

基于子阵级非周期的有限扫描阵列研究

朱小奇, 赵 波, 陈 剑, 史永康
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 对基于子阵级非周期的有限扫描阵列进行研究, 采用数值仿真和遗传算法对基于不同子阵规模的非周期阵列进行优化设计, 分析 4×4 和 2×2 两种子阵规模对接收多波束应用中伴随波束方向图的影响, 研究表明子阵规模过大会引起伴随波束方向图的旁瓣抬升, 通过减小子阵规模可以避免该问题, 论证了设计的基于 2×2 子阵的非周期八角阵可应用于有限视场扫描相控阵中。

关键词: 子阵; 非周期阵列; 有限扫描阵列

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)05-0006-05

Study on aperiodic limited scan array consisting of sub-arrays

ZHU Xiaoqi, ZHAO Bo, CHEN Jian, SHI Yongkang

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper presents the study on aperiodic limited scan array (LSA) consisting of sub-arrays. Both numerical simulation and genetic algorithm are employed to achieve the optimal configuration of aperiodic arrays. In multi-beam scenarios, the effect of sub-array size on the patterns of adjoint beams has been investigated by analyzing the performance of sub-arrays consisting of 4×4 and 2×2 elements respectively. It is revealed that a large sub-array size will result in unexpected deterioration of the side-lobe level. In view of this issue, a smaller sub-array size is preferred to its counterparts. Furthermore, an octagonal aperiodic array is proposed, and it is demonstrated that this array can be well applied in phased arrays with limited field of view.

Key words: Sub-array; Aperiodic array; Limited scan array

引 言

随着测控技术的飞速发展, 测控系统对相控阵天线的要求越来越高。相控阵天线的增益决定了系统的工作距离, 而阵列天线的增益主要取决于天线单元增益和单元数量。提高天线阵列增益最普遍的方法是增加天线单元数量, 然而该方法会导致 T/R 组件、通道数量随之增长, 从而引起相控阵天线的成本急剧上升。另一方面, 在一定的阵列孔径下, 通过增大单元间距, 并采用高增益天线作为单元, 可以在保持阵列增益的前提下大幅减少天线单元和通道数量, 从而降低相控阵的成本^[1]。该技术在波束扫描范围较小的场景下应用广泛, 这种阵列称为有限扫描阵列 LSA (Limited Scan Array)^[2]。

有限扫描阵列通常采用具有高效率、高增益特性的天线作为单元, 且天线单元间距通常大于一个波长。由阵列理论可知, 当单元间距大于一个波长时, 周期排布的阵列阵因子会出现栅瓣, 导致相控阵工作时出现接收模糊甚至错误跟踪。抑制栅瓣的方法主要有两种, 一种是进行单元级或子阵级非周期布阵使各单元辐射电场在原栅瓣方向无法同相叠加, 从而分散栅瓣能量, 降低栅瓣电平; 另一种是利用单元方向图压低栅瓣, 这种方法对远区栅瓣有显著抑制作用, 对靠近主瓣的栅瓣抑制作用较弱。与单元级非周期阵列相比, 子阵级非周期阵列的模块化程度更高, 有利于批量生产和设备维护, 因此应用更加广泛。子阵级非周期排布方式包括子阵旋转、子阵错位^[3]、子阵随机排布^[4]、环栅阵^[5]、非规则子阵^[6]等。

本文从阵面设计和波束设计两个方面展开研究, 考察了不同的非周期排布方式和子阵规模对阵列

的阵因子栅瓣抑制性能和波束分裂性能，并给出了有限扫描阵列的设计和优化过程，对有限扫描阵列的设计具有一定的指导意义。

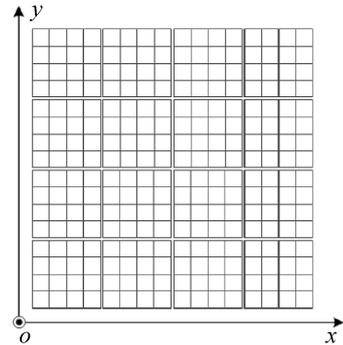
1 基于 4×4 子阵的阵面设计

根据本测控系统的工作距离和增益需求，该相控阵天线应包含约 240 个天线单元。为了尽量减少子阵后端的数字通道数量，应优化阵面排布使得各子阵包含尽量多的天线单元，因此，首先考虑基于 4×4 子阵规模进行阵面设计和优化。

图 1 所示为传统周期阵列排布及其性能仿真，该阵列由 4×4 个子阵周期排布构成，每个子阵包含 4×4 个天线单元，此处选择单元间距 $d=2.8\lambda_0$ 。图 1 (b) 所示为在正弦空间坐标系中 UV 平面上表示的该阵列的阵因子，可以看出，其阵因子除在 UV 平面的原点 ($u=0, v=0$) (即天顶方向) 处出现最大值外，还在 UV 平面上坐标为 ($m \times u_0, n \times v_0, m \in Z, n \in Z$) 点处出现最大值，其中， $u_0=\lambda/d, v_0=\lambda/d$ ，这些点即该周期阵列阵因子的栅瓣。由上述分析可知，当主瓣不扫描时，其阵因子最靠近主瓣的栅瓣出现在 ($u=\pm 0.357, v=\pm 0.357$)，对应的 θ 约为 20.9° 。

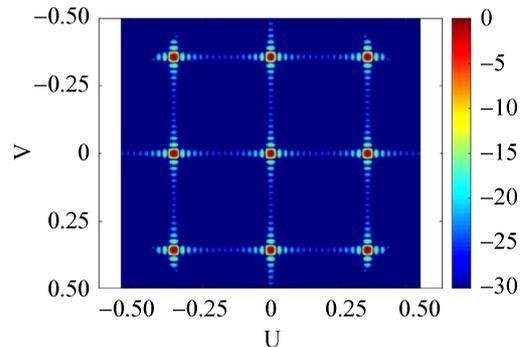
图 1 (c) 给出了所采用天线单元的方向图，可以看出该天线单元方向图的半功率波束宽度约为 19° ，主瓣内增益较平坦，且方向图下降沿陡峭，旁瓣电平远低于主瓣，具有良好的门限特性。此外，图 1 (c) 还给出了该周期阵列波束扫描至 ($\theta=8^\circ, \varphi=0^\circ$) 角度时 $v=0$ 切面的阵因子方向图，可以看出其最靠近主瓣的栅瓣出现在 ($\theta=12.6^\circ, \varphi=0^\circ$)。上述分析表明，当主瓣扫描时，其栅瓣也随着主瓣发生偏移，这一特性可应用于波束扫描的阵列设计和优化。当主瓣扫描至 ($\theta=8^\circ, \varphi=0^\circ$) 时，由于已有栅瓣进入单元方向图的主瓣内形成高旁瓣，此时合成方向图的最高旁瓣电平仅为 -3.6dB 。

为了抑制周期排布阵列阵因子的高栅瓣，需要对该阵列中各子阵位置进行优化，常用的优化算法有粒子群算法、遗传算法等。优化子阵位置需在满足一定的约束条件下进行：一是阵面的尺寸是有限的，二是子阵之间不相互干涉。文献[7]详细给出了基于遗传算法的二维阵列优化方法。图 2 给出了基于遗传算法优化后的非周期阵面排布及性能仿真，由图 2 (b) 可以看出优化后的非周期阵列的阵因子仅在 ($u=0, v=0$) 处出现最大值，而图 1 (b) 中栅瓣则分裂为多个旁瓣，这是由于此时各子阵辐射的能量仅在主波束方向同相叠加，而在原栅瓣出现的角度，即 ($m \times u_0, n \times v_0, m \in Z, n \in Z$) 点处不再同相叠加，因此，栅瓣电平被显著抑制，图 2 (b) 中的四个最靠近主瓣的栅瓣电平被抑制至 -10.9dB 。



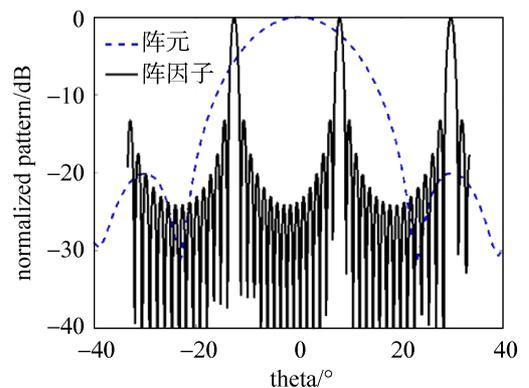
(a) 阵面排布

(a) Original periodical array configuration



(b) 阵因子分布

(b) 2-D array factor map



(c) $v=0$ 切面阵因子

(c) Normalized array factor at $v=0$ cut

图 1 基于 4×4 子阵规模的周期阵列
Fig. 1 Periodic array based on sub-arrays consisting of 4×4 elements

图 2 (c) 给出了该非周期阵列波束扫描至 ($\theta=8^\circ$, $\varphi=0^\circ$) 角度时, $v=0$ 切面的阵因子方向图。可以看出, $v=0$ 切面上阵因子的栅瓣电平被抑制到 -12.15dB , 结合单元方向图对栅瓣的抑制, $v=0$ 切面上合成方向图的栅瓣电平减小至 -14.75dB 。此外, 在主波束扫描 8° 范围内, 该非周期阵列在全空域内的最高旁瓣电平为 -12.55dB , 与周期阵列相比其最高旁瓣电平改善了约 9dB 。

本相控阵所应用的测控系统除要求该阵列具有低栅瓣性能外, 还要求其具有接收多波束的能力。根据实现的层级接收多波束可以分为单元级和子阵级两类, 与单元级接收多波束相比, 子阵级接收多波束可以显著降低多波束形成网络的数量和复杂度, 从而降低系统成本。随着集成电路技术的飞速发展, 数字波束形成技术在相控阵天线领域得到广泛应用, 数字接收多波束可以方便地实现波束赋形, 增强相控阵天线的性能和威力。子阵级数字接收多波束是通过将子阵合成的信号进行下变频、数模转换和正交相位检波转换为数字信号, 并通过数字终端对子阵级数字信号进行数字配相、合成, 从而形成接收多波束。为便于表述, 将子阵级信号不经过数字配相而直接合成的波束定义为中心波束, 将数字配相后合成的波束定义为伴随波束。与中心波束相比, 伴随波束的旁瓣通常会抬高, 需详细进行评估。

基于上述要求, 需要考察该相控阵同时形成多个波束的性能。图 3 给出了该非周期阵列同时形成两个波束的仿真结果, 其中图 3 (a) 所示为当该阵列的中心波束指向 ($\theta=7^\circ$, $\varphi=0^\circ$) 时仿真的 $v=0$ 切面方向图, 图 3 (b) 所示为伴随波束指向 ($\theta=8^\circ$, $\varphi=0^\circ$) 时仿真的 $v=0$ 切面方向图。由图 3 (a) 可以看出, 该阵列在中心波束指向角下的最高旁瓣电平为 -12.96dB , 且该旁瓣出现在主瓣附近。而在图 3 (b) 中可以看出, 在伴随波束的方向图中 $\theta=3.6^\circ$ 方向出现了 -6.2dB 的高旁瓣电平, 这是由于 4×4 子阵规模太大, 在形成伴随波束过程中引起高旁瓣, 尽管这一现象可以通过减小伴随波束与中心波束的角度偏移来改善, 但这也会导致多个波束重叠区域大, 无法充分覆盖扫描空域。上述分析表明, 尽管通过优化非周期阵列中各子阵位置可以显著抑制栅瓣, 但 4×4 子阵规模在形成伴随波束时会引起高旁瓣。

2 基于 2×2 子阵的阵面设计

为了解决上述问题, 需进一步缩小子阵规模, 将子阵规模缩小为 2×2 , 并将子阵总数缩减至 60, 按照八角阵进行排布, 如图 4 所示。由图 4 (a) 可以看出该八角阵分为三部分, 中心区域、第二圈和第三圈, 分别包含 24 个、16 个和 20 个子阵。由于中心区域的 24 个子阵呈周期排布, 具有很强的周期性, 为了改善该阵列的栅瓣抑制性能, 分别设置中心区域、第二圈和第三圈的子阵为不同单元间距,

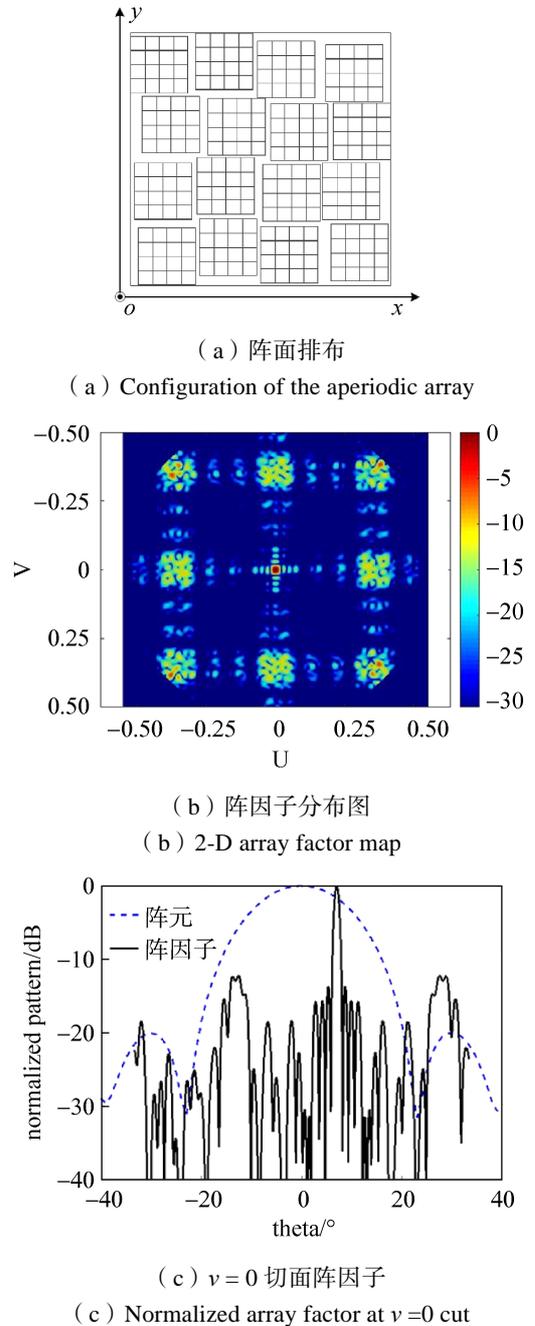


图 2 基于 4×4 子阵规模的非周期阵列
Fig. 2 Aperiodic array based on sub-arrays consisting of 4×4 elements

利用各子阵天线方向图上的零点对消其他子阵方向图上的栅瓣^[8]，本文中三种子阵单元间距之比约为1:1.14:1.29。通过优化各子阵位置可以进一步改善该阵列的栅瓣抑制性能，图4(b)给出了该阵列波束扫描至 $(\theta=8^\circ, \varphi=0^\circ)$ 角度时的方向图，可以看出此时该阵列的最高旁瓣电平为 -13.12dB ，该阵列靠近主瓣的旁瓣电平很低，最大值仅为 -19.43dB ，远低于图2中非周期阵列的旁瓣电平，因此，该仿真结果表明，采用多种子阵可以降低阵列的旁瓣电平。

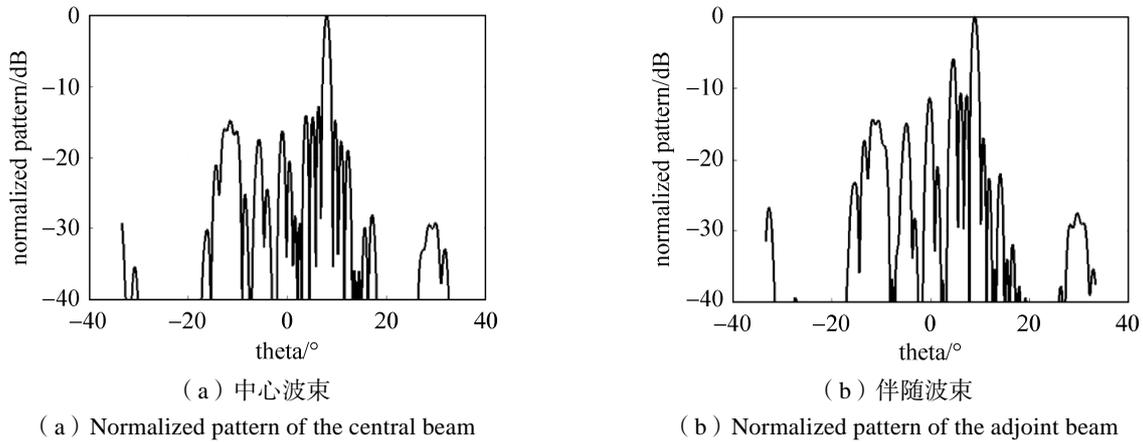


图3 非周期阵列同时形成多波束

Fig. 3 Simultaneous multiple beams radiated by the aperiodic array

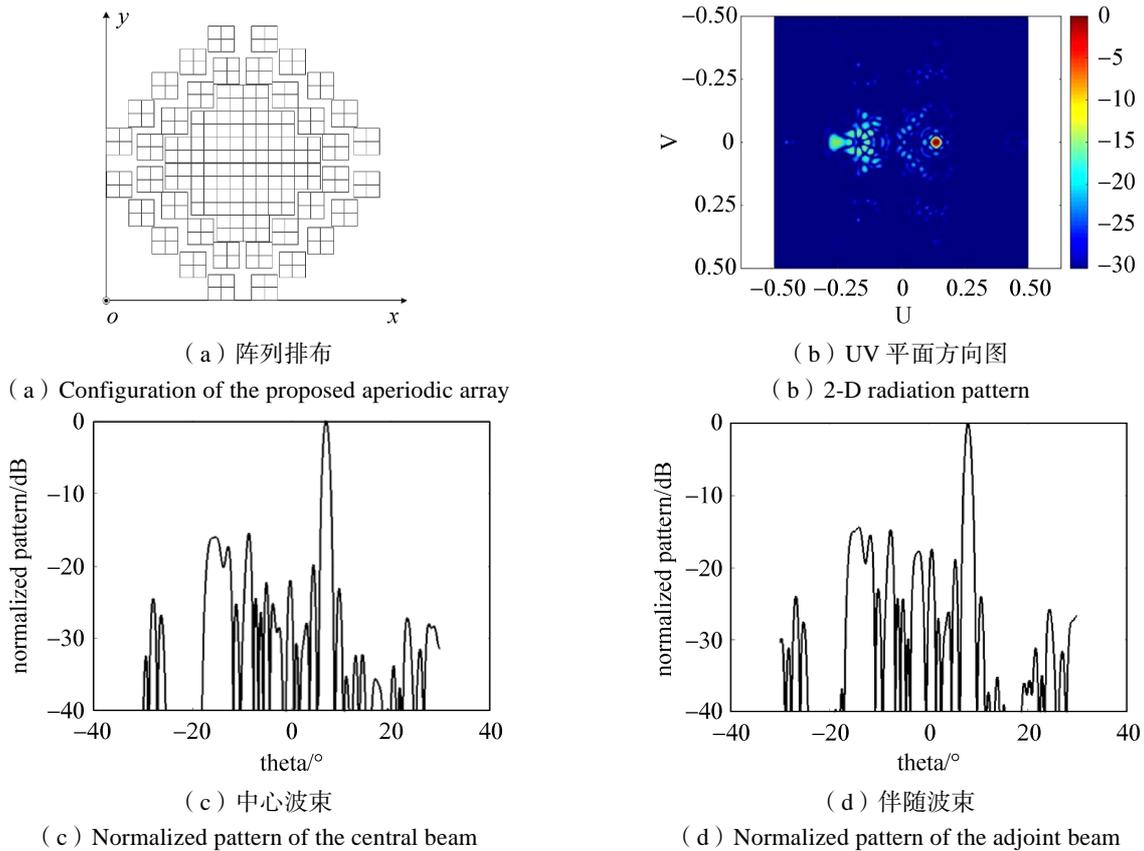


图4 基于 2×2 子阵规模的非周期阵列分析

Fig. 4 Analysis of the aperiodic array based on sub-arrays composed of 2×2 elements

图 4(c)、图 4(d) 所示为仿真的该非周期八角阵同时形成两个波束的仿真结果, 图 4(c) 表示所示为当该阵列的中心波束指向 ($\theta=7^\circ$, $\varphi=0^\circ$) 时仿真的 $v=0$ 切面方向图, 图 4(d) 所示为伴随波束指向 ($\theta=8^\circ$, $\varphi=0^\circ$) 时仿真的 $v=0$ 切面方向图。可以看出, 该阵列在伴随波束偏离中心波束 1° 时旁瓣和栅瓣特性几乎没有变化, 表明 2×2 子阵规模在形成伴随波束时几乎不会影响阵列性能。

3 结束语

本文对基于大间距子阵的有限扫描阵列进行研究, 研究了子阵规模对伴随波束方向图特性的影响, 结果表明子阵规模过大会在形成伴随波束时引起高旁瓣, 并设计了基于 2×2 子阵的非周期八角阵, 实现了扫描 8° 时将栅瓣电平抑制至 -13.12dB , 同时, 在伴随波束偏离中心波束 1° 的情况下保持阵面的栅瓣和旁瓣特性几乎不变, 该研究对有限扫描阵列设计具有一定的指导和借鉴意义。

参考文献

- [1] 马静, 刘明罡, 倪迎红. 旋转超级子阵在车载机动式雷达天线中的设计应用[J]. 现代雷达, 2016, 38(11): 66–70.
MA Jing, Liu Minggang, NI Yinghong. Application of tilted super sub-arrays on vehicle mounted radar antennas[J]. Modern Radar, 2016, 38(11): 66–70.
- [2] 匡勇, 于春国, 聂晓初, 等. 有限扫描固态相控阵天线[C]. 2009 年全国天线年会, 2009: 808–812.
KUANG Yong, YU Chunguo, NIE Xiaochu, et al. A limited scansolid state phased array antenna[C]. National Conference on Antenna, 2009: 808–812.
- [3] 马静, 王乃志. 子阵非周期排布对天线栅瓣抑制的研究[J]. 现代雷达, 2018, 40(4): 61–72.
MA Jing, WANG Naizhi. Grating-lobe suppression effects with aperiodic sub-array arrangement[J]. Modern Radar, 2018, 40(4): 61–72.
- [4] 费阿莉, 朱瑞平, 刘明罡. 非周期阵列形式研究[C]. 2009 年全国天线年会, 2009: 714–717.
FEI Ali, ZHU Ruiping, LIU Minggang. Study of the forms of aperiodic array[C]. National Conference on Antenna, 2009: 714–717.
- [5] 李志刚, 王鹏毅. 基于同心圆环的大间距子阵级阵列栅瓣抑制[J]. 电波科学学报, 2016, 31(6): 1132–1137.
LI Zhigang, WANG Pengyi. Grating lobe suppression in large spacing arrays composed of sub-arrays based on concentric ring[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31(6): 1132–1137.
- [6] WANG H, FANG D G, CHOW Y L. Grating lobe reduction in a phased array of limited scanning[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2008, 56(6): 1581–1586.
- [7] 包子阳, 余继周. 基于 Matlab 的遗传算法及其在稀布阵列天线中的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [8] 孙立春, 侯田, 汪伟. 基于多子阵互调的大间距相控阵天线栅瓣抑制方法[C]. 2017 年全国天线年会, 2017: 557–559.
SUN Lichun, HOU Tian, WANG Wei. Grating lobe suppression method based on interactions between different sub-arrays of large space phased array antenna[C]. National Conference on Antenna, 2017: 557–559.
- [9] 蔡鸿昀, 李思静, 周平. 卫星监测多波束天线技术研究[J]. 电波卫士, 2017, 8: 39–41.

[作者简介]

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、数字多波束阵列等。
赵波 1982 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为反射面天线、多波束天线等。
陈剑 1979 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为导航天线、数字多波束相控阵等。
史永康 1978 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为阵列天线、相控阵天线设计等。