

短波小型化软振子对数周期天线设计和实现



何德军^{1*}, 王娟²

(1. 武汉船舶通信研究所 武汉 430079; 2. 武汉中原电子集团有限公司 武汉 430079)

【摘要】针对传统短波对数周期天线尺寸大、架设困难等问题,提出了一种工作在 4~30 MHz 的小型化短波软振子对数周期天线。该天线采用立体三角形偶极子和平面四边形偶极子等宽带天线作为振子单元,并将结构拉线作为最长振子加载,有效扩展天线的最低工作频率;同时最长天线振子采用折合偶极子形式,减小了侧翼桁架对天线性能的影响。电磁计算软件 FEKO 仿真与样机测试表明,该天线在工作频段内具有较小的电压驻波比和稳定的方向性。

关键词 短波; 对数周期天线; 小型化; 宽频带

中图分类号 TN82 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2022180

Design and Realization of Miniaturized HF Soft Log-Periodic Dipole Antenna

HE Dejun^{1*} and WANG Juan²

(1. Wuhan Maritime Communication Research Institute Wuhan 430079; 2. Wuhan Zhongyuan Electronics Group Co., Ltd. Wuhan 430079)

Abstract The conventional high frequency Log-periodic Dipole Antenna (LPDA) is very large in the lateral size, causing the construction difficulty. A miniaturized soft High Frequency (HF) LPDA work in 4 MHz to 30 MHz is presented. The elements of the antenna adopt three-dimensional triangular dipole and plane quadrilateral dipole, and the stay wires are loaded as the longest element, so that the work frequency of antenna is effectively extended. The longest antenna element adopts folded dipole antenna, which eliminates the influence flank truss on antenna performance. Full-wave simulation and test results showed a stable directional pattern and lower Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) over the impedance.

Key words HF; log-periodic dipole antenna (LPDA); miniaturization; wide band

短波通信利用电离层反射进行无线电通信,具有机动性强、网络重构快捷和抗毁性强等优点,具备中继远程通信能力,适于进行中、远距离通信^[1]。对数周期天线属于非频变天线,具有强方向性、高增益和宽频带等优点,非常适用于中远距离的短波通信。

常规对数周期天线的最长振子长度约为最低工作频率的四分之一波长^[2-3],造成短波对数周期天线占地面积非常大,天线尺寸限制了在一些场地受限区域或放置在转台上的使用。近年来,国内外研究学者对如何实现天线小型化设计开展了大量研究工作^[4-9],然而并不是所有的小型化技术均适用于短波频段天线。文献 [5-6] 研究了将直线形对数周期天线的振子末端折合成方形、圆形和三角形结构或者末端加载横线的方法,可以明显缩短天线横向尺

寸,但在短波频段样机结构实现难度较大。文献 [7] 研究了在振子单元根部采用集总电感加载缩小天线单元尺寸,该天线适合于接收状态或者小功率发射状态。文献 [8] 研究采用集总电感加载和 L 型加载结合的方式缩小天线尺寸。文献 [9] 研究了一种采用倒 V 形结构的对数周期天线,在 6~30 MHz 频率范围内具有较好的性能。文献 [10] 研究了一种末端加载三线天线的短波对数周期天线,进一步缩小了天线尺寸,但在低频段天线效率较低。在现有研究中大部分采用对振子加载的方式,这些研究对天线小型化具有重要的意义,然而加载方式会影响天线的部分性能指标。

针对上述问题,本文设计了一种工作在 4~30 MHz 小型化的短波软振子对数周期天线,天线尺寸为 28 m×27 m,天线振子采用宽频带的立体三角

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-10-27

作者简介: 何德军 (1986-), 男, 高级工程师, 主要从事天线理论与设计方面的研究。

*通信作者: 何德军, E-mail: hdj021@163.com

形偶极子形式和平面四边形偶极子形式, 并将结构拉线作为最长振子加载, 有效缩减天线尺寸, 同时最长振子采用折合偶极子形式, 减小了侧翼桁架对天线性能的影响。

1 对数周期天线工作原理

对数周期天线是一种非频变宽带天线, 由多对偶极子振子和集合线组成, 每对振子按照一定长度和间距比例交叉排列在集合线两侧, 它具有自相似结构特性。对数周期天线的性能主要由 3 个结构参数决定: 比例因子 τ 、距离因子 σ 及天线张角 2α , 如图 1 所示。

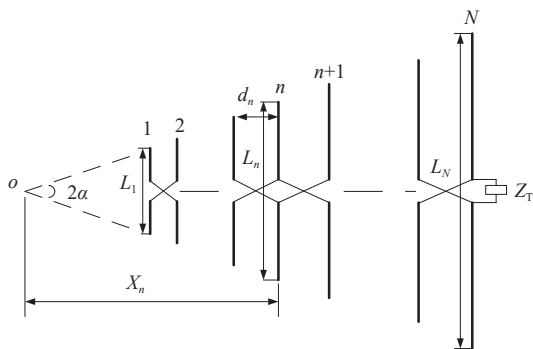


图 1 对数周期天线原理示意图

$$\tau = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{X_{n+1}}{X_n} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{d_n}{2L_n} = \frac{1-\tau}{4} \cot \alpha \tag{2}$$

根据对数周期天线理论, 天线中不同振子长度对应不同的工作频率, 天线横向物理尺寸由最低的工作频率决定。为缩小天线横向尺寸, 天线振子采用立体三角形偶极子和平面四边形偶极子形式, 大大增加了振子单元的空间填充性, 有效增大了天线的等效半径, 天线的结构示意图如图 2 所示。

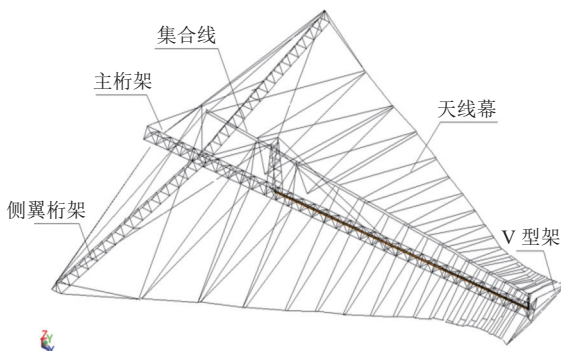


图 2 对数周期天线结构示意图

立体三角形偶极子和平面四边形偶极子形式具

有较大的等效半径, 在相同的物理尺寸下, 该形式天线比直线偶极子天线具有更宽的频带, 因此同等工作频率, 该天线形式具有更小的横向尺寸。

2 对数周期天线小型化设计

2.1 电气小型化设计

本文对数周期天线采用金属桁架框架结构和边吊索软线形式, 电气原理与常规对数周期偶极子天线相同, 同样存在传输区、辐射区和未激励区。天线幕中的振子选用宽带化的立体三角形偶极子天线和平面四边形偶极子天线, 虽然三角形天线和平面形天线结构上不存在自相似性, 但在频带宽带化上存在相似性, 因此采用这两种天线形式作为辐射单元。在电气设计中优化比例因子 τ 和距离因子 σ , 消除不同振子形状引起的未激励区传输线电流的幅值超过辐射区中偶极子天线电流最大幅值的反常激励现象, 保证天线的驻波比曲线和增益曲线具有较好的均匀性。

为保证天线结构的强度与稳定性, 天线桁架采用金属结构, 侧翼桁架的走向与天线振子一致, 并且侧翼桁架长度与振子长度相当, 侧翼桁架在工作频段内引入其他谐振, 影响工作带宽。为消除侧翼桁架对天线性能的影响, 将最长振子设计成折合天线的形式。图 3 为天线振子采用与不采用折合振子时对应的驻波比曲线, 不采用折合振子时, 在 5.2 MHz 时驻波比出现波动。

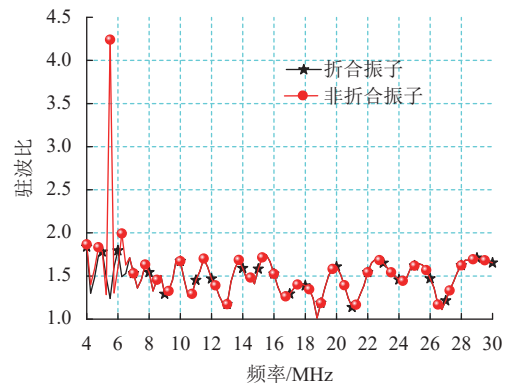


图 3 最长振子不同结构时的驻波比曲线

为进一步缩减天线的横向尺寸, 在最长振子为立体三角形偶极子的基础上, 将侧翼桁架拉向主桁架尾端的拉线作为最长振子加载。图 4 给出了最长振子为三角形天线时, 末端加载拉线与未加载拉线的驻波比曲线, 可以看出末端加载拉线使得工作频率由 5 MHz 降低到 4 MHz。传统的直线形偶极子对数周期天线工作频率在 4~30 MHz, 振子最长长

度为 18.75 m。由于三角形振子的宽频带特性和末端拉线的加载特性,使得天线的横向尺寸小于此数值,最终设计横向长度约 28 m,天线尺寸缩小了 25.4%。

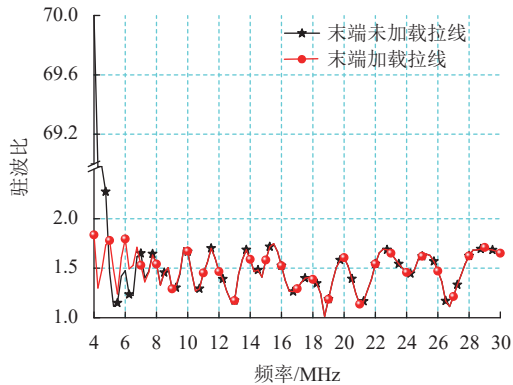


图 4 最长振子不同加载状态的驻波比曲线

2.2 天线结构设计

短波天线与其他高频频段天线的最大区别在于结构尺寸较大,需要支撑结构件或者拉线维持天线的形状尺寸,并抵御外界大风等其他恶劣气候对天线的破坏。天线桁架由主桁架、侧翼桁架、V型架、中心支架和后立杆组成,如图 5 所示。桁架主体截面为三角形框采用铝合金型材,具备强度高、重量轻及耐腐蚀等优点。

天线幕由振子、集合线、边吊索、集合线等组成,振子线与集合线采用铝包钢绞线。拉线主要包括主桁架、侧翼桁架的上下拉线和它们之间的拉线,拉绳采用钢丝绳并使用陶瓷绝缘子间隔。集合线采用上下双线结构,通过陶瓷绝缘子穿过中心支

架固定在后立杆和 V 型架之间。集合线不仅作为信号传输线传输能量,而且作为受力拉线张拉主桁架。

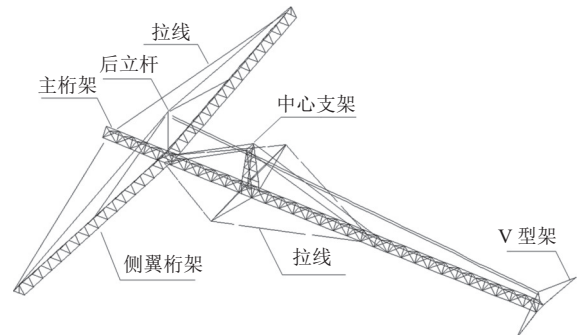


图 5 对数周期天线主体结构示意图

3 仿真设计与验证

本文采用三维全波电磁仿真软件 FEKO 对天线电气性能进行优化设计,大地相对介电常数 $\epsilon_r = 15$,电导率 $\sigma = 0.01$ 。根据文献 [11],天线结构参数采用变参方式设计,其中 τ 值由 0.867 渐变到 0.904, σ 值由 0.123 渐变到 0.099,天线采用了 19 对单元振子,天线尺寸为 28 m×27 m。

对数周期天线辐射方向图如图 6 所示,辐射方向图没有因天线小型化而恶化。在低频段有较大的后瓣且天线增益较低,这是由于激励区单元数目较少,且单个振子天线增益不高。对数周期天线增益仿真值如图 7 所示,在工作频率超过 8 MHz 以上时,增益趋于平稳,表明处于天线激励区的振子数量基本相当,且能量较好地被前后振子反射和引向。

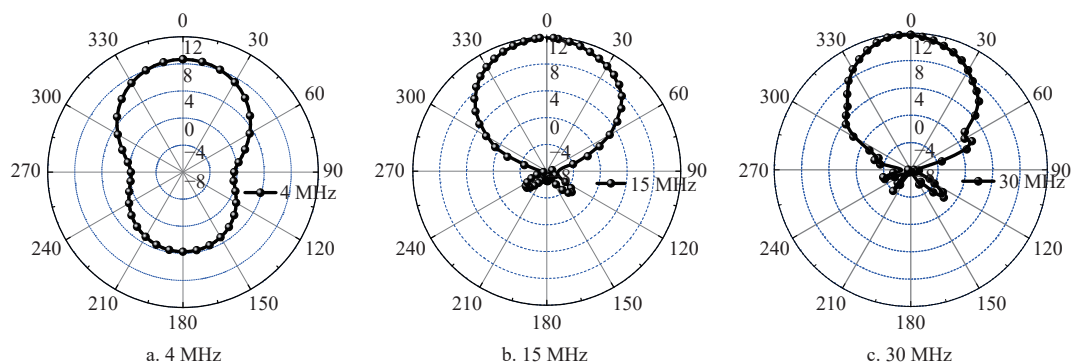


图 6 仿真辐射方向图

图 8 为安装架设在天线场的对数周期天线照片。图 9 给出实际测试和仿真的电压驻波比曲线,实际测试结果比理论仿真结果略有偏差,但最

大值小于 2.15,造成差别的主要原因是天线边线为悬链结构,边线线形在实际架设中难以达到仿真的结构状态。

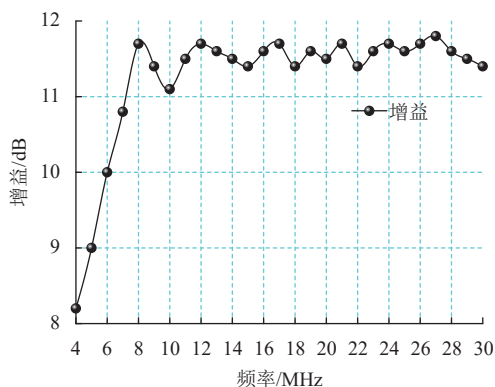


图7 仿真增益曲线



图8 天线场实际架设天线照片

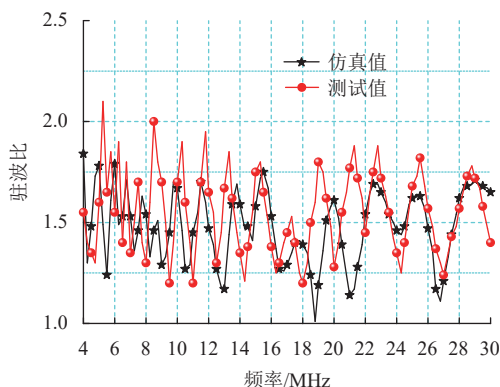


图9 天线仿真与测试驻波比

4 结束语

常规方法设计的对数周期天线尺寸大, 安装架设困难, 很大程度上限制了它的实际使用。本文采用宽频带的立体三角形偶极子和平面四边形偶极子作为天线振子单元, 并使用桁架结构拉线作为最长振子加载设计, 有效增加了天线的电尺寸, 拓展了天线的最低工作频率; 同时将最长振子设计为折合偶极子形式, 减小了侧翼桁架对天线性能的影响。基于这个设计思想, 结合工程实际需求, 本文设计了工作频率为 4~30 MHz 的小型化软振子短波对

数周期天线, 天线尺寸得到大幅度缩减, 测试结果表明在工作频带内天线驻波比较小、方向图无恶化、增益稳定。该设计方法为对数周期天线小型化提供了一种技术途径。

参考文献

- [1] 周朝栋, 王元坤, 周良民. 线天线理论与工程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988.
ZHOU C D, WANG Y K, ZHOU L M. Line antenna theory and engineering[M] Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 1988.
- [2] BALANIS C A. Antenna theory analysis, design[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [3] CARREL R L. The design of log-periodic antennas[J]. IRE Int Conv Rec, 1961, 1: 61-75.
- [4] ZHENG Z, WU X A. Miniaturized UHF vivaldi antenna with tailored radiation performance based on magneto-dielectric ferrite materials[J]. IEEE Trams Mag, 2020, 56: 1-5.
- [5] SHIN G, KONG M, LEE S H, et al. Gain characteristic maintained, miniaturized LPDA antenna using partially applied folded planar helix dipoles[J]. IEEE Access, 2018, 6: 5874-5880.
- [6] 赵秋颖, 何辉文, 王伟. 直线型对数周期天线的小型化设计与仿真[C]//2015年全国微波毫米波会议论文集. 合肥: [s.n.], 2015: 224-227.
ZHAO Q Y, HE H W, WANG W. Miniaturization design and simulation of linear logarithmic periodic antennas[C]//Proceedings of the 2015 National Microwave and Millimeter Wave Conference. Hefei: [s.n.], 2015: 224-227.
- [7] 朱海冰, 刘颖, 叶君永, 等. 一种末端加载对数周期天线[J]. 电子信息对抗技术, 2021(5): 80-83.
ZHU H B, LIU Y, YE J Y, et al A terminal loaded logarithmic periodic antenna[J] Electronic Information Countermeasures Technology, 2021(5): 80-83.
- [8] RASHED M J. A miniaturized log-periodic dipole array[C]//1989 6th International Conference on Antennas Propagation. Coventry: IET, 1989, 1: 403-406.
- [9] 李东虎, 任晓飞. 一种小型化短波对数周期天线设计[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 711-714.
LI D H, REN X F. Design of miniaturized log-periodic high frequency antenna[J]. Journal of Radio Science, 2014, 29(4): 711-714.
- [10] ZHANG X L, GAO H T. An optimum design of miniaturized high frequency inverted-V log-periodic dipole antenna[C]//Proceedings of the 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu: IEEE, 2011, 1: 1185-1188.
- [11] ZHU W J, GUO L. X. A miniaturized transmitting LPAD design for 2 MHz~30 MHz uses[J]. Sensors, 2021, 21(18): 6034.

编辑 叶芳