

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108208

三角格栅排列相控阵天线近场特性研究

成伟兰¹ 刘坚强¹ 吴小川² 赵炳秋¹

(1.海军研究院 上海 200235; 2.哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 为了掌握相控阵天线近场辐射特点,根据波束形成原理,提出了三角格栅相控阵天线辐射近场的数学模型,并进行了仿真验证。计算结果与仿真结果相比,相控阵天线主波束上场强幅度最大偏差约1 dB,吻合较好。利用该模型对相控阵天线的电场近场分布特点进行了分析。在近场未形成主波束的区域,波束存在多个波峰和波谷;该区域内法线上场强出现极大值时发射方向在指向各观察点的方向附近徘徊。随着距离增大,波峰和波谷聚拢,波束宽度逐渐收窄;发射方向的徘徊区间慢慢变小,形成主波束后发射方向与实际波束指向一致。所得结论同样适用于矩形格栅相控阵天线。研究结果为相控阵天线的电磁兼容设计、辐射近场测量提供了理论依据和指导。

关键词: 相控阵天线;三角格栅;电场强度;测量;近场;分布

中图分类号: TN821.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Near field characteristics of phased arrays with triangular grid

Cheng Weilan¹ Liu Jianqiang¹ Wu Xiaochuan² Zhao Bingqiu¹

(1. Naval Research Academy, Shanghai 200235, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to find out the near-field radiation characteristics of phased arrays, the near field mathematical model for triangular grid arrays is established according to the beam forming principle. The simulation is carried out to verify the model. It shows that the calculation is in good agreement with the simulation because the maximum deviation for the near field intensity from phased arrays is about 1 dB on the main beam. Then the model is used to analyze the near field distribution characteristics of phased array. In the region where the main beam is not formed in the near field, the beam shape has a few peaks and troughs. The transmission direction hovers near the direction pointing to each observation point when the field intensity on the normal line in the region reaches maximum value. The peaks and troughs converge and the beam width gradually narrows as the distance increasing. Also the hovering ranges of the transmission direction decreases slowly and finally it is consistent with the actual beam direction after the main beam is formed. The conclusion is also available for the rectangular grid phased arrays. The research provides a theoretical basis and guidance for electromagnetic compatibility design of systems and radiation near-field measurement for phased arrays.

Keywords: phased arrays; triangular grid; electric field intensity; measurement; near field; distribution

0 引言

相控阵天线具有波束扫描迅速、作用距离远等特点,应用越来越广泛,武器装备配置相控阵天线已经成为趋势。另一方面,武器装备上天线众多,携带各种军械,空间有限,军械、邻近接收天线和人员活动区处于相控阵发射天线的近场区域。相关标准^[1-2]要求开展电磁辐射危害评估,但没有针对相控阵天线近场测量方法提供指导。因此需要研究和掌握相控阵天线的辐射近场分布特性,为相控阵天线辐

射近场的测量提供支撑,以便评估电磁辐射对军械、人员危害,分析天线间干扰。

目前,阵列天线近场研究工作大多针对 RFID (radio frequency identification)^[3]、低频段的麦克风^[4-5]和声呐^[6-7]领域,主要集中在采用各种方法对近场波束形状进行设计。在超声检测领域,相控阵也得到了广泛应用^[8]。对于微波段相控阵天线,日前大多研究近场测量以进行幅相校准、实现远场波束形成^[9-10],或进行空域滤波^[11-12];在微波阵面天线的性能设计与监测也有许多研究^[13-16]。

在微波段相控阵天线的近场分析方面,针对矩形格栅相控阵天线,王侃等^[17]提出了近场电磁环境分析方法。本文以广泛应用的三角格栅为例,建立大型相控阵天线近场数学模型,对近场波束特征、近场场强分布特点进行研究,为相控阵天线近场测量与装备电磁兼容设计提供支撑。

1 三角格栅相控阵天线辐射场数学模型

设发射阵面为平面阵,原点 O 置于阵面中心,如图 1 所示, $M \times 2N$ 个半波对称阵子按三角格栅排列成 M 行 $2N$ 列,相邻垂直列错开半个列间距。观察点 P 位于阵外近场区,坐标为 (r, φ, θ) , r 为观察点 P 到发射阵面中心的距离, φ 为发射阵面中心指向观察点 P 的水平角, θ 为发射阵面中心指向观察点 P 的仰角。

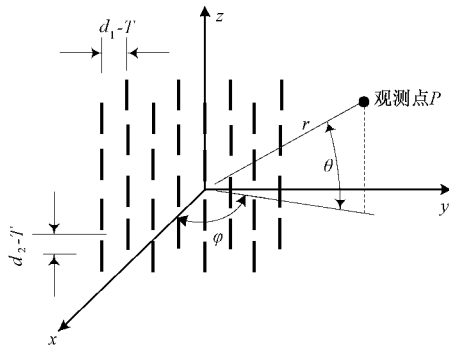


图 1 三角格栅平面及建立的球坐标

考虑观察点 P 处的辐射电场场强。发射阵面可以看成两个按矩形格阵排列的平面阵组成。根据电场叠加理论,观察点 P 处的总场强 E 是两个矩形格阵的辐射场之和。

$$E = E_1 + E_2 \tag{1}$$

式中: E_1 、 E_2 分别为两个矩形格阵阵面在观察点 P 处形成的场强。

均匀发射时阵元互耦对主波束形状没有影响^[18],因此不考虑阵元互耦,两矩形阵面阵元上的电流激励振幅一致,用 I 表示。各发射阵元的辐射比例常数一致,设为 K 。通常同一阵面阵元的方向性函数相同,所以有:

$$E_1 = KI \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{F_1(m, n)}{r_{mn_1}} e^{-j(\Delta\alpha_{mn_1} + \frac{2\pi}{c} f_T r_{mn_1})} \tag{2}$$

$$E_2 = KI \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{F_2(m, n)}{r_{mn_2}} e^{-j(\Delta\alpha_{mn_2} + \frac{2\pi}{c} f_T r_{mn_2})} \tag{3}$$

式中: $F_1(m, n)$ 、 $F_2(m, n)$ 分别为第 1、2 阵面第 (m, n) 个发射阵元指向观察点 P 时的方向性系数; r_{mn_1} 、 r_{mn_2} 分别为第 1、2 阵面第 (m, n) 个发射阵元与观察点 P 间的距离; $\Delta\alpha_{mn_1}$ 、 $\Delta\alpha_{mn_2}$ 分别为第 1、2 阵面第 (m, n) 个发射阵元与各自第 $(0, 0)$ 个参考阵元激励电流间的相位差; f_T 为发射频率; c 为光速。

上述模型中, $\Delta\alpha_{mn_1}$ 和 $\Delta\alpha_{mn_2}$ 可通过假设每个发射阵元均得到了理想馈相从而计算获得; 发射阵元的辐射比例常数 K 可以根据远场理论求得:

$$K = \frac{\sqrt{30P_T G_T}}{2MNI} \tag{4}$$

式中: P_T 为发射功率(W), G_T 为相控阵阵面增益。

2 相控阵近场计算方法验证和场强分布分析

2.1 相控阵阵面参数

待分析研究的相控阵阵面由 40×80 个半波对称阵子按三角格栅排列而成,中心馈电, $d_{1T} = 0.25\lambda_T$, $d_{2T} = 0.25\lambda_T$; λ_T 为发射频率对应的波长; 发射频率取 10 GHz。

2.2 近场数学模型验证

为确保近场场强分布的计算分析结果的正确性,采用矩量法(method of moments, MoM)对该大型平面阵进行仿真实验。该大型平面阵法向发射时,法线上的场强计算结果和仿真结果如图 2 所示,最大偏差发生在场强最大处 ($r = 4$ m), 小于 1 dB, 这是因为计算时采用的阵元与仿真的阵元方向图存在区别。可见,理论计算结果与仿真结果基本一致,近场数学模型可用。

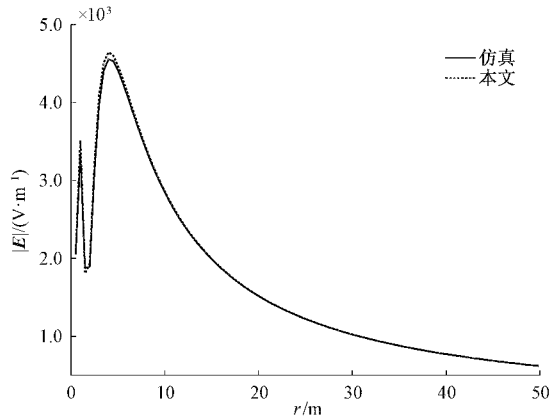


图 2 法线上近场场强计算与仿真结果对比

3 相控阵天线近场场强分布特点

3.1 定向发射下的近场场强分布

相控阵阵面发射时近场上不同距离的场强分布不同。该阵面法向发射时,在距阵面中心分别为 1.5、4、100 m 处的波束形状分别如图 3(a)~(c) 所示。可知,在近场,距离越远,能量越集中,距离越近,能量越分散,但是即使主波束尚未形成,能量也是主要集中在发射方向附近,例如图 3(a) 和 (b) 所示。

利用图 3(a) 可以解释图 2 中在 $r < 4$ m 的法线区间上场强振荡变化的原因。法线上 $r = 1.5$ m 位置处于波束的波谷,如图 3(a) 所示,因此图 2 中该位置场强为极小值,据此可推断,图 2 中场强出现极大值的位置处于波束的波峰。因此场强振荡的原因是在未形成主波束的区域波束存在波峰和波谷,且波峰和波谷的位置随着距离变化而变化。

波束形状随距离变化的演变细节如图 4(a)~(d) 所示。法向发射时法线上 $r = 1.5$ m 处场强位于波束顶部的

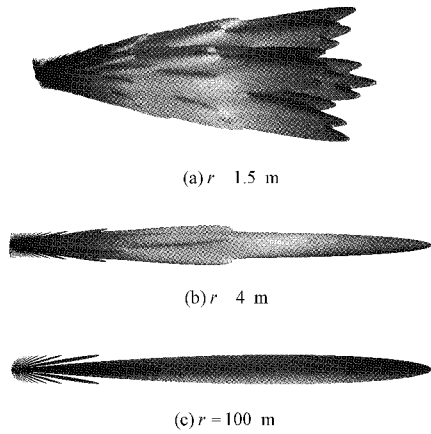
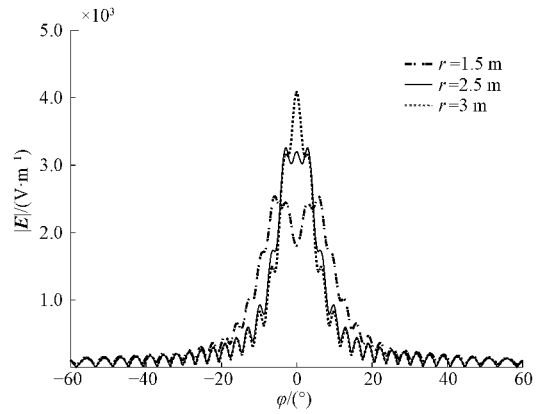


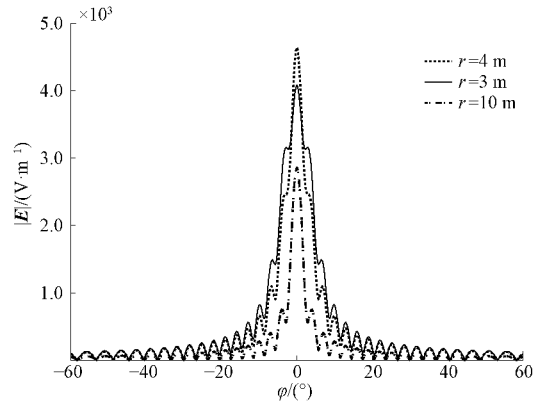
图3 法向方向发射时的近场波束形状

波谷,附近有多个波峰;随着 r 逐渐增大,这些波峰逐渐靠拢、融合,发射方向上的场强逐渐增大,在 $r=2.5$ m时可以看出发射方向上出现了新的波峰,在 $r=3$ m时形成主波束,在 $r=4$ m时主波束场强达到最大,然后随着距离增大场强单调下降。

综合由图3和4可知,在近场随着观测距离增大,能量越来越集中,波束形状不断伸长,波束宽度不断收缩,形成主波束后继续收窄。当满足远场条件后,波束形状趋于稳定,不再变化。 $r=4, 10, 100, 1\ 000$ m下的波束宽度如图5所示,可见近场 $r=4$ m下波束宽度最宽, $r=10$ m时

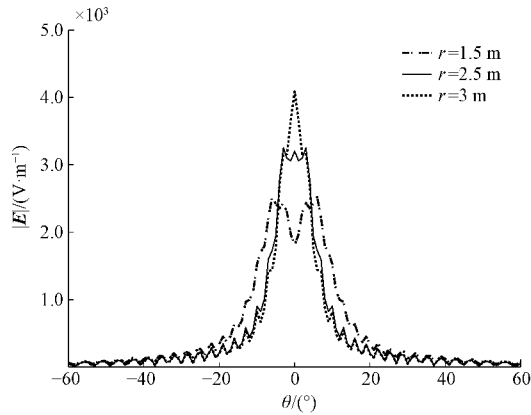


(c) 水平面上距离1.5、2.5、3 m处场强

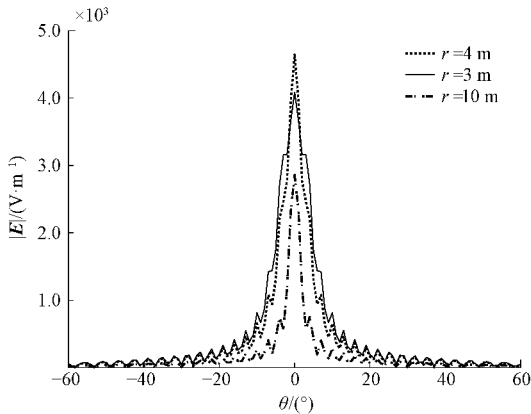


(d) 水平面上距离3、4、10 m处场强

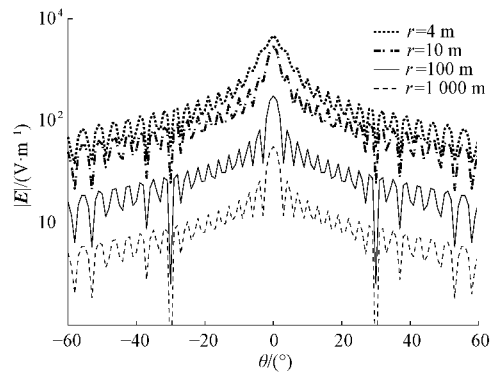
图4 法向方向发射下的近场场强分布情况



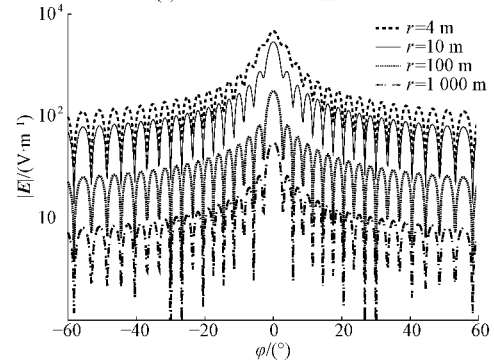
(a) 垂直面上距离1.5、2.5、3 m处场强



(b) 垂直面上距离3、4、10 m处场强



(a) 垂直面上的波束宽度比较



(b) 水平面上的波束宽度比较

图5 不同距离下的波束宽度比较

次之,远场条件下($r=100,1\ 000\text{ m}$)波束宽度相同且最窄。近场的波束宽度大于远场波束。

3.2 扫描发射时近场固定场点的场强变化分析

设相控阵天线水平发射方向、垂直发射方向分别用 φ_0 、 θ_0 表示。该相控阵天线分别在 $\varphi_0=0^\circ$ 和 $\theta_0=6^\circ$ 的平面上扫描发射时,观察点 $P(1.5\text{ m},0^\circ,6^\circ)$ 处的场强变化情况如图 6 所示,可见在近场振荡区,阵面向观察点方向发射时该点的场强并非最大,但场强较大值主要发生在观察点附近。

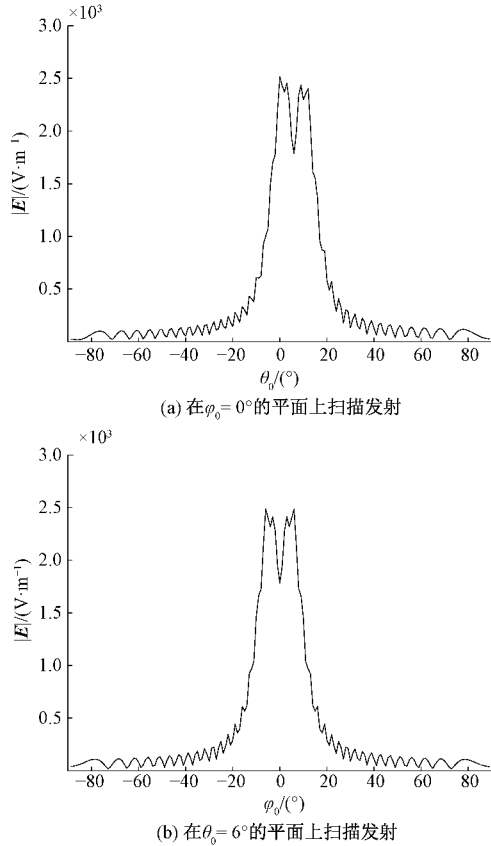


图 6 观察点 $P(1.5\text{ m},0^\circ,6^\circ)$ 处的场强变化

为此考察近场振荡区的固定场点位置场强出现极大值时的发射方向。该相控阵天线在 $\varphi_0=0^\circ$ 主平面上扫描、法线上不同距离处出现场强极大值时的发射仰角 θ_0 如

图 7(a)所示。该相控阵天线在 $\theta_0=0^\circ$ 主平面上扫描发射,法线上不同距离处出现场强极大值时的发射方位角 φ_0 如图 7(b)所示。可知,随着 r 增大,观察点场强最大时的发射方向不断在指向该场点的方向附近徘徊,并逐渐趋于指向观察点,即实际波束指向与发射方向趋于一致。因此,如果需要使近场振荡区的观察点处场强最大,例如装备工程试验,则需要计算所有发射方向。

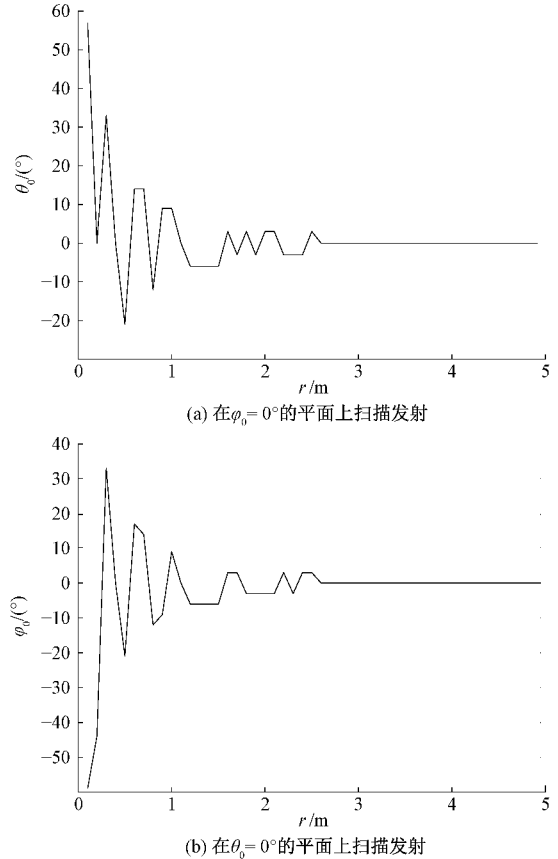


图 7 法线上场强出现极大值时的发射方向

3.3 近场场强分布特点

根据上述分析结果,相控阵天线的近场按照是否形成主波束,可以分为振荡区和非振荡区,振荡区指尚未形成主波束的区域,反之为非振荡区。各区的特点如表 1 所示。

表 1 相控阵天线近场分布特点

要素	振荡区	非振荡区	共性
能量分布	能量比较分散,但主要还是集中在发射方向附近	能量比较集中,发射方向上最大	距离越远,能量越集中
波束形状	波束头部上存在多个波峰和波谷,没有主瓣,随着距离增大,波峰和波谷聚拢	在发射方向有主瓣	—
波束宽度	波束宽度较大,随着距离增大而变小	波束宽度逐渐变小	距离越远,波束越窄,但大于远场波束宽度
观察点场强出现极大值时的发射方向	在指向该场点的方向附近徘徊,随着距离增大,徘徊区间逐渐变小	指向该场点	—

4 结 论

本文针对三角格栅排列的大型相控阵天线,建立了辐射近场的数学模型,分析了大型相控阵天线电场近场分布特点和波束变化规律,所得结论可用于装备电磁兼容设计,例如评估近场区域内的邻近天线、军械、人员活动区域布置位置是否符合相关标准要求,或为测量相控阵天线辐射近场提供指导。

根据近场波束特性分析,在装备相控阵天线电磁环境测试中,对于军械和邻近天线安装部位等关注位置,将发射方向设为指向关注位置方向有可能得到错误结果。应首先分析关注位置是否处于振荡区,如果处于振荡区,建议再通过近场扫描下的计算找出发射方向,以确保测量时关注位置上电磁环境最大。

研究结果为相控阵天线的电磁兼容设计、电磁环境试验提供了理论依据和指导。

参考文献

- [1] 中央军委装备发展部. 系统电磁环境效应试验方法: GJB 8848-2016[S]. 北京: 国家军用标准发行行部, 2016: 83-88.
- [2] 中央军委装备发展部. 电磁辐射暴露限值和测量方法: GJB 5313A-2017[S]. 北京: 国家军用标准发行行部, 2017: 1-4.
- [3] CHOU H T, HUNG T M, WANG N N, et al. Design of a near-field focused reflectarray antenna for 2.4 GHz RFID reader applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(3): 1013-1018.
- [4] CHEN H W, BAO Y, SER W. Effects of sensor position errors on farfield/nearfield wideband beamformers for microphone arrays[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4812-4825.
- [5] HUANG G, BENESTY J, CHEN J D, et al. Robust and steerable kronecker product differential beamforming with rectangular microphone arrays[C]. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP), IEEE, 2020: 211-215.
- [6] BLOMBERG A E A, AUSTENG A, HANSEN R E. Adaptive beamforming applied to a cylindrical sonar array using an interpolated array transformation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 37(1): 25-34.
- [7] KOKILA R, CHITHRA K, DHILSHA R. Wideband beamforming using modified farrow structure FIR filtering method for sonar applications[C]. International Symposium on Ocean Technology (SYMPOI.), IEEE, 2019: 21-28.
- [8] 黄海鸿, 刘文杰, 钱正春, 等. 零件表面损伤对再制造修复件承载能力影响的超声相控阵检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 32-41.
- [9] LONG R, OUYANG J, YANG F, et al. Calibration method of phased array based on near-field measurement system[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE, 2014: 1161-1162.
- [10] SCHUSS J, STIKINA T, HILLIARD J, et al. Large scale phased array calibration [C]. International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST), IEEE, 2016: 1-2.
- [11] LI W X, YANG H. A novel algorithm for null broadending beamforming based on subspace projection and virtual antenna array[C]. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), IEEE, 2017: 1-2.
- [12] XIAO X, LU Y L. Data-based model for wide nulling problem in adaptive digital beamforming antenna array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(11): 2249-2253.
- [13] 方红梅, 宋志国, 谢永鹏, 等. 大型非周期相控阵天线协同设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 1-6.
- [14] 杜欣, 孙运强, 杨瑞. 圆形相控阵波束形成及干扰抑制[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(11): 52-56.
- [15] 林存银, 周以国, 李仲林. X波段宽带 Vivaldi 相控阵天线的设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8): 19-23.
- [16] 刘德荣, 周金柱, 王梅, 等. 基于 POD-RLS-KF 的有源相控阵天线温度场实时重构[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 38-49.
- [17] 王侃, 朱瑞平. 相控阵天线的电磁环境分析[J]. 电子学报, 2012, 40(3): 571-574.
- [18] 张玉, 胡进. 考虑互耦的平面相控阵天线波束形成[J]. 现代雷达, 2012, 34(9): 69-71, 75.

作者简介

成伟兰, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备电磁兼容性论证、控制、试验、评估等工作等。

E-mail: horsezebra@sina.com