

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.04.015

C 波段小型化宽带双圆极化微带阵列天线设计

徐永佳¹, 杨存顺², 孙雨婷¹, 郭庆功¹

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 中国电子科技集团公司第三十研究所, 成都 610041)

摘 要: 设计实现了一种工作在 C 波段的 2×2 的宽带小型化双圆极化微带阵列天线. 通过多层结构和支节匹配技术, 拓展带宽; T 型功分器顺序相差馈电形成馈电网络且左右旋馈电网络分层排布, 实现小型化. 实物测试结果表明, 该天线 $VSWR<2$ 的阻抗带宽达 39.5%, 左旋和右旋 3 dB 轴比带宽均达到 28.6% 以上, 在工作频带 3.4~4.2 GHz 内, 左旋和右旋增益均在 10 dB 以上, 天线阵列尺寸仅为 $1.27\lambda_0\times 1.27\lambda_0\times 0.1\lambda_0$. 实物测试结果与仿真结果吻合良好.

关键词: 双圆极化; 小型化; 宽带; 微带阵列

中图分类号: TN823+.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)04-0719-06

Design of a C-band miniaturized broadband double-circularly polarized microstrip array antenna

XU Yong-Jia¹, YANG Cun-Shun¹, SUN Yu-Ting¹, GUO Qing-Gong¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. The No. 30 Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper designs a 2×2 miniaturized broadband double-circularly polarized microstrip array antenna that works on C-band. The antenna extends the bandwidth through a multi-layer structure and the tuning stub matching technique. In order to achieve miniaturization, the T-type power divider are sequentially phase-differentiated to form a feed network which is arranged hierarchically. The test result indicates that the impedance bandwidth of the antenna is 39.5%, the axial ratio bandwidth both of left and right circularly polarized is less than 3 dB above 28.6%. In the 3.4~4.2 GHz, the gain is above 10 dB. The size of antenna array is only $1.27\lambda_0\times 1.27\lambda_0\times 0.1\lambda_0$. The measured results are in good agreement with the simulated results.

Keywords: Double circular polarization; Miniaturization; Broadband; Microstrip array

1 引 言

微带天线具有剖面低、体积小、重量轻、易组阵及易共形等优点而被广泛采用. 近年来, 随着无人机、全球定位系统、卫星通信等无线通信系统应用需求的增长, 宽带圆极化微带天线成为业界研究的热点之一. 针对移动目标通信, 进行收发隔离, 采用

双圆极化天线. 馈电网络是实现宽带圆极化天线设计的关键和难点. 早期大多采用缝隙耦合馈电^[1-3]和微带功分顺序相差馈电^[4-9]的多层天线结构设计, 实现圆极化并拓展带宽. 其中, 文献[1]设计了一个工作在 C 波段的单圆极化微带阵列天线. 采用十字开槽耦合馈电和三层结构设计, 将阻抗带宽拓展为 18.6%, 3 dB 轴比带宽为 16.2%. 2×2 的

收稿日期: 2019-10-25
基金项目: 国家自然科学基金(61877041)
作者简介: 徐永佳(1995-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为射频及微波技术应用. E-mail: xuyongjia197@163.com
通讯作者: 郭庆功. E-mail: guoqingong@scu.edu.cn

天线阵列尺寸为 $1.4\lambda_0 \times 1.4\lambda_0$, λ_0 为中心频点对应的自由波长. 文献[4]设计了一个带有调谐短截线的 2×2 的单圆极化微带天线阵列, 采用威尔金森功分器级联馈电, 阻抗带宽拓展为 25%, 轴比小于 2 dB 的带宽为 19%, 尺寸为 $1.4\lambda_0 \times 1.4\lambda_0$. 文献[5]设计了一个工作在 Ka 波段的单圆极化微带天线, 采用 T 型功分器级联馈电, 将阻抗带宽拓展为 24%, 3 dB 轴比带宽为 20.6%, 2×2 天线阵列尺寸为 $1.74\lambda_0 \times 1.74\lambda_0$. 但缝隙耦合馈电结构复杂, 馈电网络只能排布在同一层介质板, 而微带功分多采用直接与辐射单元相连的结构, 故面对天线小型化设计要求, 将宽带单圆极化天线拓展为双圆极化天线, 其微带馈电网络的设计将面临巨大挑战.

为解决上述问题, 大多采用左右旋两副馈电网络分层排布的结构^[10-15]. 文献[10]设计了一个 S 波段的微带双圆极化阵列天线, 采用左右旋馈电网络分层排布技术和三层结构, 实现 4×4 的阵列天线尺寸为 $3\lambda_0 \times 3\lambda_0$, 阻抗带宽为 9%. 文献[11]设计实现一个双频双圆极化的微带天线阵列, 采用馈电网络分层排布技术, 实现 $VSWR < 1.5$ 的左右旋两个带宽分别为 16.4% 和 16.7%, 左右旋 3 dB 轴比带宽为 13.3% 和 7.4%, 2×2 的天线阵列尺寸为 $1.7\lambda_0 \times 1.7\lambda_0$. 上述设计虽满足双圆极化设计要求, 但天线带宽普遍较窄且尺寸偏大, 无法满足许多实际工程需求. 为进一步拓展双圆极化天线带宽, 本文采用多层结构、支节匹配、T 型功分器顺序馈电和左右旋馈电网络分层排布等技术, 设计实现了一款 3 dB 轴比带宽达 28.6% 的小型化宽带双圆极化微带阵列天线.

2 设计理论分析

圆极化天线以其可以接收任意极化波, 波也可以由任意极化天线接收; 旋向正交性等优点, 正在被广泛研究和应用. 微带圆极化天线也一直是研究的热点. 实现微带天线圆极化的基本方法有: 单馈法、多馈法和多元法. 单馈法由一个馈点馈电, 形成极化正交幅度相等的两个简并模, 90° 相差由简并模分离单元引入. 多馈法常见的形式为两馈点馈电, 产生由 TM_{01} 和 TM_{10} 模形成的极化正交模, 幅度相等, 馈电电路引入 90° 相差. 多元法主要由并联或串联的馈电网络将多个线元阵组成天线阵, 线元相差 90° .

展宽微带天线带宽的基本途径有两个: (1) 是降低等效谐振电路 Q 值, 如式(1)所示; (2) 修改等

效电路. 其中, 途径(1)比较常用. 由于因辐射引起的 Q 值几乎与电厚度 h/λ_0 成反比, 因此增加基板厚度是扩展带宽的有效手段. 叠层技术也是常见扩展带宽的方式, 多采用中间填充空气层的结构, 方便有效.

$$BW = \frac{L-1}{\sqrt{L}Q} \times 100\% \tag{1}$$

正方形贴片天线的经典公式, 如式(2)和式(3)所示, f_r 为谐振频率; ϵ_r 为等效介电常数, 可以初步确定工作频段对应的天线贴片尺寸. 天线结构有时会包含多层不同介电常数的介质基板, 其等效介电常数 ϵ_e 可由式(4)给出, 其中, i 表示介质层的层数; h_i 为第 i 层介质层的高度; ϵ_{ri} 表示第 i 层介质层的介电常数. 常采用在天线介质板中间加空气层来降低等效介电常数, 达到扩展带宽的目的.

$$L = 0.5\lambda_g - 2\Delta L \tag{2}$$

$$\lambda_g = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \tag{3}$$

$$\epsilon_e = \sum_i \frac{h_i}{h_i/\epsilon_{ri}} \tag{4}$$

3 天线仿真设计

3.1 天线单元设计

天线单元如图 1 所示, 采用三层介质基板结构, 材料为 FR-4, 介电常数均为 4.4. 天线结构从上到下分别为: 第一层介质基板、寄生贴片、空气层、辐射贴片和左旋馈电网络; 第二层介质基板、接地板; 第三层介质基板、右旋馈电网络. 通过空气层高度和贴片尺寸可以调节天线阻抗特性. 对贴片进行切角, 提高微带天线圆极化性能. 采用单支节匹配技术, 展宽带宽. 根据式(2)和式(3)确定寄生贴片 L_1 和辐射贴片 L_2 的尺寸, 空气层高度 H_2 一般约为中心频点对应自由波长的 0.06 倍. 天线的主要参数如表 1 所示.

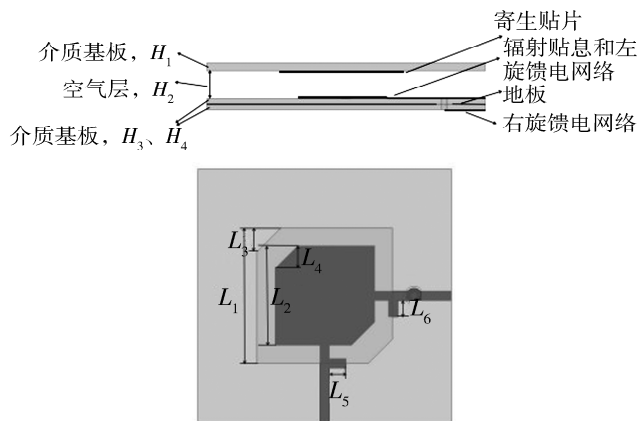


图 1 天线单元

Fig. 1 Antenna element

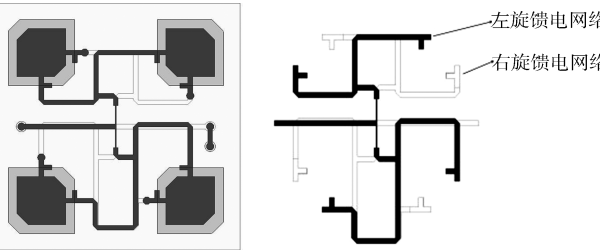
表 1 天线主要参数(单位:mm)

Tab. 1 Antenna main parameters

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
26.7	19.6	4.7	4.5	3.3
L_6	H_1	H_2	H_3	H_4
3.2	1.6	4.4	1	1

3.2 天线阵设计

为进一步扩展天线的带宽,提高天线的增益,在单元设计好的基础上进行组阵.微带天线采用单馈点馈电,T型功分器并联组成一个 2×2 的天线阵列提供 90° 相差,并对天线进行切角,实现圆极化.天线阵列间距一般在 $0.6\lambda_0\sim 0.8\lambda_0$ 之间.当频带较宽时,需兼顾低频和高频,本文单元间距选取 $0.76\lambda_0$.微带天线阵列尺寸为 $1.27\lambda_0\times 1.27\lambda_0\times 0.1\lambda_0$.天线阵列如图 2 所示.



(a) Microstrip antenna array (b) Feed network
图 2 微带天线阵列及馈电网络
Fig. 2 Microstrip antenna array and feed network

3.3 天线馈电网络设计

如图 2 所示,T型功分器并联形成 2×2 天线阵列的馈电网络,结构简单,馈电网络仅采用 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 的微带线.为实现双圆极化微带天线的小型化,将左右旋馈电功分网络分两层介质板排布.左旋圆极化的馈电网络排布在第二层介质板上方,顺时针相差分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270° ,第一级 T 型功分器由 $50\ \Omega$ 的微带传输线输入,采用 $100\ \Omega$ 的阻抗变换段与第二级 T 型功分器相连;第二级功分器均采用 $50\ \Omega$ 的微带线宽,最后与辐射贴片连接.右旋圆极化的馈电网络排布在第三层介质板下方,其馈电网络的布局为左旋圆极化馈电网络布局的镜像,馈电网络与辐射贴片之间通过金属柱连接,相差分别为 0° 、 -90° 、 -180° 、 -270° .如图 3 所示,在 $3.2\sim 5\ \text{GHz}$ 频带内,仿真功分网络的 $S_{11}<-10\ \text{dB}$,端口幅度都在 $-6\ \text{dB}$ 左右,端口相位差都在 90° 左右,满足设计要求.

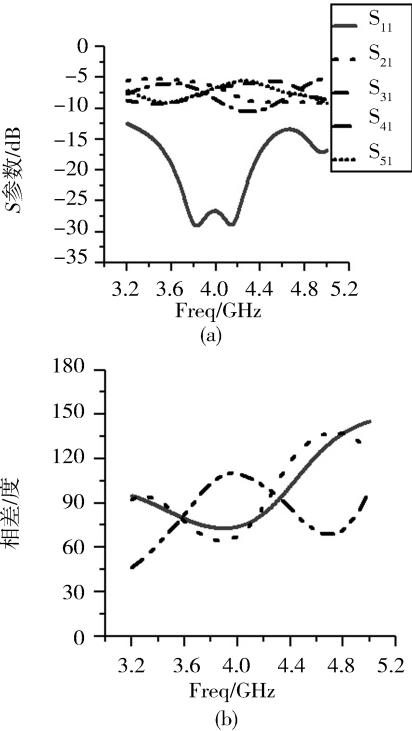


图 3 功分网络幅度与相差仿真图
Fig. 3 The simulated amplitude and phase difference of feed network

天线的小型化通常会带来天线性能的恶化,且微带天线的圆极化带宽一般较小,提高其轴比带宽也会影响天线的驻波带宽和增益.因天线的实际应用场景,其周围和底部有金属反射板,从而增强天线的单向辐射特性,提高增益.考虑金属反射板会对天线性能造成影响,进行调节.底部反射板边长为 LB ,四周金属板高度为 HB_1 ,底部反射板与天线底部距离为 HB_2 .综合各个性能取 $LB=156\ \text{mm}$, $HB_1=65\ \text{mm}$, $HB_2=37.5\ \text{mm}$.

4 阵列仿真与实验测试分析

根据天线阵列仿真制作了 2×2 双圆极化微带天线样机,天线实物如图 4 所示.阵列驻波仿真与测试结果如图 5 所示,轴比的仿真与测试结果如图 6 所示,增益的仿真与测试结果如图 7 所示,阵列仿真和测试方向图如图 8 和图 9 所示.

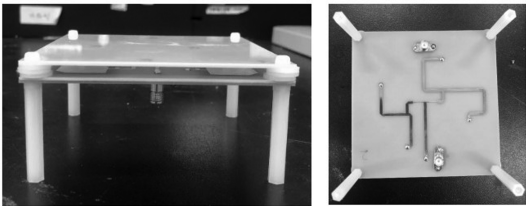


图 4 天线实物图
Fig. 4 Photo of antenna

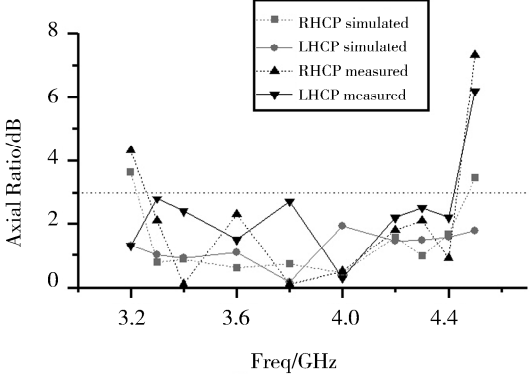
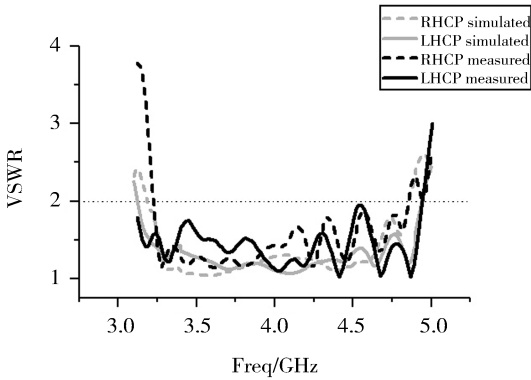


图 5 天线阵列驻波仿真与测试结果图
Fig. 5 The simulated and measured VSWR of array

图 6 天线阵列轴比仿真与测试结果图
Fig. 6 The simulated and measured AR of array

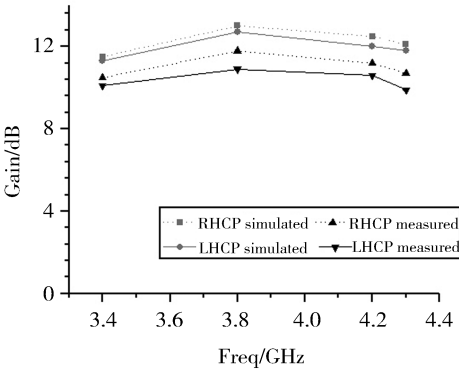


图 7 天线阵列增益仿真与测试结果图
Fig. 7 The simulated and measured gain of array

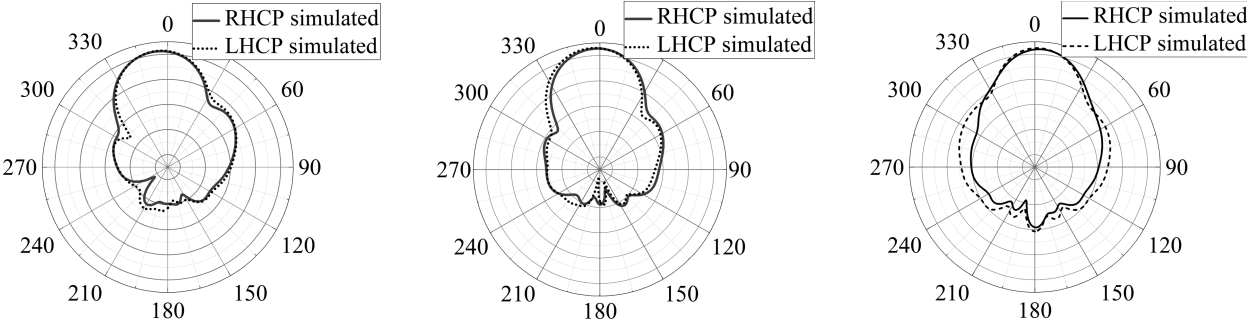
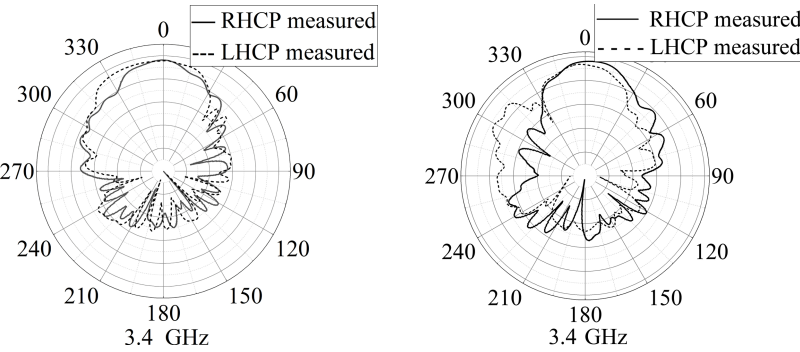


图 8 天线阵列在 3.4、3.8、4.2 GHz 仿真方向图
Fig. 8 The simulated radiation pattern at 3.4, 3.8, 4.2 GHz



(a) When $\phi=0$ and $\phi=90$, the measured radiation pattern at 3.4 GHz

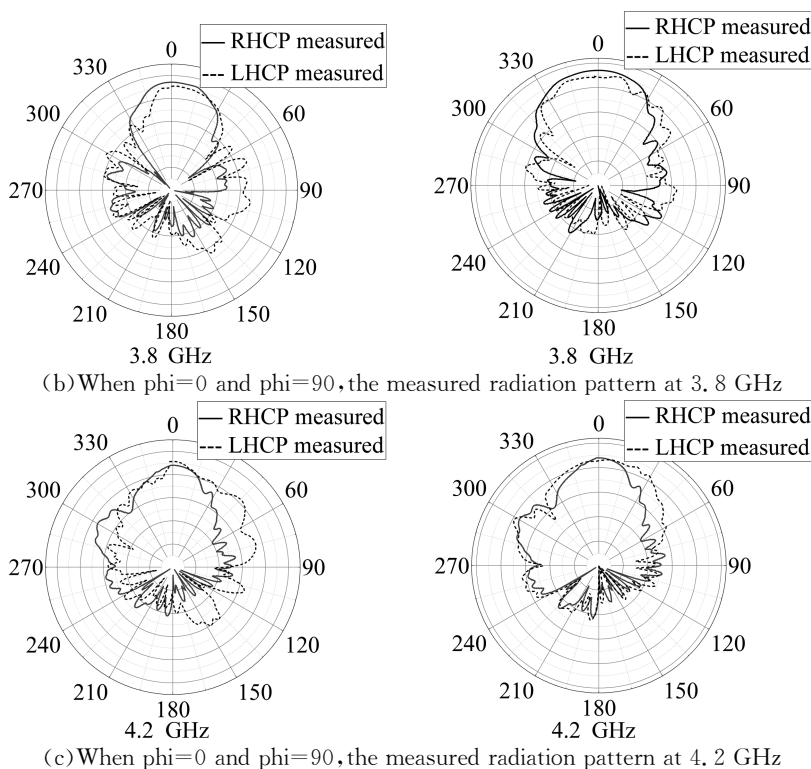


图 9 天线阵列在 3.4、3.8、4.2 GHz 测试方向图
Fig. 9 The measured radiation pattern at 3.4, 3.8, 4.2 GHz

从上图可以看出,天线驻波测试结果与仿真结果吻合较好, VSWR 在 3.25~4.85 GHz 频带内小于 2,驻波带宽达到 39.5% 以上. 在 3.3~4.4 GHz 频带内,天线仿真左右旋轴比均小于 2 dB,在该频带内测试结果左旋和右旋轴比小于 3 dB,轴比带宽达 28.6% 以上,测试结果略差于仿真结果,分析原因可能是因为天线测试过程中,接收天线未能对准发射天线及天线加工误差的影响. 在 3.4~4.3 GHz 带宽内,仿真天线阵列左右旋增益均大于 11 dB,增益最大值达到 13.6 dB,在 3.4~4.3 GHz 内左旋测试增益大于 10 dB,在 3.4~4.2 GHz 内右旋测试增益大于 10 dB,增益最大值为 11.8 dB,测试增益较仿真增益降低 1 dB 左右,可能因为天线馈电网络焊接及天线背腔加工误差.

5 结 论

采用多层结构与支节匹配技术,实现了一款 C 波段宽带双圆极化微带天线,保证低剖面的前提下最终实现了天线小型化设计,尺寸仅 $1.27\lambda_0 \times 1.27\lambda_0 \times 0.1\lambda_0$. 天线的阻抗带宽达 39.5%,左右旋 3 dB 轴比带宽均达 28.6% 以上,增益最大值为 11.8 dB. 更适用于无人机等对天线有低剖面、小尺寸严苛要求的应用场景.

参考文献:

- [1] Li M W, Xue B Y, Li L, *et al.* A high-gain circular polarized microstrip slot coupling antenna for satellite communication [C]// Proceedings of the 2017 6th APCAP. Xian, China: IEEE, 2017.
- [2] Gan Z, Tu Z H, Xie Z, *et al.* Compact wideband circularly polarized microstrip antenna array for 45 GHz application [J]. IEEE T Antenn Propag, 2018, 66: 6388.
- [3] Ayad H, Khalil A, Fadlallah M, *et al.* Practical design for circularly polarized dual offcenter aperture-coupled microstrip antenna for GPS application [C]// HPCS. Bologna Italy: IEEE, 2014.
- [4] Yu T B, Li H B, Zhong X J, *et al.* A wide bandwidth circularly polarized microstrip antenna array using sequentially rotated feeding technique [C]// Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation. Nanjing, China: IEEE, 2013.
- [5] Nasimuddin, Qing X M, Chen Z N. A wideband circularly polarized microstrip array antenna at Ka-band [C]// Proceedings of the 2016 10th EuCAP. Davos, Switzerland: IEEE, 2016.
- [6] Zhong Z H, Xu L, Zhang H, *et al.* A foldable circular polarized microstrip antenna array for satellite

communication [C]// Proceedings of the 2018 ISA-PE. Hangzho, China: IEEE, 2018.

[7] Srinivasa V, Vipin R, Paradkar W, *et al.* Wideband broadbeamwidth circularly polarized stacked microstrip patch antenna with RF switch for data link application [C]// IMaRC. Hyderabad, India: IEEE, 2015.

[8] Karamzadeh S, Rafii V, Kartal M E, *et al.* Circularly polarised array antenna with cascade feed network for boadband aplication in C-band [J]. IEEE Electron lett, 2014, 50: 1184.

[9] 解志诚, 黄 英, 王志强, 等. 2. 45GHz 柔性微带天线的设计及传感特性[J]. 吉林大学学报:理学版, 2019, 57: 160.

[10] Zhang Z M, Zhang T L, Guo C, *et al.* S-band dual circularly polarized microstrip patch antenna array for satellite communication[C]// Proceedings of the 2017 6th APCAP. Xian, China: IEEE, 2017.

[11] Ye S, Geng J P, Liang X L, *et al.* A compact dual-band orthogonal circularly polarized antenna array with disparate elements [J]. IEEE T Antenn Propag, 2015, 63: 1359.

[12] Guo C, Zhang X L, Lai Q H. A novel S band dual circularlypolarized antenna array for airborne satellite communication applications [C]// Proceedings of the 2016ICMMT. Xian,China: IEEE, 2016.

[13] Liu J F, Wu D L, Zhang G, *et al.* A left right handed dual circularly polarized antenna with duplexing and filtering performance[J]. IEEE Access, 2019, 7: 35431.

[14] Satyajit C, Sameer K C, Salt E C. Composite feed dual circularly polarized microstrip antenna at L-band [C]//Proceedings of the 2017 AEMC. Aurangabad, India: IEEE, 2017.

[15] Mahrukh K, Yang Z C, Warnick K. Dual circular polarized high-efficiency antenna for ku-band satellite communication [J]. IEEE Antenn Wirel Pr, 2014, 13: 1624.

引用本文格式:

中 文: 徐永佳, 杨存顺, 孙雨婷, 等. C 波段小型化宽带双圆极化微带阵列天线设计[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 719.

英 文: Xu Y J, Yang C S, Sun Y T, *et al.* Design of a C-band miniaturized broadband double-circularly polarized microstrip array antenna[J]. J Sichuan Univ; Nat Sci Ed, 2020, 57: 719.