship Production, 1994, 10(4): 239–247.

[6]

UEDA Y, MURAKAWA H, RASHWAN A M, et al. Development of computer-aided process planning system for plate bending by line heating (report 3)-relation between heating condition and deformation[J]. Journal of Ship Production, 1994, 10(4): 248–257.

[7]

胡昌成, 赵耀, 袁华. 一种双向曲率板成型应变分布的力学计算方法[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(17): 6–11.
HU C C, ZHAO Y, YUAN H. Calculating strain field to forming a double-curved shape based on mechanic theory[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(17): 6–11 (in Chinese).

[8]

YU G X, PATRIKALAKIS N M, MAEKAWA T. Optimal development of doubly curved surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 2000, 17(6): 545–577.

[9]

SHIN J G, RYU C H. Nonlinear kinematic analysis of the deformation of plates for ship hull fabrication[J]. Journal of Ship Research, 2000, 44(4): 270–277.

[10]

杨燕琴, 赵耀, 袁华. 船体曲面板成型中应变分布的影响参数的分析[J]. 中国造船, 2013, 54(2): 85–96.
YANG Y Q, ZHAO Y, YUAN H. Analysis of the parameters affecting strain distribution in forming curved panel of hull[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(2): 85–96 (in Chinese).

[11]

邱海渊. 船用薄板柔性渐进成形工艺研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
QIU H Y. Numerical simulation and experimental research on flexible incremental forming technology of marine sheet[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018 (in Chinese).

[12]

邱海渊, 于沪平, 乔云, 等. 船用薄板柔性渐进成形工艺数值模拟及实验研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 16–22.
QIU H Y, YU H P, QIAO Y, et al. Numerical simulation and experimental research on flexible incremental forming method of marine plate[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(3): 16–22 (in Chinese).



(上接第 138 页)

[12]

AN W X, LI Y, FU H P, et al. Low-profile and wide-band microstrip antenna with stable gain for 5G wireless applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(4): 621–624.

[13]

KUANR B K, VEERAKUMAR V, LINGAM K, et al. Microstrip-tunable band-pass filter using ferrite (nanoparticles) coupled lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4226–4229.

[14]

KIM T W, PARK B Y, LEE W, et al. Method for computing frequency response and radiation pattern of magnetized cylindrical ferrite resonator antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(9): 4415–4425.

[15]

李晓峰, 谢明聪, 姜兴, 等. 一种用于 5G MIMO 系统的宽带高增益圆极化天线[J]. 微波学报, 2020, 36(5): 51–55.
LI X F, XIE M C, JIANG X, et al. A broadband and high gain circularly polarized antenna for 5G MIMO system[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(5): 51–55 (in Chinese).

[16]

MASHHADIM, KOMJANI N, REJAEI B, et al. Ferrite - based wideband circularly polarized microstrip antenna design[J]. ETRI Journal, 2019, 41(3): 289–297.

[17]

MASHHADIM, REJAEI B, KOMJANI N, et al. Analysis of wideband circularly polarized ferrite-loaded antenna based on unidirectional resonant modes[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(9): 1–8.

[18]

NASIMUDDIN, ESSELLE K, VERMA A K. Fast and accurate model for circular microstrip antennas on suspended and composite substrates[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(9): 3097–3100.