

双极化天线阵列抗干扰性能研究

郭华秋, 孙 迅, 马忠志, 李 达, 刘 红
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 现代战场的电磁环境十分复杂, 这使得卫星对导航抗干扰接收机的鲁棒性需求变得更为迫切。极化敏感阵列是一种利用极化信息增加信号处理维度的技术, 应用在导航领域可以改善接收机抗干扰性能。本文研究了双极化阵列在复杂电磁环境下的抗干扰效果, 理论分析了信号模型与双极化阵列原理, 通过 HFSS 对阵列天线进行有限元仿真获取各阵元的幅度相位信息, 利用幅相信息合成导向矢量, 在 MATLAB 中对普通阵列和双极化阵列抗干扰能力进行仿真。为验证理论仿真的可行性, 研制了双极化阵列原理样机, 在暗室环境采集数据并分析信号与干扰的输出功率。在外场进行的收星定位测试中比较了普通阵列与双极化阵列的定位结果。仿真和实测的结果表明, 双极化阵列能抑制超自由度干扰, 且对低仰角干扰有较好的鲁棒性。值得注意的是, 双极化天线在保持接收机小型化的同时表现出较好的鲁棒性, 为接收机小型化提供了可行的解决方案。

关键词: 极化抗干扰; 双极化; 自适应调零; 自由度

中图分类号: V556.1; TN97 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)03-0072-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240102001

引用格式: 郭华秋, 孙迅, 马忠志, 等. 双极化天线阵列抗干扰性能研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(3): 72-80.

Research on Anti-jamming Technology of Dual-polarized Antenna Array

GUO Huaqiu, SUN Xun, MA Zhongzhi, LI Da, LIU Hong
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: The complex electromagnetic environment of modern battlefields requires strong robustness of satellite navigation anti-jamming receivers. A polarization-sensitive array uses polarization information to increase the dimension of processing signals and can be applied in navigation to improve the anti-interference performance of the receiver. In this paper, the anti-jamming of the dual-polarization array in a complex electromagnetic environment is studied. The signal model and the dual-polarization array are introduced, and the amplitude and phase information obtained by finite element simulation on HFSS are then used to synthesize the steering vector and simulate it in MATLAB to prepare the anti-jamming ability of the ordinary array and the dual-polarization array. The real data is measured in a darkroom to verify the simulation results. The satellite collection positioning test was carried out on the roof to compare the positioning results of the ordinary array and the Dual-polarization array. The simulation and experiment shows that the dual-polarization array can suppress super-degree-of-freedom jamming and has good robustness under low elevation angle jamming. The dual-polarization antenna does not change the antenna size and can maintain the receiver miniaturization while keeping good robustness.

Keywords: Polarization anti-jamming; Dual-polarization; Adaptive nulling; Degree of freedom

Citation: GUO Huaqiu, SUN Xun, MA Zhongzhi, et al. Research on Anti-jamming Technology of Dual-polarized Antenna Array[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(3): 72-80.

0 引言

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)能为地表或近地空间的用户提供定位、导航与授时(Positing, Navigating and Timing,

PNT)服务, 在民用和军用领域广泛应用, 尤其是在军用领域发挥重要的作用^[1]。受卫星发射功率以及传播距离的影响, 地面接收导航信号的强度十分微弱且极易受到干扰, 在日益复杂的电磁环境下如何保障 GNSS 提供精确的 PNT 服务成为导航领

域的研究热点。基于上述状况，导航战的概念被提出，其目的是保护我方对导航信号有效利用，并阻止敌方有效获取导航信号^[2,3]。导航战分为进攻型和防御型两种类型，进攻型导航战通过各种干扰技术影响接收机正常接收导航信号，而防御型导航战则是通过抗干扰技术对干扰进行抑制。现有的干扰技术包括压制干扰和欺骗干扰两种，其中功率压制作为最成熟有效的导航干扰手段得到广泛应用^[4]。随着抗干扰技术的发展，接收机抗压制干扰能力已经能够达到110 dB~120 dB。为了实现20 km的有效干扰距离，干扰源需要发射10 MW~100 MW的干扰功率，实现难度很大。压制干扰技术不再一味地增强干扰功率，而是引入更多干扰参量、改进信号样式以提高压制干扰的效率。压制干扰技术的更新与电磁环境的日益复杂对接收机抗干扰性能带来了更多的挑战^[5]。

对于传统的自适应调零天线阵列，使用抗干扰手段如功率倒置(Power Inversion, PI)算法存在一定的自由度，通常可以抑制比阵元数目少一个($M-1$)的干扰^[6]。自适应调零天线阵列的尺寸通常受到其使用场景的限制，这也限制了其阵元数目。所以面对干扰数目超过自由度的复杂电磁环境时，PI算法就会失效。另外在低仰角下天线轴比也会恶化^[7]，导致不同阵元接收干扰信号的功率存在较大差异，进而影响PI算法的性能。

对于干扰数目超出阵列实际自由度的情况，可以通过应用极化敏感阵列进行干扰抑制，而无需增加阵元数目或改变天线结构^[8]。近年来，许多学者对极化敏感阵列在导航抗干扰中的应用进行研究，文献[9]采用中心右旋圆极化阵元与三对正交线极化阵元组成的4阵元均匀圆阵仿真证明4阵元阵列可以抑制最多6个单频干扰；文献[10]对7阵元双极化阵列进行空域和极化域联合抗干扰处理仿真，证明其高效干扰抑制能力；文献[11]通过仿真采用双极化贴片天线对2路接收信号进行自适应极化对消；文献[12]采用双正交4元矩形阵进行仿真证明极化空频抗干扰可以抑制6个宽带干扰；文献[13]采用空时极化联合处理进行计算机仿真，将来波方向一致的干扰信号和期望信号从极化域上区分并滤除；文献[14]进行了4阵元极化敏感阵列实测试验，证明其抗宽带干扰自由度扩展至6个。本文通过HFSS搭建天线阵列，对传统阵列和双极化阵列进行仿真，分析其抗干扰性能。最

后通过暗室和外场的实测数据进行验证，结果表明双极化天线阵列能有效增加阵列自由度，在低仰角干扰和复杂电磁环境下有更好的鲁棒性。

1 系统模型

对于阵列天线，从各阵元接收信号的角度，天线接收的信号矢量可表示为：

$$X(t) = AS(t) + n(t) \quad (1)$$

其中，导向矢量集合为 $A = [a_1, a_2, \dots, a_k]$ ， k 为接收机接收到的信号个数，信号集合为 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_k(t)]^T$ 。信号 i 的导向矢量可以表示为：

$$a_i = a_s(\theta_i, \varphi_i) = [1, e^{-j\phi_2(\theta_i, \varphi_i)}, \dots, e^{-j\phi_M(\theta_i, \varphi_i)}]^T \quad (2)$$

其中， ϕ_n 为第 n 个阵元与参考阵元之间的相位差， (θ_i, φ_i) 为第 i 个信号的来波方向，此空间导向矢量由布阵和信号来向决定，天线接收信号矢量可被写为：

$$X(t) = \sum_{i=1}^k a_i s_i(t) + n(t) = \sum_{i=1}^k \begin{bmatrix} s_i(t) \\ s_i(t)e^{-j\phi_2(\theta_i, \varphi_i)} \\ \dots \\ s_i(t)e^{-j\phi_M(\theta_i, \varphi_i)} \end{bmatrix} + n(t) \quad (3)$$

接收机对采集的几路数据进行处理，自适应调零天线常用功率倒置算法，其形式表现为：

$$\begin{cases} \min_W W^H R W \\ \text{s.t. } W^H C_M = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中，约束矩阵为 $C_M = [1, 0, \dots, 0]^T$ ，即 w_1 恒定为1， R 为接收机采样信号的协方差矩阵，双极化天线拥有更高的采样协方差矩阵维数。利用拉格朗日乘法，可得PI算法的最优权值为^[15]：

$$W_{PI} = R^{-1} C_M (C_M^H R^{-1} C_M)^{-1} \quad (5)$$

在现实阵列中，导向矢量与理想情况存在误差。本文以3元均匀线阵为例，在ANSYS的HFSS中进行有限元仿真，建立了天线模型^[16]。阵元间距为 d ，远场信号从与 x 轴夹角为 θ 入射。模型如图1所示，由 x 轴负向到正向依次记为阵元1、阵元2、阵元3，阵元间距约为半波长。通过HFSS仿真可以得到阵面电场的相位信息，计算阵元1与阵元2之间，阵元1与阵元3之间的相位差可得到 ϕ_2 与 ϕ_3 。把阵元1视作参考阵元， $e^{-j\phi} s(t)$ 表示每个阵元的接收信号。下一节中，将以此为基础进行仿真，分析导航接收机的抗干扰效果。

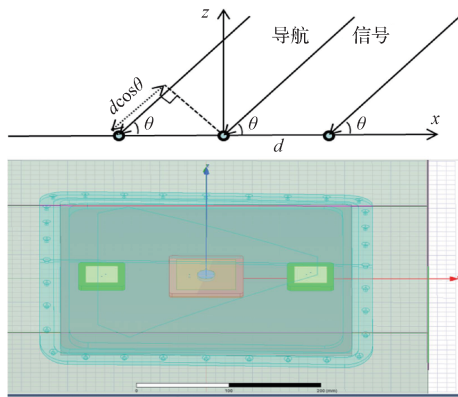


图 1 天线阵列 HFSS 模型

Fig. 1 Antenna array HFSS model

2 双极化原理

现代战场的电磁环境极为复杂, 外界的干扰源数目、来向、干扰样式都是未知的, 这给接收机抗干扰造成了很大的困难, 需要接收机有一定的冗余度和鲁棒性。由于卫星信号通常采用右旋圆极化方式, 所以接收天线也通常被设计为右旋

圆极化接收。轴比作为圆极化天线的重要参数, 用于表示圆极化的纯度, 一般要求圆极化天线的轴比不大于 3 dB^[17]。但在真实环境中信号的极化轴比存在恶化的情况, 尤其是在低仰角情况下, 圆极化天线的轴比通常较之法线方向大很多。绘制图 1 模型中阵元 1 和阵元 2 的方位角下轴比及接收增益的雷达图如图 2 和图 3 所示。可以观察到, 在低仰角时 (与法向 z 轴夹角 80°) 天线的轴比较高, 达到几十 dB, 而在高仰角时 (与法向 z 轴夹角 10°) 轴比相对较低, 满足圆极化天线要求。此外, 低仰角下轴比的恶化使得中心阵元和边缘阵元之间存在较大的差异。另外在接收增益的雷达图里可以看到, 高仰角下接收右旋圆极化信号的增益均匀, 而在低仰角下接收增益衰减, 且在不同方位角上存在最大达 7.2 dB 的差异。因此, 低仰角轴比的恶化可能会导致不同阵元接收信号的功率存在较大差异, 进而影响阵列的抗干扰算法^[18]。提升阵列的自由度, 增加冗余性可以尽量减轻这些情况的影响。

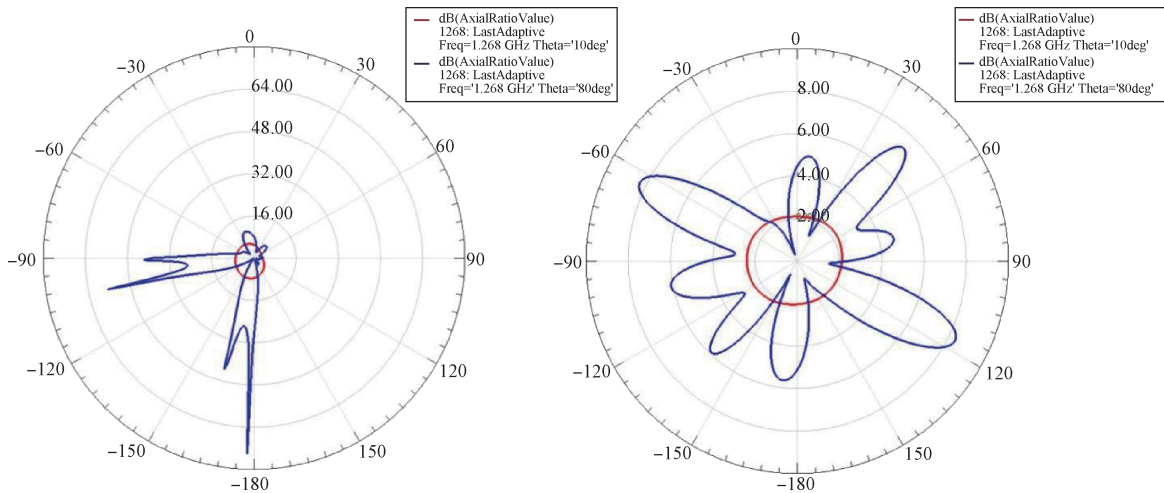


图 2 阵元 1 与阵元 2 的 HFSS 模型轴比

Fig. 2 The axial ratio of elements 1 and 2 in HFSS model

双极化天线是指一个单天线可以同时输出两路相互正交的极化信号, 极化信息允许在导向矢量的表示中引入额外的维度。传统的天线通常只考虑空间位置, 而双极化天线考虑了不同极化状态的信号, 使得导向矢量同时包含了空间位置和极化信息。双极化天线组成的阵列在空间导向矢量 a_s 外, 还具有极化导向矢量 a_p 。对于平面阵, 阵列接收信号的极化导向矢量为^[19]:

$$a_{p_i} = a_p(\theta_i, \varphi_i) = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_i & \cos \theta_i \cos \varphi_i \\ \cos \varphi_i & \cos \theta_i \sin \varphi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_i \\ \sin \gamma_i e^{j\eta_i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, γ_i 为第 i 个信号的极化相角, η_i 为第 i 个信号的极化相位差。双极化阵列的导向矢量表示为 $a_i = a_{p_i} \otimes a_{s_i}$, 即极化导向矢量和空间导向矢量的 Kronecker 积。以相互正交的左、右旋圆极化双极化天线为例, 对空间任一方向传播来的干扰信号, 假设左旋、右旋极化通道输出信号为 $e^{-j\phi_i} s_i(t)$ 和

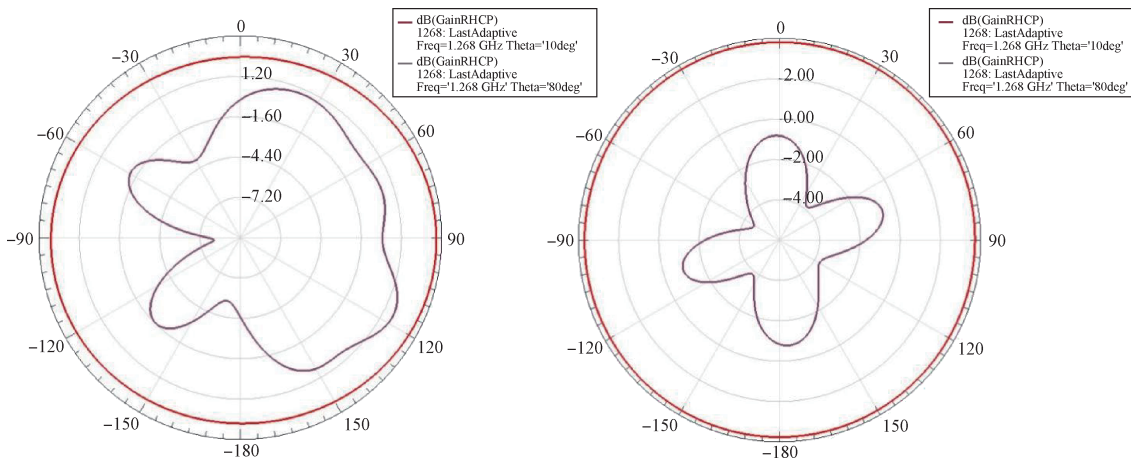


图3 阵元1与阵元2的HFSS模型接收增益

Fig. 3 The gain of elements 1 and 2 in HFSS model

$e^{-j\phi_n} s_i(t)$, 若干个天线组成双极化阵列, 每个极化状态就相当于一个独立的通道, 增加了可以处理的信号的数量, 信号路数变为阵元数目的两倍, 以其中一路为参考信号, 可以使用功率倒置算法进行空域滤波。由于双极化天线可以提供额外的信息, 它对抗干扰和多路径效应有更好的鲁棒性。通过同时利用不同极化信息, 系统可以更好地区分卫星信号和干扰, 从而提高定位和导航的准确性。

3 普通阵列与极化阵列仿真对比

利用 HFSS 模型获得导向矢量后, 通过 MATLAB 软件进行仿真。在仿真设置中, 天线等效热噪声功率为-101 dBm, 卫星信号到达阵面的功率为-130 dBm, 天线接收的 (1 268.52±10.23) MHz 射频信号经过接收通道的带通滤波、低噪声放大后, 送至下变频滤波模块得到(15±10.23) MHz 的中频信号, 以采样频率 62 MHz 进行采样。设置 4 个仰角方向(10°, 30°, 160°, 170°)的干扰, 干扰信号依次为两个干噪比 80 dB、带宽 16 MHz 的宽带干扰; 两个干噪比 90 dB、频点为 1 263.52 MHz 和 1 270.52 MHz 的单频干扰。

3.1 普通阵列仿真

所使用的阵列为图 1 所示的北斗 B3 频点 3 元均匀线阵, 阵元间距半波长。经天线阵列接收得到 3 路信号, 计算采样信号协方差矩阵并进行特征值分解得到(0.236, 0.051, 0.012), 可知 3 个特征值都较大, 表明干扰信号占用了 3 个自由度。使用基于功率倒置的 SMI 算法进行空域抗干扰处理, 得到阵列增益方向图和输出信号的功率谱如图 4 和图 5

所示。在超自由度干扰影响下, 3 阵元天线阵列的阵列增益方向图零陷没有对准 4 个方向的干扰, 而是在 50°和 130°方向有较浅的零陷。输出功率谱与接收信号形状相似, 两个单频可以在 10 MHz 上看到, 未能有效抑制干扰。计算显示干扰信号的输出功率仍在-25 dBm 上下, 即使经阵列天线处理后依旧高出热噪声 75 dB, 输出信干噪比-103 dB, 接收机无法有效定位。在超自由度干扰状态下, 普通阵列接收机不能有效抑制干扰。

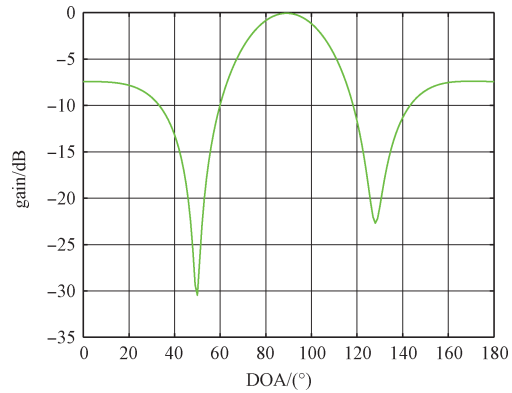


图4 普通阵列响应方向图

Fig. 4 Pattern of ordinary array response

3.2 双极化阵列仿真

对于图 1 中的阵列模型, 可以采用双极化阵列, 在不改变阵列形状、尺寸和阵元数目的情况下, 通过两个馈点的上电使得每个阵元可以同时具有左旋和右旋圆极化的激励状态。每个阵元有两路信号, 3 元双极化线阵存在 6 维导向矢量, 通过 HFSS 仿真阵面的相位信息得到导向矢量进行仿真。计算采样信号协方差矩阵的特征值分解可以

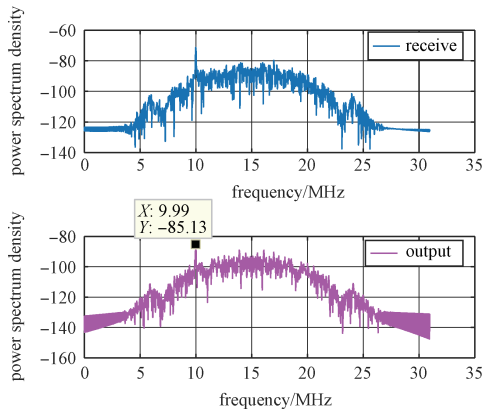


图 5 普通阵列输出信号功率谱

Fig. 5 Output signal power spectrum of ordinary array

得到6个特征值(1.18, 0.95, 0.04, 0.01, 8.4E-11, 7.7E-11), 其中存在4个大特征值。使用基于功率倒置的 SMI 算法进行空域抗干扰处理, 得到阵列增益方向图和输出信号的功率谱如图 6 和图 7 所示。在双极化阵列响应方向图上可以明显观察到 4 个干扰方向的零陷, 零陷深度均在 -110 dB 以上, 准确对准了干扰源并且深度较大。观察输出信号功率谱, 宽带干扰与单频干扰均被有效抑制。计算得到干扰信号的输出干噪比达到了 -26 dB, 即使在干扰数目高于阵元数目的情况下, 双极化阵列仍然能够有效抑制干扰, 使其能量降至噪声电平之下。面对相同的干扰场景, 双极化阵列相比于普通阵列表现出更为优越的干扰抑制效果。因此, 双极化阵列在抑制超自由度干扰方面具备良好的性能。

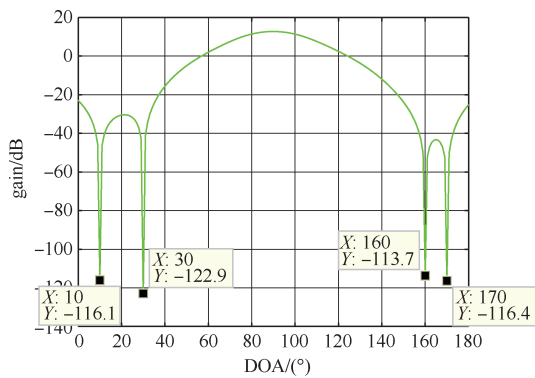


图 6 双极化阵列响应方向图

Fig. 6 Pattern of dual-polarization array response

4 普通阵列与极化阵列暗室实测

为了验证仿真结论的真实性, 在暗室环境中搭建实验平台进行数据采集, 实验环境如图 8 所

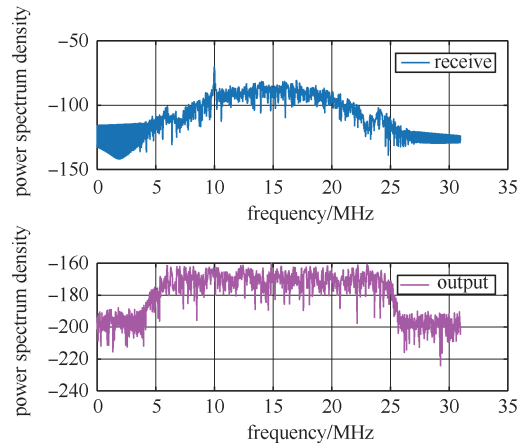


图 7 双极化阵列输出信号功率谱

Fig. 7 Output signal power spectrum of dual-polarization array

示。接收天线阵列前端经过放大、混频、滤波后, 使用 ADC 对信号进行采样, 得到采集数据后在 MATLAB 中进行信号处理, 快拍数为 2 048。接收链路增益为 20 dB, 在未加干扰时得到采样信号的噪声功率为 -80 dBm。施加(10°, 0°)、(15°, 60°)、(10°, 150°)、(15°, 240°)四个方向的干扰, 干扰样式为两个 20 MHz 的 BPSK 宽带干扰、两个单频干扰(1 266.52 MHz 和 1 270.52 MHz), 干噪比均为 45 dB。

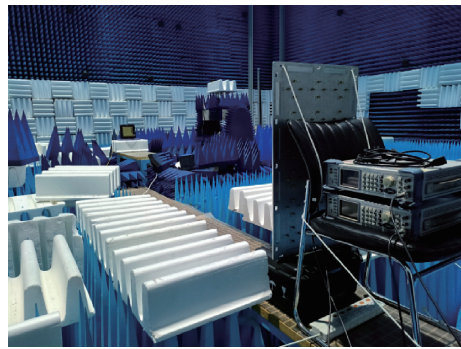


图 8 暗室测试环境

Fig. 8 Test scenario in darkroom

4.1 普通阵列暗室实测

普通 4 阵元方阵对混频采样获得的 15.52 MHz 数字中频信号进行正交下变频 IQ 分离, 将有效频谱搬移到基带, 并经过数字低通滤波器滤除带外信号。此时计算接收信号协方差矩阵得到 4 个特征值(9.2E-4, 2.1E-4, 3.9E-5, 1.9E-5)。各路采集信号功率为 -35 dBm, 经过 SMI 功率倒置算法处理得到输出信号功率为 -44 dBm, 输出干噪比为 36 dB, 输出信

干噪比为 -61 dB, 接收机无法定位。下变频后基频信号和输出信号功率谱密度如图9所示, 可以观察到 20 MHz的BPSK宽带干扰没被抑制干净, $1\ 266.52$ MHz和 $1\ 270.52$ MHz的双频干扰也没有被抑制。

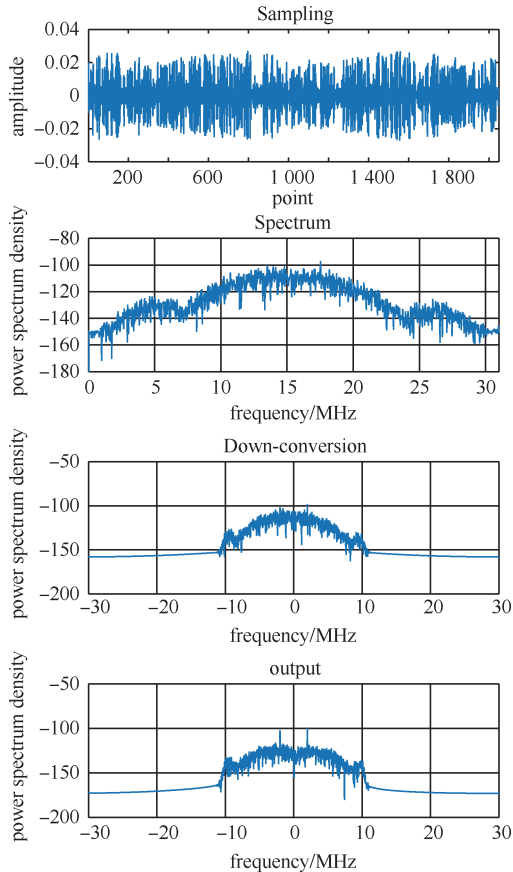


图9 实测4阵元阵列功率谱

Fig. 9 Power spectrum of 4-array

4.2 双极化阵列暗室实测

实测双极化4阵元方阵是由1个主阵元和3对正交左旋、右旋圆极化阵元组成的, 天线接收信号得到7路采样信号。计算接收信号协方差矩阵得到7个特征值($1.1\text{E-}3$, $7.2\text{E-}4$, $2.2\text{E-}4$, $8.3\text{E-}5$, $6.1\text{E-}6$, $3.4\text{E-}6$, $1.4\text{E-}7$), 接收机各路采集信号功率依旧为 -35 dBm, 经过SMI功率倒置算法处理得到输出信号功率为 -77 dBm, 输出干噪比为 3 dB, 输出信号干噪比为 -29 dB。下变频后基频信号和输出信号功率谱如图10所示, 可以看到干扰信号均被成功滤除。同为4阵元的双极化阵列与普通阵列的暗室实测对比验证了第三节仿真得到的结论, 即双极化接收机能抑制超阵元自由度的干扰。

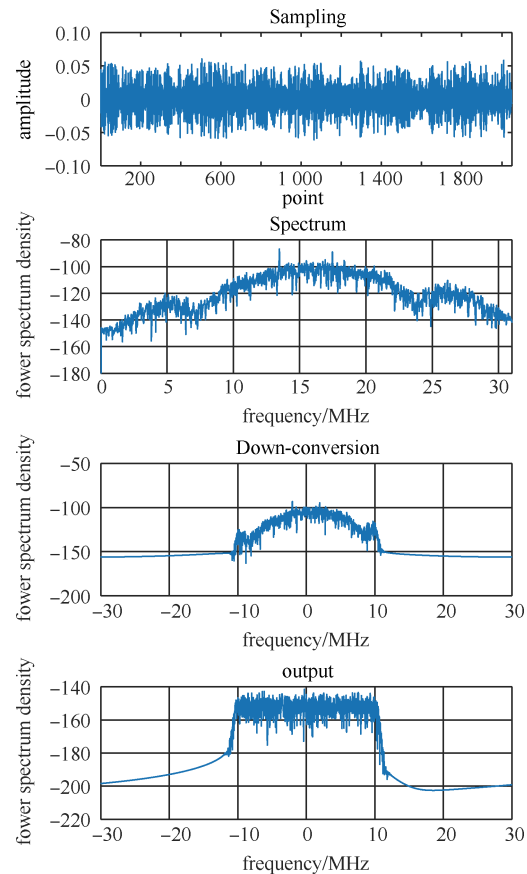


图10 实测4阵元双极化阵列功率谱

Fig. 10 Power spectrum of Dual-polarization 4-array

5 外场收星定位试验

外场收星试验测试环境如图11所示。首先在静态状态下, 对普通和双极化阵列施加4个干信比为 60 dB(干噪比为 30 dB)的 20 MHz带宽BPSK宽带干扰, 干扰仰角皆为 10° , 方位角为(0° , 120° , 240° , 300°)。随后启动B3I定位模式, 正常收星捕获 10 s。在 10 s处施加干扰, 收星情况如图12所示。对于试验用普通阵列, 常态工作时可以接收 20 颗星, 但在施加干扰后星况迅速恶劣, 最终卫星信号失锁, 可用星数归零, 无法完成定位。而双极化阵列正常收星捕获 14 颗北斗卫星, 施加干扰后, 虽然可用星数短暂下降, 卫星载噪比降低, 但几秒后恢复较多可用星数, 成功排除干扰影响。由此可见, 双极化天线在抑制超自由度干扰方面具有显著的优势。

在抗干扰测试中, 将天线阵列放置在转台上, 以旋转状态进行测试, 进一步评估天线阵列对空间不同方向干扰的抑制能力, 并从侧面反映低仰



图 11 测试环境
Fig. 11 Test scenario

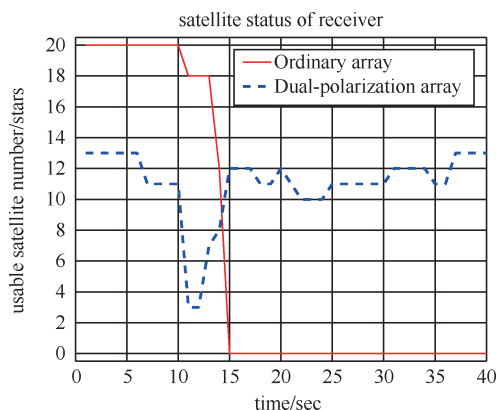


图 12 超自由度干扰下接收机收星情况

Fig. 12 Receiving stars under super-degree-of-freedom jamming

角下的轴比恶化对阵列性能的影响。在测试中, 天线阵列一直处于干扰影响下, 转台旋转速度为 $2 (^{\circ})/s$, 经过 180 s 旋转一周, 记录了每秒的数据进行对比分析。以下是对比测试不同干扰情况下的定位率:

- ① 单个干信比为 95 dB 的宽带干扰;
- ② 三个干信比为 80 dB 的宽带干扰;
- ③ 四个宽带干扰;
- ④ 六个宽带干扰。

所有干扰皆为 20 MHz、BPSK 调制的右旋圆极化, 测试结果见表 1。

在对于 1 个 95 dB 干信比的宽带干扰的测试中,

表 1 低仰角干扰下接收机定位率

Table 1 Positioning rate at low-elevation jamming

干扰数目	宽带干信比	普通定位率	宽带干信比	双极化定位率
1	95 dB	96.53%	95 dB	100%
3	80 dB	30.91%	80 dB	85.47%
4	50 dB	7.22%	70 dB	87.08%
6	50 dB	0%	52 dB	87.15%

两接收机均展现出接近 100% 的定位率。在面对 3 个 80 dB 干信比的宽带干扰时, 虽然干扰数目小于阵列自由度, 但由于干扰功率较高且干扰方向为低仰角, 普通阵列定位率较差; 而双极化阵列有较强的鲁棒性, 定位率远高于普通阵列。当面对 4 个宽带干扰时, 普通 4 阵元阵列的自由度被超出, 即便是仅施加 50 dB 干信比的宽带干扰, 也只有个位数的定位率; 而双极化阵列利用极化信息增加信号处理维度, 其自由度也随之提升, 成功抑制 70 dB 干信比的宽带干扰。最后在面对 6 个宽带干扰的情况下, 对普通阵列施加 50 dB 干信比时定位率为 0; 而双极化阵列在面对 6 个 50 dB 的宽带干扰时仍然能够有效抑制, 定位率 100%; 当增加到 52 dB 后, 定位率降至 87.15%。所以双极化阵列天线能增加阵列的自由度, 具备较大的冗余性和较强的鲁棒性。

6 结束语

本文主要研究双极化阵列在抵御复杂环境和超自由度干扰的效果, 通过理论分析了信号的接收模型以及双极化阵列原理, 在 HFSS 中搭建天线模型进行有限元仿真以获取阵列导向矢量和天线轴比等参数。然后通过对比仿真和实测试验的结果, 详细说明了在超自由度干扰场景下, 传统阵列无法有效抑制干扰, 而双极化阵列可以在相同的干扰场景下完成定位, 而且其天线尺寸相较于传统阵列保持不变。最后, 通过进行外场干扰试验, 验证了双极化阵列抗超自由度干扰的能力, 实验结果表明, 双极化阵列对于超自由度干扰的抑制效果显著, 并且在面对低仰角干扰时表现出更好的鲁棒性。这些发现为双极化阵列在导航和定位系统中的应用提供了实质性的支持和指导。

参考文献

[1] 刘基余. 卫星导航及其在航天遥测中的应用[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 1-13,17.
LIU Jiyu. Satellite navigation and its application in spacecraft telemetry[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(6): 1-13,17.

[2] 云超, 谭志强, 崔建勇, 等. 导航战能力体系建设与发展建议[J/OL]. 现代防御技术, 2023: 1-10[2023-12-15].
YUN Chao, TAN Zhiqiang, CUI Jianyong, et al. Navigational warfare capacity system construction and develop-

- ment proposals[J/OL]. *Modern Defence Technology*, 2023: 1-10[2023-12-15].
- [3] 张启福, 徐世成, 王章, 等. 基于“导航战”的北斗卫星定位抗干扰策略[J]. *导航定位学报*, 2023, 11(1): 24-29.
ZHANG Qifu, XU Shicheng, WANG Zhang, et al. Anti-jamming strategy of BeiDou satellite positioning based on navigation warfare[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2023, 11(1): 24-29.
- [4] 李成城, 李鹏程. 卫星导航自适应调零天线抗干扰技术[J]. *电子信息对抗技术*, 2020, 35(6): 59-63.
LI Chengcheng, LI Pengcheng. Anti-jamming technology of adaptive nulling antenna of satellite navigation[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2020, 35(6): 59-63.
- [5] 刘富, 舒展, 谢维华. 卫星导航对抗能力现状及发展趋势[J]. *导航定位学报*, 2020, 8(6): 1-5,13.
LIU Fu, SHU Zhan, XIE Weihua. Status and development trends of satellite navigation countermeasure capability[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2020, 8(6): 1-5, 13.
- [6] 李达, 贺宁蓉, 王永芳, 等. GPS卫星接收机的自适应抗干扰处理器设计[J]. *遥测遥控*, 2009, 30(3): 17-21.
- [7] 邓卓林, 尹文禄, 杜奋, 等. 宽轴比波束双频带北斗导航天线设计[J/OL]. *中国舰船研究*, 2023: 1-8[2023-12-26].
DENG Zhuolin, YIN Wenlu, DU Fen, et al. Design of double band BeiDou navigation antenna with wide axial ratio beam[J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023: 1-8[2023-12-26].
- [8] 张艳梅, 李峰, 吴婵娟. 一种新型双线极化BD2 B3抗干扰天线设计[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(4): 82-86.
ZHANG Yanmei, LI Feng, WU Chanjuan. A new design of dual-linear polarization anti-jamming antenna element for BD2 B3[J]. *Navigation Positioning Timing*, 2017, 4(4): 82-86.
- [9] 刘玲, 曾浩, 刘陆军, 等. 调零天线中的空域极化域联合抗干扰算法[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(4): 146-151.
LIU Ling, ZENG Hao, LIU Lujun, et al. The new anti-jam algorithm for nulling antenna in space and polarization domains[J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(4): 146-151.
- [10] 王晓飞, 刘佳琪, 韩闯, 等. 基于极化敏感阵列的导航抗干扰方法[J]. *导弹与航天运载技术*, 2017(2): 50-52, 86.
WANG Xiaofei, LIU Jiaqi, HAN Chuang, et al. Anti-jamming method based on dual-polarized antenna array[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2017(2): 50-52,86.
- [11] 乐恒志, 李树洲, 李井源, 等. 基于双极化天线的卫星导航接收机抗干扰技术[J]. *无线电工程*, 2018, 48(8): 684-689.
LE Hengzhi, LI Shuzhou, LI Jingyuan, et al. Anti-interference technology of satellite navigation receiver based on dual-polarized antenna[J]. *Radio Engineering*, 2018, 48(8): 684-689.
- [12] 杨美娟, 李肖, 郑娇, 等. 基于极化敏感阵列的空频域导航抗干扰方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2019, 39(1): 135-138.
YANG Meijuan, LI Xiao, ZHENG Jiao, et al. Anti-jamming method of space-frequency domain based on polarization sensitive array[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(1): 135-138.
- [13] 金鸣, 吕婷婷, 周曼丽, 等. 基于LCMV准则的空时极化联合抗干扰算法[J]. *无线电工程*, 2022, 52(8): 1434-1440.
JIN Ming, LYU Tingting, ZHOU Manli, et al. Joint anti-jamming algorithm for space-time polarization based on LCMV criterion[J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(8): 1434-1440.
- [14] 赵晓博, 郝绒华, 白雪飞. 基于小孔径阵列天线的卫星导航多干扰抑制方法[J]. *无线电工程*, 2023, 53(7): 1629-1638.
ZHAO Xiaobo, HAO Ronghua, BAI Xuefei. Multiple interference suppression method for satellite navigation based on small aperture array antennas[J]. *Radio Engineering*, 2023, 53(7): 1629-1638.
- [15] 梁嘉棋, 刘宏波, 李悦, 等. 针对高功率脉冲干扰的改进功率倒置算法[J]. *电子信息对抗技术*, 2023, 38(5): 45-52.
LING Jiaqi, LIU Hongbo, LI Yu, et al. Improved power-inversion algorithm for high power pulse jamming[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2023, 38(5): 45-52.
- [16] 李明洋, 刘敏. HFSS天线设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [17] 宋道军, 齐照辉, 尹应增. 一种宽带小型化的双圆极化天线设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2023, 21(10): 1244-1246,1270.

- SONG Daojun, QI Zhaohui, YIN Yingzeng. A broadband and miniaturized dual circularly polarized antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(10): 1244-1246, 1270.
- [18] 武智佳, 于合理, 焦海松, 等. 卫星导航用户终端多阵元抗干扰天线空间特性分析与研究[J]. 无线电工程, 2023, 53(4): 853-859.
- WU Zhijia, YU Heli, JIAO Haisong, et al. Analysis and research on spatial characteristics of multi-element anti-jamming antenna for satellite navigation user terminal[J]. Radio Engineering, 2023, 53(4): 853-859.
- [19] 徐友根, 刘志文, 龚晓峰. 极化敏感阵列信号处理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- [作者简介]
- 郭华秋 1998年生, 硕士研究生。
孙 迅 1974年生, 硕士, 研究员。
马忠志 1983年生, 硕士, 高级工程师。
李 达 1978年生, 硕士, 研究员。
刘 红 1987年生, 硕士, 工程师。
- (本文编辑: 杨秀丽)