

文章编号: 2095-4980(2021)05-0896-05

结构紧凑型宽带低副瓣阵列天线

刘 辰, 周锦文, 张志宏, 李祥祥

(中国船舶重工集团公司 第 723 研究所, 江苏 扬州 225001)

摘要: 为了满足系统对阵列天线宽带、低副瓣的要求, 设计了一款工作在 X 和 Ku 波段的结构紧凑型宽带低副瓣阵列天线, 相对带宽为 54.5%, 副瓣电平在 -30 dB 以下, 天线纵向尺寸为 $4.5\lambda_g$ 。阵列天线采用带状线加权馈电网络和宽带带状线偶极子天线一体化设计, 偶极子天线用短路探针对馈电分布电容进行补偿并加载寄生贴片, 有效展宽了带宽; 馈电网络通过拓扑结构设计获得各功分节点最佳功率比值, 对各功分节点位置合理布局缩减馈电网络纵向尺寸。在微波暗室利用近场测试系统对阵列天线实物进行测试, 验证了仿真结果。

关键词: 宽带; 低副瓣; 加权馈电网络; 紧凑结构

中图分类号: TN822⁺.8

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020036

Structural compact wideband low-sidelobe antenna array

LIU Chen, ZHOU Jinwen, ZHANG Zhihong, LI Xiangxiang

(The 723 Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Yangzhou Jiangsu 225001, China)

Abstract: A structural compact wideband low sidelobe antenna array operating at X and Ku bands is designed for meeting the requirements of the electronic systems. The antenna array could achieve the relative bandwidth of 54.5% and the sidelobe level below -30 dB with the longitudinal dimension of $4.5\lambda_g$. The array consists of 48 dipole elements and a stripline weighted power divider. To extend the bandwidth of the dipole element, a short-circuited probe at the end of the feeding stripline is employed to compensate distribution capacitive effect. A parasitic patch over the dipole is utilized to improve the radiation performance. To reduce longitudinal dimension of the array, the layout of the power divider is optimized according to the optimal power ratio of each node from the topology design. The experimentally validation is conducted in the near-field microwave anechoic chamber.

Keywords: wideband; low sidelobe; weighted power divider; compact structure

阵列天线在雷达、电子对抗等领域的应用日益广泛, 随着电磁环境的愈加复杂, 这些应用对天线副瓣电平提出了更高要求。通过降低波束的副瓣电平, 可以有效地降低副瓣带来的杂波干扰, 增加系统的抗干扰能力, 进而提升电子系统的工作效能。文献[1]设计一种宽带低副瓣微带天线阵列, 在 10%的相对带宽内副瓣电平达到 -25 dB。文献[2]利用 45°极化旋转设计一种微带贴片阵列天线, 其副瓣电平在 20%相对带宽内优于 -26.5 dB。文献[3]描述一种基于基片集成波导的低副瓣阵列天线, 在 6%的带宽内副瓣电平在 -27 dB 以下。文献[4]研制一种空气同轴馈电的 X 波段低副瓣阵列天线, 相对带宽为 7.5%, E 面和 H 面的副瓣电平为 -28.5 dB 和 -29 dB。

本文设计了一种工作在 X 和 Ku 波段的结构紧凑型宽带低副瓣阵列天线, 相对带宽达到 54.5%, 副瓣电平在 -30 dB 以下, 天线纵向尺寸为 $4.5\lambda_g$ (λ_g 为介质波长)。采用带状线加权馈电网络和宽带带状线偶极子天线一体化设计, 首先通过阵列综合确定天线阵元间距和规模, 然后设计幅度加权的馈电网络, 最后将馈电网络与天线单元联合仿真。

1 天线单元设计

天线单元的结构如图 1 所示。为方便与后端功分馈电网络集成, 单元结构为双面印刷偶极子天线形式, 采用带状线缝隙耦合馈电。为了实现宽带匹配, 带状线采用 3 节渐变, 末端采用短路探针对馈电分布电容进行补

偿；偶极子前端采用寄生贴片加载，获得了良好的辐射特性^[5]。为考虑阵元互耦的影响，首先利用该天线单元组成 1×9 的直线阵，利用 Ansoft 公司三维电磁仿真软件 HFSS 分析天线单元在阵列环境中的性能，并对其结构参数进行优化。最终确定线阵中天线的间距为 $0.9\lambda_g$ ，天线单元高度为 $0.8\lambda_g$ ，振子臂的长度为 $0.6\lambda_g$ ，寄生贴片的长度为 $0.32\lambda_g$ ，其中 λ_g 为中心频率时电磁波在介质中的波长。优化后阵中单元的有源驻波比如图 2 所示，在 7.2~14.4 GHz 频率范围内驻波比小于 2，天线单元的带宽达到 66.6%。

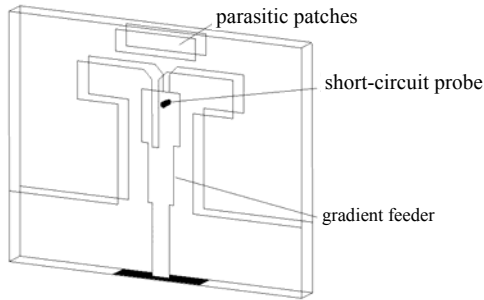


Fig.1 Antenna structure
图 1 天线模型

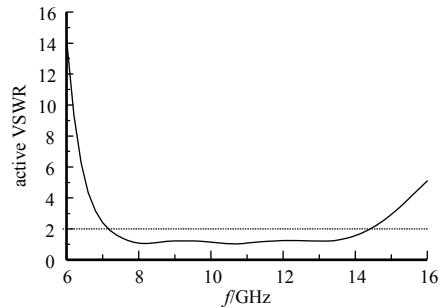


Fig.2 Active Voltage Standing Wave Ratio(VSWR) of the element in 1×9 array
图 2 阵中单元的有源驻波比(VSWR)

2 馈电网络设计

阵列天线的馈电网络可以提供各天线单元所需的幅度和相位，完成阵列天线的波束赋形功能^[6-8]。为实现低副瓣，通常需对天线进行幅度加权。泰勒加权阵列的辐射特性和切比雪夫加权阵列的辐射特性相近，但是它的激励电流相对平缓，只有靠近主瓣的前几个副瓣的电平接近相等，随后的各副瓣单调递减^[9-11]。

本文目标副瓣电平低于 -30 dB。为防止加工出来的天线副瓣抬升后超出指标要求，在计算电流分布时应留出一定的副瓣余量。此外，过低的副瓣综合会使波束宽度展宽，导致天线增益降低，同时也使得口径电流分布的幅度起伏过大，给功分馈电网络的设计带来困难。因此，副瓣电平最终按照泰勒分布进行 -38 dB 加权设计。泰勒加权分布中间与两边数值差别较大，功率分配节点选择不当会导致功分后两路印制线宽差别较大，过细的线宽既难加工，也容易断裂破损。需要合理地选择每次功分节点的位置，各输出端口相位需要尽可能保持一致，即从输入端口到各个输出端口经过的电长度要基本相同。本馈电网络的形式为 1 分 48 功分器，采用二节 Wilkinson 功分器作为基础功分器来保证带宽。综合考虑各端口的功率分配，避免单个功分器功分比过大，确定加权馈电网络左半边的功分拓扑结构如图 3 所示。计算所得各功分节点的功率比值如表 1 所示，其中功分比最大功分节点的功率比值仅为 1.865。

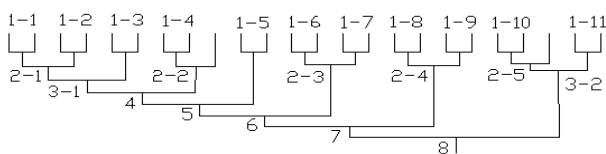


Fig.3 Topology of weighted power divider
图 3 加权馈电网络拓扑结构

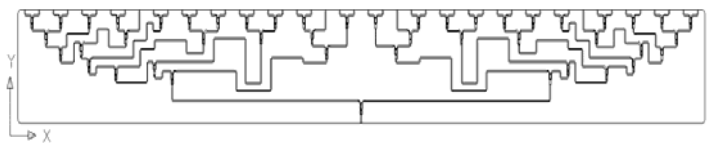


Fig.4 Model of weighted power divider
图 4 加权馈电网络模型

根据图 3 的拓扑结构，计算每个功分节点的相关参数并仿真优化，最后将各个功分节点级联成馈电网络整体仿真。加权馈电网络模型如图 4 所示，Y 轴方向为纵向。直接按图 3 拓扑结构顺序级联，馈电网络的纵向尺寸约为 $6\lambda_g$ ，极大增加系统的尺寸。为压缩纵向尺寸，本文采用折叠馈线的方式，通过合理布局功分节点位置，最终设计的馈电网络的纵向尺寸仅为 $3.7\lambda_g$ ，相对于常规设计缩短了 38.3%。图 5 为馈电网络各个输出端口的幅度仿真值与理论值对比，图 6 为馈电网络各个输出端口的相位一致性的仿真数据。馈电网络各输出端口幅度的仿真结果与理论值趋势一致，比理论值低 1.5 dB 左右，这是由于仿真时未计入导体损耗；馈电网络各输出端口相位一致性为 $-4^\circ \sim 2^\circ$ 。

表 1 功分节点功率比值

Table1 Power ratio of nodes

parameters	value											
node	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11	
power ratio	1.134	1.335	1.382	1.342	1.251	1.198	1.156	1.119	1.087	1.057	1.014	
parameters	value											
node	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	4	5	6	7	8
power ratio	1.556	1.331	1.382	1.216	1.865	1.142	1.383	1.735	1.275	1.565	1.014	1.189

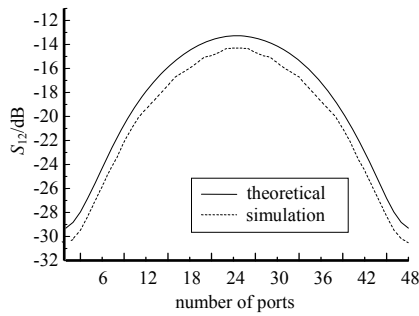


Fig.5 Amplitude distribution of output ports
图 5 输出端口幅度分布

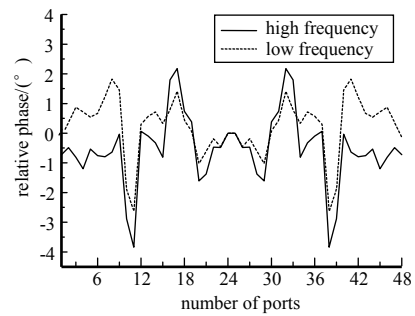


Fig.6 Phase consistency of output ports
图 6 输出端口相位一致性

3 天线与馈电网络一体化设计

在前期设计的天线单元和加权馈电网络的基础上进行综合设计, 由于馈电网络与天线单元均采用带状线结构, 馈电网络各输出端口与天线单元馈线可直接对接, 便于一体加工印制。对天线单元和馈电网络的相关参数进行优化设计来调节输入端反射系数和天线的副瓣电平。线阵最终结构如图 7 所示, 其纵向尺寸为 $4.5\lambda_g$, 线阵仿真结果如图 8~10 所示。仿真结果表明, 线阵在 62% 的带宽内反射系数小于 -10 dB, 在 54.5% 的带宽内 E 面副瓣电平小于 -32.5 dB, 其中低频点、中心频点和高频点副瓣电平分别为 -32.6 dB、 -32.7 dB 和 -32.5 dB, 全频段内 H 面波束宽度大于 75° 。

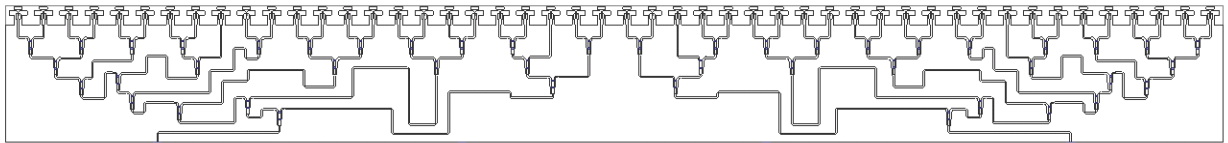


Fig.7 Structure of the linear array
图 7 线阵结构图

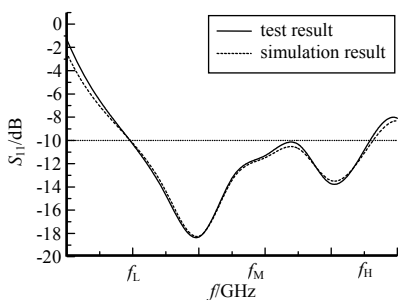


Fig.8 Reflection coefficient of the array
图 8 线阵的反射系数

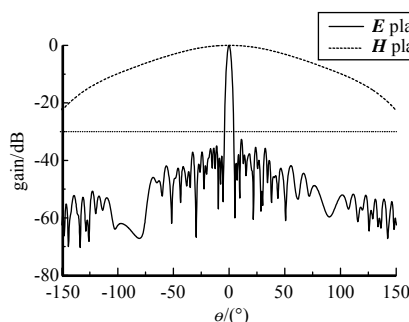


Fig.9 Radiation pattern at low frequency
图 9 线阵低频点方向图

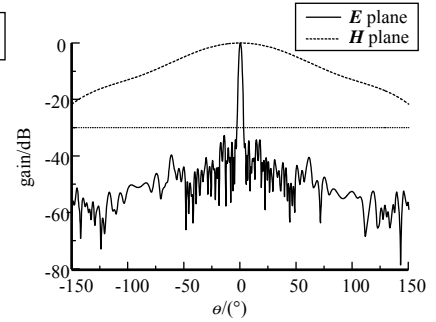


Fig.10 Radiation pattern at high frequency
图 10 线阵高频点方向图

4 低副瓣阵列天线测试

天线与馈电网络一体化设计既便于调试生产, 也便于实现低副瓣甚至超低副瓣^[12]。按照图 7 所示的线阵进行加工, 制作的天线实物如图 11 所示。



Fig.11 Prototype of the linear array
图 11 线阵实物图

线阵实测反射系数与仿真结果吻合。在微波暗室中利用近场测试系统对线阵进行测试，实测的线阵在低频点、中心频点、高频点的 E 面方向图如图 12~图 14 所示， H 面方向图如图 15~图 17 所示。受印制板加工精确度限制，线阵实际尺寸与仿真存在一定误差，导致测试的副瓣电平较仿真时略有抬升，但实测的副瓣电平在全频段小于 -30 dB；全频段内 H 面波束宽度大于 80° ，与仿真结果接近。

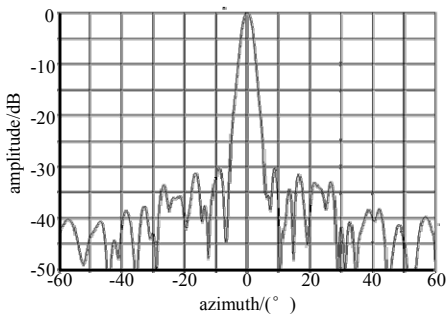


Fig.12 E plane radiation pattern at f_L
图 12 线阵低频点 E 面方向图

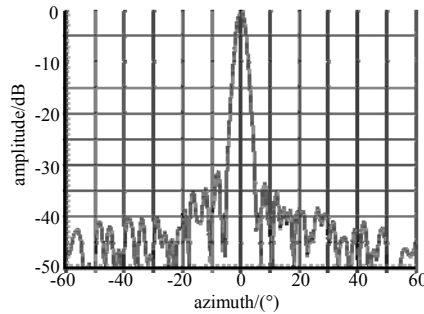


Fig.13 E plane radiation pattern at f_M
图 13 线阵中心频点 E 面方向图

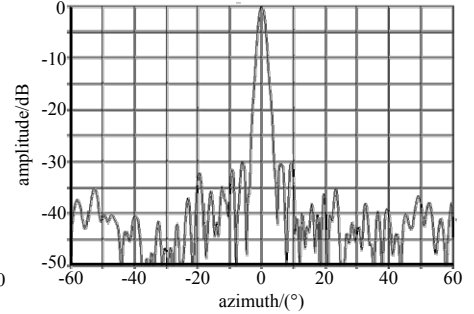


Fig.14 E plane radiation pattern at f_H
图 14 线阵高频点 E 面方向图

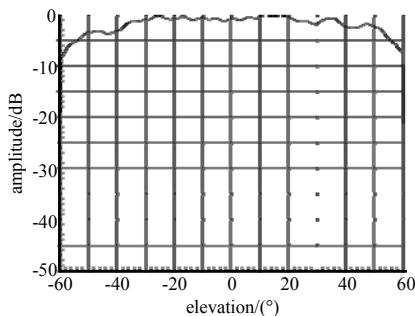


Fig.15 H plane radiation pattern at f_L
图 15 线阵低频点 H 面方向图

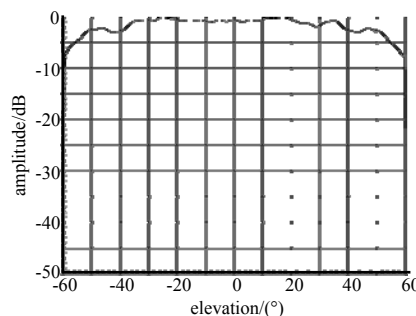


Fig.16 H plane radiation pattern at f_M
图 16 线阵中心频点 H 面方向图

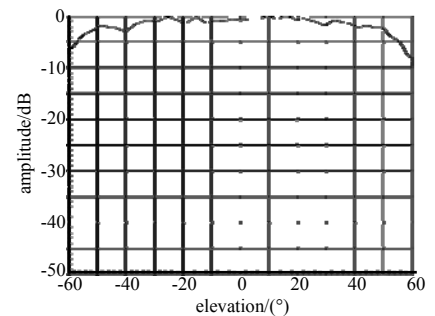


Fig.17 H plane radiation pattern at f_H
图 17 线阵高频点 H 面方向图

5 结论

本文设计了一款工作在 X 和 Ku 波段的结构紧凑型宽带低副瓣 48 元直线阵列天线。天线单元采用末端短路的带状线馈电偶极子形式实现宽带工作，馈电结构采用馈线折叠泰勒加权带状线功分器实现纵向尺寸的缩减。直线天线阵与加权功分器直接集成进行一体化设计与仿真分析。仿真结果表明该阵列可实现相对带宽为 54.5%，副瓣电平在 -30 dB 以下，同时天线纵向尺寸仅为 $4.5\lambda_g$ 。对天线阵进行实物加工并通过近场测试验证，与仿真结果较为吻合。该阵列在雷达、电子战等领域具有广泛的应用前景。

参考文献：

- [1] 杨亚兵,赵迎超,李绪平,等. 一种宽带低副瓣微带阵列天线的设计[J]. 火控雷达技术, 2015,44(4):84-87,100. (YANG Yabing,ZHAO Yingchao,LI Xuping,et al. Design of a broadband low-sidelobe microstrip array antenna[J]. Fire Control Radar Technology, 2015,44(4):84-87,100.)
- [2] 王德乐,黄季甫. 一种新型宽带低副瓣微带贴片阵列天线的设计[J]. 无线通信技术, 2018,27(1):39-42. (WANG Dele, HUANG Jifu. Novel design of a broadband low-sidelobe microstrip patch array antenna[J]. Wireless Communications Technology, 2018,27(1):39-42.)
- [3] 马汉清,赵交成. 基于基片集成波导(SIW)的低副瓣阵列天线设计[J]. 火控雷达技术, 2011,40(1):91-94. (MA Hanqing,ZHAO Jiaocheng. Low sidelobe array antenna design based on Substrate Integrated Waveguide(SIW)[J]. Fire Control Radar Technology, 2011,40(1):91-94.)
- [4] 宋长宏,吴群. 一种空气同轴馈电的 X 波段低副瓣阵列天线[J]. 电波科学学报, 2016,31(3):573-578,596. (SONG Changhong,WU Qun. A low sidelobe planar X-band antenna array with air coaxial feedline[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016,31(3):573-578,596.)
- [5] 官伟,孙绍国. X 波段宽带微带偶极子天线[J]. 火控雷达技术, 2012,41(1):63-66. (GUAN Wei, SUN Shaoguo. An X-band wideband microstrip dipole antenna[J]. Fire Control Radar Technology, 2012,41(1):63-66.)

- [6] 王学良. C 波段一维有源相控阵天线一体化设计[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (WANG Xueliang. Integrated design of one dimensional active phased array antenna in C band[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [7] 葛强. 超宽带阵列天线技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2019. (GE Qiang. Research on ultra-wideband array technology[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2019.)
- [8] 赵麟,高申玮,蔚保国,等. 一种低副瓣阵列天线指数幅度加权算法及仿真[J]. 无线电通信技术, 2015,41(2):38-40. (ZHAO Lin,GAO Shenwei,WEI Baoguo,et al. An amplitude weighting algorithm of low sidelobe beam forming on antenna array and its simulation[J]. Radio Communications Technology, 2015,41(2):38-40.)
- [9] 郑占旗,张立军,王宇颢,等. 低副瓣任意波束直接合成算法研究[J]. 电波科学学报, 2019,34(3):278-286. (ZHEN Zhanqi,ZHANG Lijun,WANG Yuhao,et al. Direct synthesis of low sidelobe arbitrary beam[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019,34(3):278-286.)
- [10] 李强. 宽带低副瓣阵列天线[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (LI Qiang. Broadband and low side-lobe array[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2017.)
- [11] 孙绍国,张玉梅,卢晓鹏,等. 宽带超低副瓣天线阵设计[J]. 电讯技术, 2006,46(3):87-92. (SUN Shaoguo,ZHANG Yumei,LU Xiaopeng. Design of broadband and ultra-low sidelobe antenna array[J]. Telecommunications Technology, 2006,46(3):87-92.)
- [12] 屈天莹,夏冬玉. 一种宽频带低副瓣阵列天线的工程应用研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013,8(1):72-75. (QU Tianying,XIA Dongyu. Study and application on a broadband flat sheet reflector antenna array with low-sidelobe in engineering[J]. Journal of CAEIT, 2013,8(1):72-75.)

作者简介:

刘 辰(1988-), 女, 江苏省扬州市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为阵列天线和功分网络.email: ryxc2006sunstar@126.com.

周锦文(1989-), 男, 江苏省淮安市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为阵列天线和反射面天线.

张志宏(1990-), 男, 山东省滕州市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为阵列天线和微波器件.

李祥祥(1989-), 男, 山东省滕州市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为超宽带阵列天线和太赫兹器件.