

小型化抗干扰导航天线研究

王梦双, 朱小奇, 丁克乾, 史永康
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要:为解决卫星导航系统中接收机容易受到干扰进而失锁的问题, 针对抗干扰阵列天线展开研究。考虑到弹上、箭上等应用环境中空间非常紧凑, 提出导航圆极化天线的小型化和展宽轴比波瓣宽度的新方法, 通过在贴片上开槽和加载容性贴片的方式, 将天线尺寸缩减至 $0.18\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$, 同时天线的 3-dB 轴比波瓣宽度超过 120° 。在此基础上设计了 13 阵元阵列, 结合基于线性约束最小方差准则的抗干扰算法, 通过电磁仿真进行验证, 仿真结果表明, 设计的基于小型化圆极化天线的导航天线阵列对空间中不同来向的干扰信号具有显著抑制效果, 可以应用于各种抗干扰导航系统中。

关键词: 全球卫星导航系统; 圆极化; 阵列天线; 抗干扰

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2020)04-0028-06

A novel miniaturized circularly polarized antenna for anti-jamming GNSS applications

WANG Mengshuang, ZHU Xiaoqi, DING Keqian, SHI Yongkang
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: In global navigation satellite systems (GNSS), the receivers are vulnerable to the inevitable interferences, which may even result in acquisition failure. This paper mainly focuses on the study of miniaturized circularly polarized (CP) antenna for anti-jamming navigation systems. Firstly, a new method for size reduction and axial ratio (AR) beamwidth enhancement is proposed. It is revealed that by etching slots on the patch and loading capacitive patches, the footprint of the patch is significantly reduced to $0.18\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$. In addition, the simulated 3-dB axial ratios beamwidth is wider than 120° . Then, an array consisting of thirteen elements is designed, and the anti-jamming algorithm based on the linearly constrained minimum variance (LCMV) criterion is applied. It is shown that the proposed antenna array can effectively suppress the interferences from different directions simultaneously, which validates the proposed design a good candidate for anti-jamming navigation systems.

Key words: Global navigation satellite systems; Circularly polarized antenna; Array antenna; Anti-jamming algorithm

引 言

卫星导航系统为陆、海、空各领域提供全天候的高精度的时间、空间、速度等信息, 拥有独立的卫星导航系统对国家安全具有重要战略意义。由于接收机接收的卫星信号功率很低, 容易受到来自各方面信号的干扰, 因此, 自适应抗干扰已成为卫星导航接收系统不可或缺的功能。随着无线电技术的飞速发展, 卫星导航系统中的各种电子设备高度集成, 因此, 要求接收机在保证精度的需求下, 尽可能小型化、轻量化。此外, 在自适应抗干扰系统中, 增加天线数量有利于提高阵列自由度, 从而可以抑制更多干扰信号。因此, 为了在有限的空间中放置更多天线单元, 需要进一步研究天线小型化的方法^[1]。在卫星通信中, 圆极化波能够消除电离层法拉第旋转效应引起的极化畸变损失, 减少极化失配引起的能量损失, 增强极化效率, 同时, 圆极化波还可以显著抑制多径效应, 因此, 圆极化是卫星导航天线首选的极化形式^[2]。研制结构紧凑的圆极化天线不仅可以提高通信链路稳定性和效率, 还可以改善天线阵列的抗干扰性能。

本文围绕上述问题和需求展开研究,提出了一种新型的小型化圆极化天线,通过在贴片上开槽和加载容性耦合贴片的方式,将天线尺寸缩减至 $0.18\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$,同时,天线的 3-dB 轴比波瓣宽度超过 120° 。在此基础上,设计了十三阵元阵列,结合基于最小噪声方差准则的抗干扰算法,通过电磁仿真进行验证,仿真结果表明,所设计的基于小型化圆极化天线的导航天线阵列对空间中不同来向的干扰信号具有显著抑制效果。

1 基于容性加载技术的小型化导航天线

在导航系统中,接收机一般需要接收 4 颗及以上卫星的导航信号才能实现精确定位。由于卫星的位置在时刻变化,因此接收机中的圆极化天线的轴比波瓣宽度特性对极化匹配特性有重要影响。为了在实现小型化设计的同时展宽轴比波瓣宽度,文献[3]中 LUO Yu 等人提出将两对平行的电偶极子放置成方形结构,并保持每对电偶极子的间距约为 $0.4\lambda_0$,此时天线辐射的 E_ϕ 分量方向图与 E_θ 分量方向图接近,实现了 126° 的 3-dB 轴比波瓣宽度。为了进一步缩小天线尺寸,文献[4]提出采用弯折的电偶极子代替直线型电偶极子,将天线尺寸进一步缩小约 34%,同时将轴比波瓣宽度展宽至 135° 。然而,这两款天线均为双向辐射,为了解决其双向辐射的问题,提出采用微带天线等效的磁偶极子取代电偶极子的方式,同时通过引入开槽和加载耦合短路贴片的方式,等效于弯折磁偶极子,可同时实现小型化和轴比波瓣宽度的展宽^[5]。在笔者前期工作的基础上,通过改进 T 形耦合贴片,进一步降低天线谐振频率,从而缩小天线尺寸。图 1 所示为笔者设计的天线结构图,该天线采用探针双馈方式,馈电探针连接至地板下方的威尔金森功分网络实现正交馈电,具有良好的圆极化辐射特性。天线工作在 GPS-L1 频带 ($1575\text{MHz} \pm 10\text{MHz}$),天线辐射层的介质基板相对介电常数仅为 $\epsilon_r=3.5$,功分网络层的介质基板相对介电常数为 $\epsilon_r=4.4$,辐射层和功分网络层的介质基板厚度分别为 4mm 和 1mm,该天线的辐射体的平面尺寸仅为 $34.3\text{mm} \times 34.3\text{mm}$,天线尺寸仅为 $0.18\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$ 。表 1 给出了天线的结构参数。

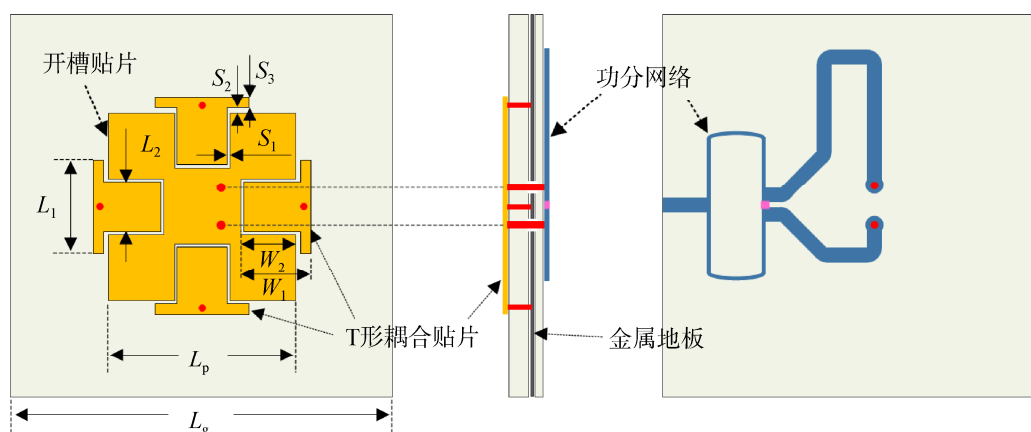


图 1 基于贴片开槽和容性加载技术的小型化圆极化天线结构图

Fig. 1 Configuration of the proposed miniaturized CP antenna

表 1 天线结构尺寸 (单位: mm)

Table 1 Geometrical parameters of the proposed antenna (Unit: mm)

L_1	L_2	S_1	S_2	S_3	W_1	W_2	L_p	L_g
16.75	6.55	0.35	0.25	2	11	8.67	29.75	57

图 2 (a) 为天线小型化设计演化过程。从图 2 (b) 可以看出,天线 1 的工作频率为 2.45GHz,其峰值增益为 6.68dBic。天线 2 通过在贴片四周开矩形槽可以增加电流路径,进而实现小型化,在同等尺寸下将工作频率降至 1.97GHz。在天线 2 的基础上,天线 3 引入耦合短路贴片,进一步将天线的工作频率降低至 1.70GHz。而本文提出的天线则通过对加载的耦合短路贴片进行优化,使用 T 型容性加

载短路贴片, 进一步将天线工作频率降低至 1.575GHz, 大大缩小了天线尺寸。

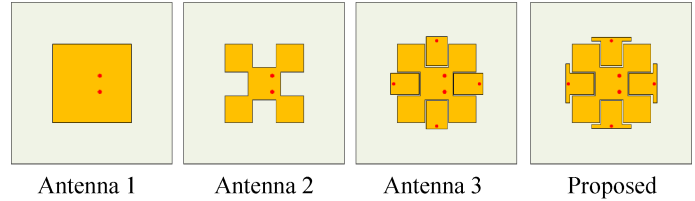
图 3 给出了所设计天线仿真的 $|S_{11}|$ 、轴比和增益随频率变化曲线, 结果表明, 天线的 10-dB 阻抗带宽可完全覆盖工作频段, 同时在 GPS-L1 频段仿真的 $|S_{11}|$ 均低于-20dB, 匹配特性良好。天线的 3-dB 轴比在工作频段内均低于 0.9dB, 极化纯度高。此外, 尽管天线的尺寸很小, 然而天线在 GPS-L1 频段的增益仍均高于 3.4dBic, 峰值增益为 4.3 dBic, 其 3-dB 增益带宽约为 45MHz (1.597GHz~1.552GHz)。该天线在 GPS-L1 频段的辐射效率均高于 72%, 考虑到天线电尺寸仅为 $0.18\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$, 其仿真的增益和效率是可接受的。

图 4 为天线在 1.575GHz 的 3-dB 轴比波瓣宽度和方向图。其中天线的 3-dB 轴比波瓣宽度在 $\phi = 0^\circ$ 、 45° 、 90° 、 135° 面内的波瓣宽度均大于 125° , 满足 120° 的 3-dB 轴比波瓣宽度的要求。天线的 3-dB 增益宽度为 105° , 而在 120° 范围内, 天线增益均高于 0dBic。上述仿真结果表明, 所设计的紧凑型圆极化天线满足导航系统对接收天线的要求。

2 自适应抗干扰导航天线阵列

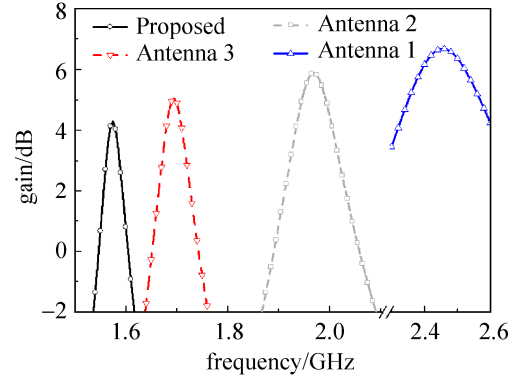
为了验证所设计的基于容性加载技术的小型化导航天线在抗干扰系统中的应用, 以该天线为单元组成天线阵列, 并结合自适应抗干扰算法, 对天线阵列的抗干扰性能进行分析。首先, 将所设计天线组成圆形阵列, 该阵列共包含 13 个阵元, 阵列分布如图 5 所示, 其中, 坐标原点上分布 1 个阵元, 第二圈圆环上均匀分布 4 个阵元, 第三圈圆环上均匀分布 8 个阵元, 第二、第三圈圆环的半径分别为 57mm 和 114mm, 阵列中阵元之间最小间距约为 $0.3\lambda_0$ 。需要指出, 由于该阵列采用了新型小型化导航天线设计, 因此该 13 阵元天线阵列尺寸仍较小。对传统导航天线而言 (例如图 2 中天线 1), 该尺寸仅能放置 7 个天线单元, 因此会大大削弱阵列的抗干扰性能。

在全球卫星导航系统中, 由于卫星导航信号达到地球表面时非常微弱, 甚至比接收机热噪声还低 20dB, 而复杂电磁环境下各种射频干扰信号电平则远高于卫星导航信号, 在这种强干扰、弱信号的环境中接收机极易发生误捕获, 因此, 需要采用行之有效的导航抗干扰技术。在抗干扰系统中, 天线阵列通常包含若干个阵元, 且一般假定各阵元各项同性。每个阵元均连接两路接收通道, 各阵元接收信号经过下变频、低通滤波、A/D 采样, 得到正交分量 $x_I(n)$ 和 $x_Q(n)$, 阵列处理机对 $x_I(n)$ 和 $x_Q(n)$



(a) 天线结构演化图

(a) Evolution procedure of the proposed antenna structure



(b) 仿真的天线增益随频率变化曲线

(b) Simulated antenna gains versus frequency

图 2 天线小型化设计过程

Fig. 2 Design procedure of proposed antenna

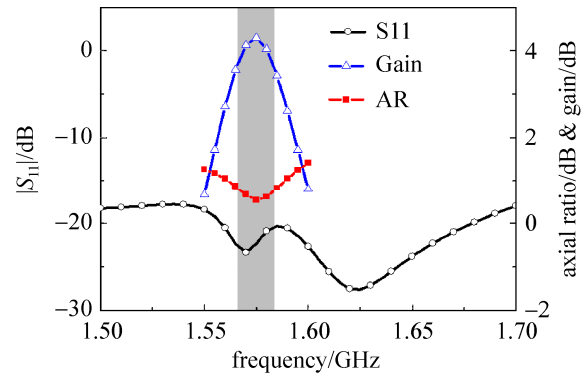


图 3 天线的 $|S_{11}|$ 、轴比和增益随频率变化曲线

Fig. 3 Simulated $|S_{11}|$, axis ratios and gains of the proposed antenna

进行加权完成空域滤波。因此,自适应抗干扰技术的目标就是根据当前阵列接收信号的二阶统计特性计算最优的阵列加权矢量,使得阵列方向图能自适应地在干扰方向形成零陷,保证期望信号的接收。最小噪声方差准则是自适应信号处理中一种常用的算法,该算法是以阵列输出功率最小为目标选择最优加权矢量,为避免出现阵列加权矢量 $\mathbf{w}=0$ 的情况,需要添加一定的约束条件,常用的约束方法是保证有用信号不失真接收,也就是使阵列对有用信号的响应为常数。因此,最小噪声方差准则的代价函数为

$$\min \mathbf{w}^H \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{w}, s.t. \mathbf{w}^H \cdot \mathbf{a}(\theta_0) = 1 \quad (1)$$

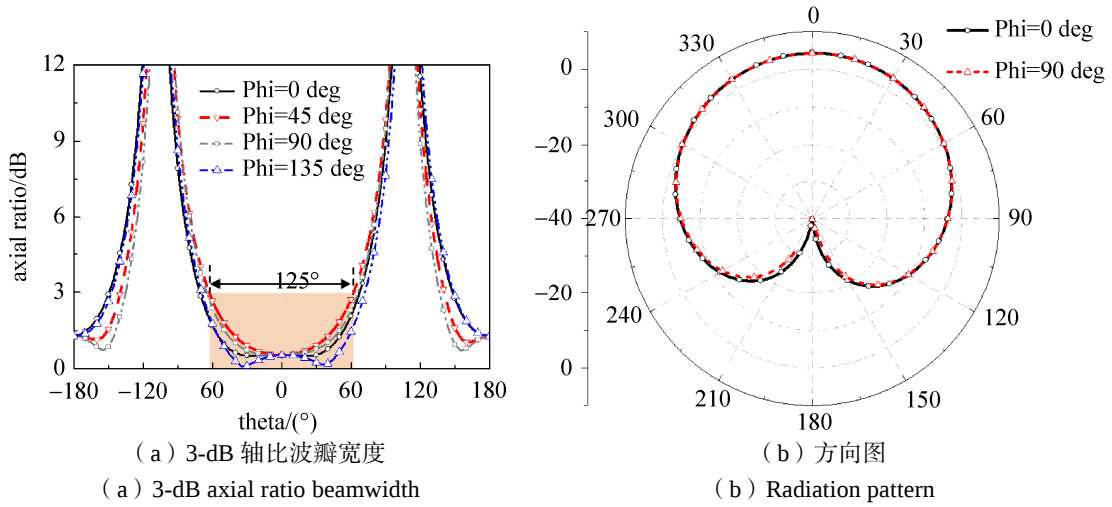


图 4 天线在 1.575 GHz 仿真的 3-dB 轴比波瓣宽度和方向图

Fig. 4 Simulated axis ratios and radiation pattern of the proposed antenna at 1.575GHz

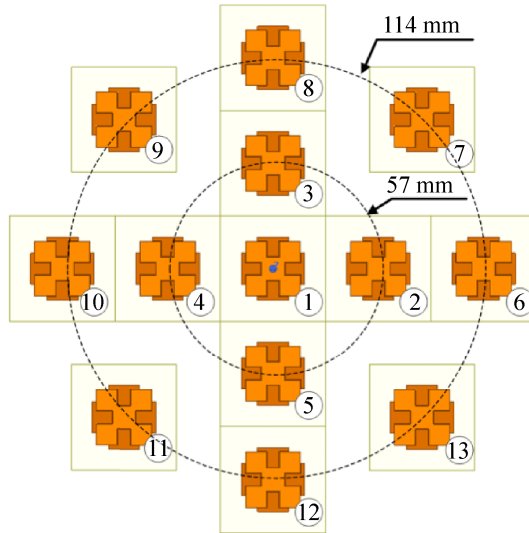


图 5 13 阵元圆形阵列排布示意图

Fig. 5 Configuration of the proposed antenna array consisting of 13 elements

其中 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为阵列的导向矢量, $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{x}^H(t)]$ 为信号复包络的协方差矩阵, 根据线性约束最小方差准则得到的最佳加权矢量可以表示为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0) / [\mathbf{a}^H(\theta_0) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{a}(\theta_0)] \quad (2)$$

根据上述分析,假定图 5 中天线阵列接收到来自空间中不同方向的卫星导航信号和 9 个干扰信号,

并设定系统中信噪比为 -20dB , 干噪比为 40dB , 卫星导航信号的来向为 $(\theta_0=20^\circ, \varphi_0=180^\circ)$, 而 9 个干扰信号来向分别为 $(\theta=50^\circ, \varphi=0^\circ)$ 、 $(\theta=35^\circ, \varphi=60^\circ)$ 、 $(\theta=45^\circ, \varphi=90^\circ)$ 、 $(\theta=60^\circ, \varphi=230^\circ)$ 、 $(\theta=60^\circ, \varphi=270^\circ)$ 、 $(\theta=45^\circ, \varphi=150^\circ)$ 、 $(\theta=60^\circ, \varphi=320^\circ)$ 、 $(\theta=45^\circ, \varphi=180^\circ)$ 和 $(\theta=30^\circ, \varphi=240^\circ)$ 。采用公式(2)可以得到基于 LCMV 算法的自适应加权矢量, 各阵元加权系数如图 6 所示。

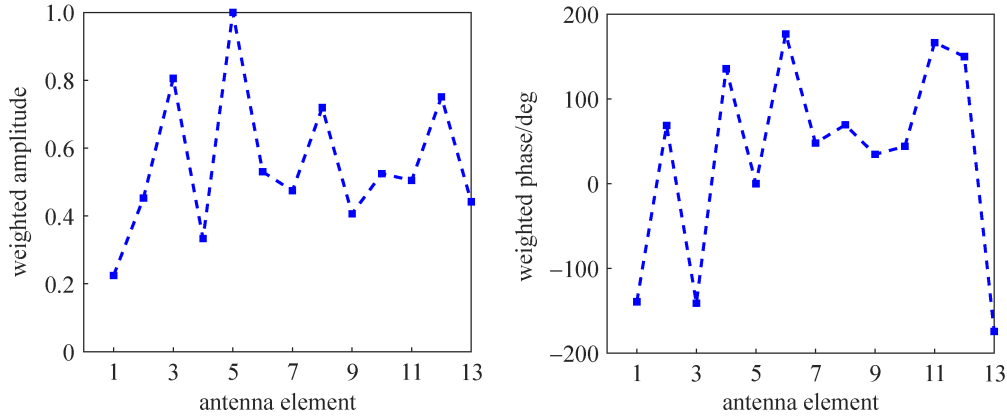
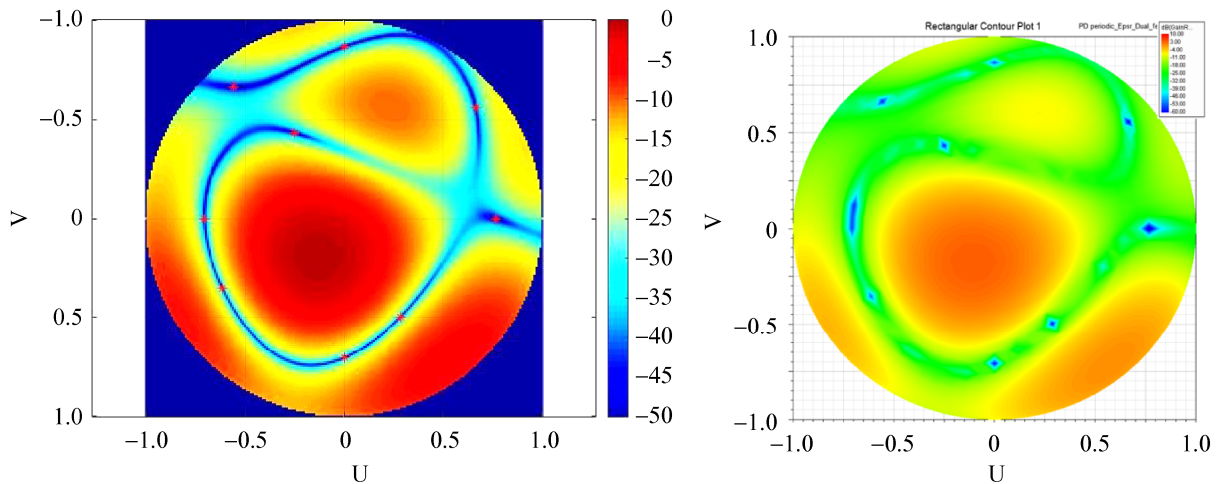


图 6 根据 LCMV 算法计算的加权系数

Fig. 6 The calculated weight vector based on the LCMV criterion

图 7 给出了在上述加权系数下仿真的阵列方向图, 为方便查看, 图中 x 、 y 轴分别以正弦空间中的 U 、 V 坐标表示。其中, 基于 Matlab 的仿真带入了天线单元方向图, 而基于 HFSS 的仿真则采用全波仿真方法。从图中可以看出, 采用 Matlab 和 HFSS 仿真的方向图一致性很好, 仿真的方向图在各干扰方向均形成零陷。表 2 中列出了基于 Matlab 和 HFSS 仿真的阵列方向图零深对比, 可以看到二者均在干扰来向形成零陷, 且零陷深度均低于 -40dB , 二者的零深结果整体上吻合得较好, 部分方向上的差异主要由阵元间互耦引起。此外, 基于 HFSS 仿真的阵列方向图在导航信号来向的归一化增益仅比增益最大值低 3.4dB 。因此, 上述仿真结果表明, 所设计的天线阵列在图 6 所示的加权系数下能显著地抑制干扰信号, 同时, 阵列对卫星导航信号的接收能力无显著恶化。



(a) Matlab 仿真的阵列方向图

(a) Array pattern simulated by Matlab

(b) HFSS 仿真的阵列方向图

(b) Array pattern of HFSS simulation

图 7 根据最优加权系数得到阵列方向图

Fig. 7 The simulated radiation pattern of the 13-element array with the obtained weight vector

表 2 基于 Matlab 和 HFSS 仿真的阵列方向图零深对比 (单位: dB)
Table 2 Comparison of the simulated nulls observed in the radiation patterns
obtained using Matlab and HFSS (Unit: dB)

干扰方向		零深 (dB)	
θ	φ	Matlab	HFSS
50°	0°	-62	-69
35°	60°	-41	-64
45°	90°	-43	-58
60°	230°	-53	-57
60°	270°	-45	-54
45°	150°	-44	-56
60°	320°	-47	-65
45°	180°	-44	-55
30°	240°	-49	-62

3 结束语

本论文针对导航系统对小型化天线和抗干扰性能的需求,提出了通过对微带天线开槽和加载容性耦合贴片的新方法,显著实现小型化的同时改善了天线的轴比波瓣宽度,将天线辐射体尺寸缩减至 $0.18\lambda_0 \times 0.18\lambda_0$, 然后以该小型化天线为基础设计了紧凑型天线阵列,并通过抗干扰算法得出最佳阵列加权矢量。该阵列在多达 9 个干扰同时存在的环境中,能够在干扰方向形成低于-40dB 的零陷,而在导航信号来向的归一化增益仅比增益最大值低 3.4dB,从而表明所设计的基于小型化圆极化天线的导航天线阵列可以在抗干扰导航系统中有效地抑制干扰信号。

参考文献

- [1] 徐晓强. 自适应抗干扰调零天线[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
XU Xiaoqiang. Adaptive anti-jamming nulling antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [2] 王玉峰, 常雷, 何小煜. 圆极化天线技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [3] LUO Yu, CHU Qinxin, ZHU Lei. A low-profile wide-beamwidth circularly-polarized antenna via two pairs of parallel dipoles in a square contour[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2015, 63(3): 931-936.
- [4] LUO Yu, CHU Qinxin, ZHU Lei. A miniaturized wide-beamwidth circularly polarized planar antenna via two pairs of folded dipoles in a square contour[J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2015, 63(8): 3753-3759.
- [5] WANG Mengshuang, ZHU Xiaoqi, GUO Yongxin, et al. Compact circularly polarized patch antenna with wide axial-ratio beamwidth[J]. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 2018, 17(4): 714-718.

[作者简介]

王梦双 1989 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为超宽带被动天线、超宽带相控阵设计。
朱小奇 1990 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为小型化天线设计、数字多波束阵列。
丁克乾 1976 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为阵列天线、相控阵天线设计。
史永康 1978 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为阵列天线、相控阵天线设计。