doi:10.11887/j.cn.201905023 http://journal.nudt.edu.cn

辐射叶加载的短波宽带鞭状天线优化设计*

王衡峰,柳 超,谢 旭,吴华宁
(海军工程大学 电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:提出一款具有多层辐射叶结构的新型鞭状天线,在10 m鞭状天线体上设置不同的辐射叶层数、半径、长度、分支数、仰角及其分布情况,研究其对天线辐射性能的影响,综合考虑选择一套最合适的辐射叶结构,并为天线进行双加载和宽带匹配网络的算法优化。仿真结果表明,与现有的普通宽带鞭状天线相比,增益和效率得到了普遍提高,在低频段增益最高提高了3 dB,效率最高提高了5%;在高频段增益最高提高了5 dB,效率最高提高了35%,方向图上翘也得到了一定的抑制,为改善现有的宽带鞭状天线提供一种新的结构设计方法。

关键词:辐射叶;入侵性野草优化;鞭状天线;加载;宽带匹配;短波
中图分类号:TN822+.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2019)05-159-07

Optimization design of short wave broadband whip antenna loaded with radiation lobes

WANG Hengfeng, LIU Chao, XIE Xu, WU Huaning
(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A new type of whip antenna with multilayer radiation lobes structure was introduced. By setting up different numbers in parameters like radiation lobe layer number, radius, length, branch number, elevation angle and distribution of radiation lobe on the body of the 10 meters whip antenna, the research of their influences on antenna radiation performance were launched to choose the most suitable structure for whip antenna. The double loading and the broadband matching network for the antenna were designed and optimized, whose simulation results show that the gain and efficiency, compared with the existing broadband whip antenna, are greatly improved, the maximum growth of gain and efficiency are 3 dB and 5% covering the low frequency, which are 5 dB and 35% covering the high frequency, the warping of the pattern is also restrained to a certain extent, so a new structural design method is provided here to improve the existing broadband whip antenna.

Keywords: radiation lobes; invasive weed optimization; whip antenna; loading; broadband matching; short wave

随着跳频扩频技术的不断发展,现代高频通信系统对天线的辐射性能和工作带宽的要求也越来越高。鞭状天线是一种全向辐射的特殊天线,其结构简单、质地坚固,适合在移动载体上安装使用,是一个不错的选择[1]。但在天线小型化的趋势下,高度限定的鞭状天线在短波频段往往属于电小天线,其输入阻抗对频率很敏感,特别是在低频段,输入电阻小、输入电抗大、与传输线的阻抗匹配难,导致天线的工作频带很窄。为了改善鞭状天线的带宽,提出了加顶负载[2]、RLC网络加载[3-5]、匹配网络技术[3]和分形技术[6-7]等方法,目前应用比较多的是加载和匹配网络技术。由于电阻的引入给天线带来了新的损耗,降低了天线效率,因此对高度一定的鞭状天线来说,如何在保证其带宽的同时提高天线的效率值得进一步研究。

从加顶负载和分形技术的角度出发,在鞭状天线的顶端加辐射叶可以使天线顶端的电流不为零,电流的增大使远区辐射场也得到增大[8]。所以本文在天线鞭体上添加了若干个辐射叶,为10 m鞭状天线设计一种新的负载结构,通过建模仿真对其电性能进行分析与比较并选择最佳的鞭体结构,同时为天线添加RLC加载和宽带匹配网络并利用入侵性野草优化(Invasive Weed Optimization, IWO)算法对其进行优化,进一步改善天线的电特性。IWO算法是一种新兴的启发式智能算法[9-10],它以其鲁棒性强、算法简单、具有搜索全局最优解的能力在天线优化设计领域中得到了广泛的应用,文献[11]中采用IWO算法对

* 收稿日期:2018-06-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61501195)
作者简介:王衡峰(1992—),男,湖南双峰人,博士研究生,E-mail:henvin999@163.com;
柳超(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:liuchao0817@sina.com

天线加载和宽带匹配网络进行了优化设计，验证了该算法的优越性，此处不再赘述。

1 天线辐射叶结构原理

在鞭状天线体上加载辐射叶时，每一个辐射叶给天线带来的对地分布电容可以分别等效一段传输线，如图1所示，多段等效传输线的叠加最终即为天线加载多层辐射叶时总的等效传输线，天线上段电流的增大使其整体电流分布更加均匀。设第 i 个辐射叶的高度为 h_i，给天线顶端的等效电容为 C_i，垂直线段的特性阻抗为 Z_{0i}，则此等效长度 h_i' 可计算如下：

$$Z_{0i}\cot(kh_i') = \frac{1}{\omega C_i} \tag{1}$$

$$h_i' = \frac{1}{k}\arctan(Z_{0i}\omega C_i) \tag{2}$$

其中，k 为波数，ω 为角频率。单根垂直导线的特性阻抗（单位为 Ω）为：

$$Z_{0i} = 60\left(\ln\frac{2h}{a} - 1\right) \tag{3}$$

其中：h 为垂直部分高度；a 为导线半径。经上述变换后，i 层辐射叶加载天线可以看成是高度为 $h_0 = h + h' = h + \sum_i h_i'$ 的无负载天线。

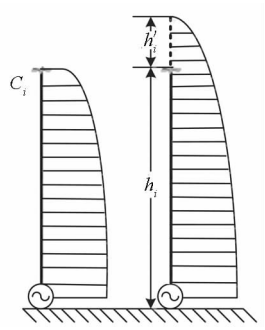


图1 辐射叶加载天线的电流分布

Fig. 1 Current distribution of the antenna loaded with radiation lobes

设天线上电流分布为：

$$I_z = I_0\frac{\sin[k(h+h'-z)]}{\sin[k(h+h')]} \tag{4}$$

式中，z 是天线上一点到输入端的距离；I_0 是输入端电流。于是有效高度为：

$$h_e = \frac{1}{I_0}\int_0^h I_z\mathrm{d}z = \frac{2\sin\left(k\dfrac{h+2h'}{2}\right)\sin\dfrac{kh}{2}}{k\sin[k(h+h')]}$$

$$= \frac{2\sin\left(k\dfrac{h+2\sum_i h_i'}{2}\right)\sin\dfrac{kh}{2}}{k\sin\left[k\left(h+\sum_i h_i'\right)\right]} \tag{5}$$

当 $(h+h')/\lambda$ 很小时，式(5)可简化为：

$$h_e \approx \frac{h}{2}\left(1 + \frac{h'}{h+h'}\right) \tag{6}$$

很明显，天线在添加多层辐射叶后的有效高度会大于无辐射叶天线，这样在不增加天线的实际高度的前提下增加了天线的有效高度，为提高天线的辐射电阻和效率提供了一种有效方法。

2 天线辐射叶结构分析

为鞭状天线添加辐射叶可以改变天线的电流分布，电流的增大可使天线的远区辐射场增大，辐射叶增大了天线体垂直部分对地的分布电容，这一分布电容可以等效为一段开路传输线加在天线体上，从而增加了天线的有效高度，提高了天线的辐射电阻，为改善天线的辐射特性提供了一种较好的方法。为了使天线获得更优的辐射特性，很有必要分析研究辐射叶的层数、半径、长度、分支数、仰角及其分布情况对天线性能的影响。

2.1 辐射叶层数对鞭状天线的影响

为了更好地研究辐射叶加载对鞭状天线的影响，在电磁仿真软件 FEKO 中建立 10 m 鞭状天线模型，频率设置为 3 ~ 30 MHz，大地介质选择无限大理想电介质导体平面，设置天线辐射叶分支的初始半径为 8 mm，初始长度为 32 cm，每个辐射叶的初始分支数为 6 根，分支初始仰角为 45°，各个辐射叶均匀分布于天线体上，辐射叶各分支间以相同夹角分布，分别取辐射叶的层数为 0、4、8、12、16（如图2所示）进行仿真计算，分别获得该天线在加载不同层数辐射叶下的 S11 曲线，如图3所示（为加强区分，使分析更加直观，只截取了谐振点附近的 S11 参数，下同）。

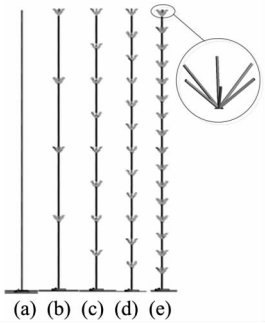


图2 不同层数辐射叶下的天线结构

Fig. 2 Antenna structure under different layer number of radiation lobe

在图3中随着辐射叶层数的增加，天线的谐振频率不断降低，不过下降的程度不断减小，其中当天线层数增加到12层之后，天线谐振频率下降

的速率明显降低,这说明辐射叶越密集,天线体垂直部分对地的分布电容越大,天线谐振频率越低,很好地提高了天线的有效高度,但天线分布电容增大的速率在不断变慢,谐振频率下降逐渐变缓,同时天线的结构也越来越复杂,天线承受的重量也越来越大。综合考虑天线整体结构的复杂性和可实行性,12 层辐射叶的设计比较合适。

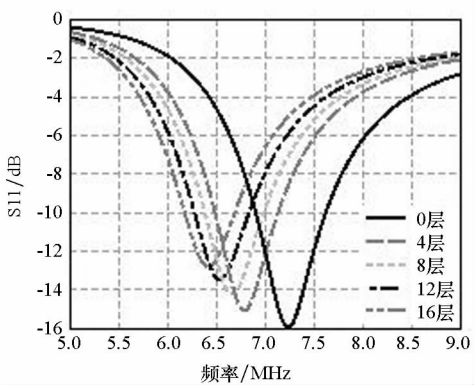


图 3　不同层数辐射叶下的天线 S11 曲线

Fig. 3　S11 curves under different layer number of radiation lobe

2.2　辐射叶半径对鞭状天线的影响

设置天线辐射叶的层数为 12 层,其他参数保持与 2.1 节不变,分别取辐射叶分支的半径为 4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm 进行仿真计算,分别获得该天线在加载辐射叶不同半径下的 S11 曲线,如图 4 所示。从图中可以看出,辐射叶的分支半径对天线的谐振频率影响不是很大,这说明辐射叶分支半径的变化对天线体电流分布的改善有一定影响,但并不是很大,随着半径的增大,天线谐振频率下降得越来越缓,当半径大于 8 mm 时,天线谐振频率的变化已经很小了。

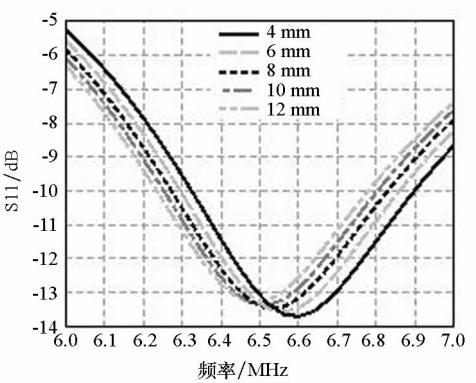


图 4　辐射叶不同分支半径下的天线 S11 曲线

Fig. 4　S11 curves under different radius of radiation lobe

2.3　辐射叶长度对鞭状天线的影响

设置天线辐射叶的层数为 12 层,辐射叶分支的半径为 8 mm,其他参数保持与 2.1 节不变,分别取天线辐射叶的长度为 24 cm、28 cm、32 cm、36 cm、40 cm 进行仿真计算,分别获得该天线在加载不同长度辐射叶时的 S11 曲线,如图 5 所示。从图中可以看出,天线辐射叶的长度越长,天线的谐振频率越小,这说明辐射叶分支越长,越有利于改善天线体的电流分布,增加的对地分布电容也越大,天线谐振频率的降低很好地提高了天线的有效高度,但并不是分支越长越好,辐射叶越长,天线承受的重量越大,所占空间越大,天线的结构也越复杂,所以此处应该折中选择。

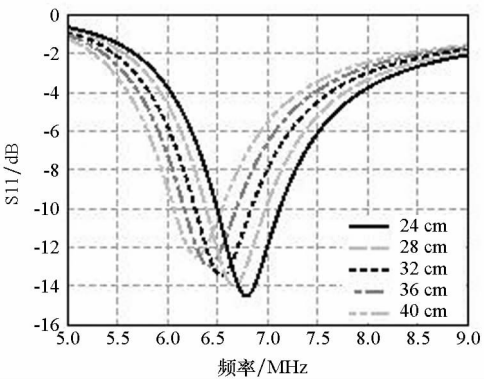


图 5　不同辐射叶长度下的天线 S11 曲线

Fig. 5　S11 curves under different length of radiating lobe

2.4　辐射叶分支数对鞭状天线的影响

设置天线辐射叶的层数为 12 层,辐射叶分支的半径为 8 mm,天线辐射叶的长度为 32 cm,其他参数与 2.1 节保持不变,分别取天线辐射叶的分支数为 3、4、5、6、7、8(如图 6 所示)进行仿真计算,分别获得该天线在不同辐射叶分支数目下的 S11 曲线,如图 7 所示。从图中可以看出,天线辐射叶分支越多,天线的谐振频率越小,但变化不是很明显,这说明辐射叶分支数的变化对天线体电流分布的改善有一定影响,但并不是很大,随着分



(a) 3 分支　(b) 4 分支　(c) 5 分支

(a) 3 branches　(b) 4 branches　(c) 5 branches



(d) 6 分支　(e) 7 分支　(f) 8 分支

(d) 6 branches　(e) 7 branches　(f) 8 branches

图 6　不同分支数的辐射叶结构

Fig. 6　Radiation lobe structure of different branch number

支数的增大,天线谐振频率下降得越来越缓,当分支数大于6时,天线的谐振频率已经减少得很少了。

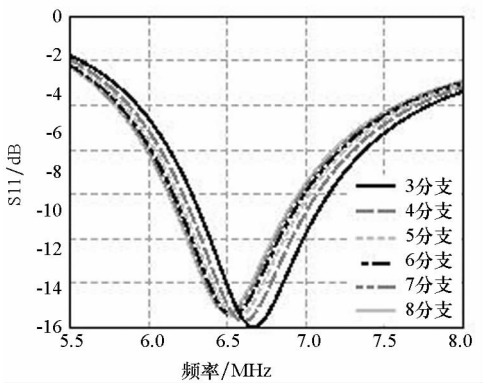


图7 不同辐射叶分支数目下的天线S11曲线

Fig. 7 Antenna S11 curves under different branch number of radiation lobes

2.5 辐射叶仰角对鞭状天线的影响

设置天线辐射叶的层数为12层,辐射叶分支的半径为8 mm,天线辐射叶的长度为32 cm,天线辐射叶的分支数为6,其他参数与2.1节保持不变,分别取辐射叶各分支的仰角为15°、30°、45°、60°、75°、90°、105°、120°、135°、150°和165°(如图8所示)进行仿真计算,分别获得该天线在不同辐射叶分支仰角下的S11曲线,如图9所示。从图中可以看出,随着天线辐射叶分支仰角的增大,天线的谐振频率先逐渐变小后又逐渐变大,这说明天线辐射叶的仰角变化对天线的电流分布影响很大,辐射叶仰角越接近水平方向,天线体垂直部分对地的分布电容越大,天线的谐振频率越低,有效高度越高,天线上的分布电流增大将增大天线的辐射电阻,有效增大天线的远区辐射场。在仰角为90°时,天线的谐振频率降到最低。

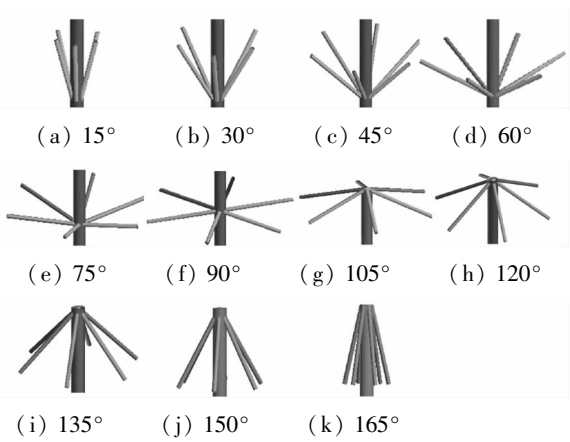
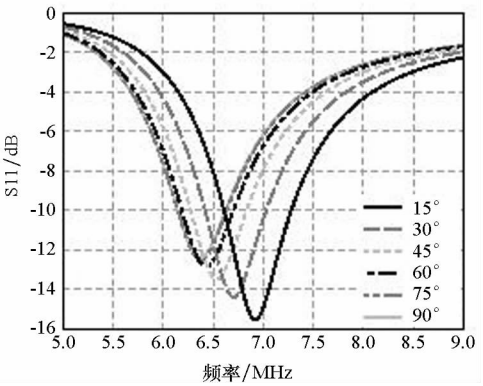
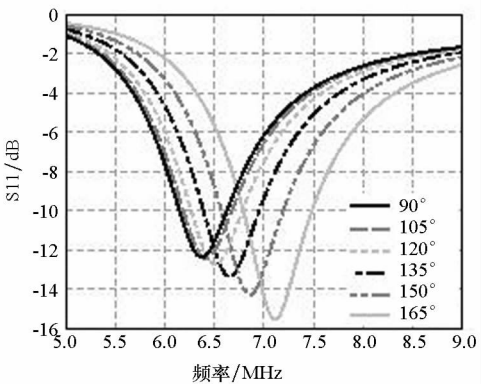


图8 不同分支仰角的辐射叶结构

Fig. 8 Radiation lobe structure with different branch elevation angles



(a) 15°~90°



(b) 90°~165°

图9 不同辐射叶分支仰角下的天线S11曲线

Fig. 9 Antenna S11 curves under different radiation lobe branch elevation

2.6 辐射叶分布对鞭状天线的影响

为了进一步简化天线的结构,有效地减少辐射叶的数目,可以讨论分析天线辐射叶在天线体上的分布情况对天线辐射特性的影响。分别设置如图10所示的天线辐射叶分布结构,经仿真计算获得如图11所示的不同辐射叶分布下的天线S11曲线。由图可以看出,在辐射叶间距保持一定的情况下,辐射叶分布越集中于天线体上部分时,天线的谐振频率越小,在12层辐射叶均匀分布时,谐振频率最小,去掉天线体上部的辐射叶对天线影响很大,去掉天线体下部分的辐射叶对天线的影响很小,这说明在天线上段添加辐射叶对天线电流分布的改善起主要作用,这是因为:无辐射叶的鞭状天线越靠近天线顶端,其分布电流越小,天线顶端为开路点,导致天线顶端的电流为零,天线的有效高度较低,辐射电阻较小,辐射性能较差;添加辐射叶不仅使天线顶端的电流不为零,还改善了天线中上段的电流分布,却对天线下段的电流分布影响不大。综合以上考虑,选取如图10(g)所示的上段拥有7层辐射叶的结构较佳。

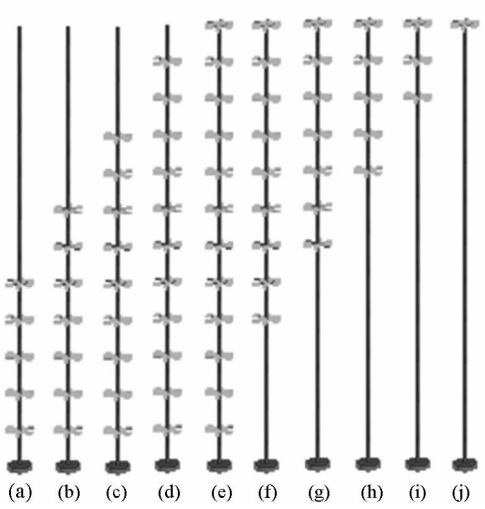
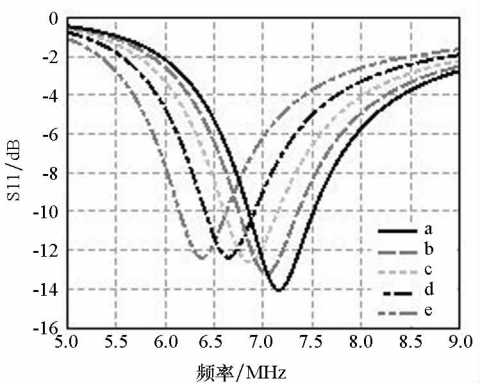
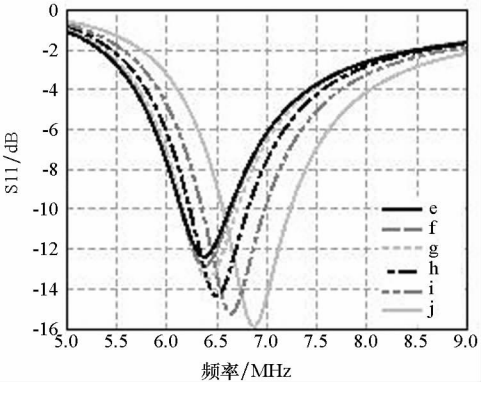


图 10　辐射叶不同分布下的天线结构

Fig. 10　Antenna structure with different distribution of radiation lobes



(a) a ~ e



(b) e ~ j

图 11　不同辐射叶分布下的天线 S11 曲线

Fig. 11　Antenna S11 curves under different radiation lobe distribution

3　天线设计

3.1　天线结构

第 2 节通过分析辐射叶层数、半径、长度、分支数、仰角及其分布情况对 10 m 短波鞭状天线的电气性能的影响,在尽量满足天线小型化、结构简单的前提下,可以为该天线选择适当的辐射叶结构参数。综上考虑,可以设置该天线辐射叶的分布层数为上部分 7 层,分支半径为 8 mm,长度为 32 cm,分支数为 6,仰角为 90°,如图 12 所示。

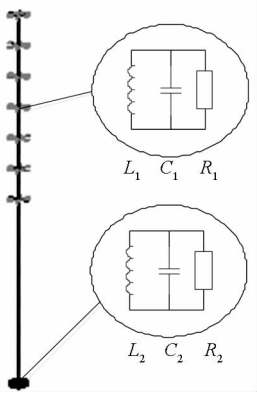


图 12　天线的加载结构

Fig. 12　Loading structure of antenna

为进一步平缓输入阻抗随频率的变化程度和实现天线与馈线的阻抗匹配,在天线体上距离顶端 2.5 m 处和底端分别添加 RLC 加载网络,并在天线底端添加“T”形宽带匹配网络[12],由宽带传输线变压器和 LC 网络组成,如图 13 所示。

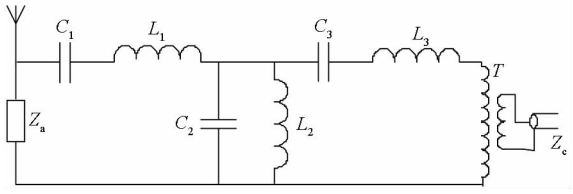


图 13　天线的宽带匹配网络

Fig. 13　Broadband matching network of antenna

3.2　天线优化

按照图 12 和图 13 的结构建立 10 m 鞭状天线的模型,频率设置为 3 ~ 30 MHz,频率间隔设置为 0.5 MHz,采用 IWO 算法对天线进行加载网络和宽带匹配网络的参数优化,在保证尽可能多的频点的驻波比小于 3 的前提下,提高天线的增益,优化值分别如表 1、表 2 所示。

表 1　加载元件优化值

Tab. 1　Optimal values of loading element

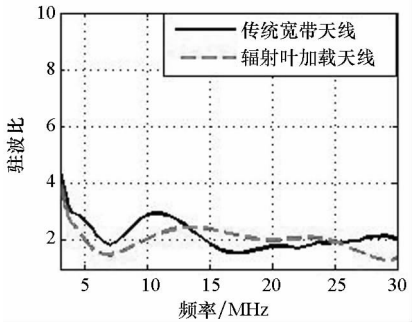
R_1/Ω	$L_1/\mu H$	C_1/pF	R_2/Ω	$L_2/\mu H$	C_2/nF
1200	280	2.7	280	308	20.8

表 2　匹配网络元件优化值

Tab. 2　Optimal values of matching network components

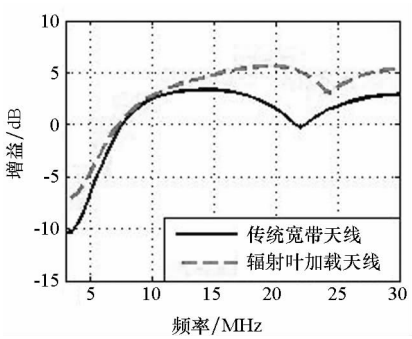
L_1/nH	$L_2/\mu H$	L_3/nH	$C_1/\mu F$	C_2/pF	$C_3/\mu F$
300	4.5	180	340	114	680

添加了 7 层辐射叶的 10 m 短波宽带鞭状天线经加载和匹配网络优化后获得的驻波比、增益和效率曲线如图 14 所示，水平和垂直方向图如图 15所示，并分别与传统宽带鞭状天线（无辐射叶）相比较，其中增益曲线代表的是最大方向的增益。



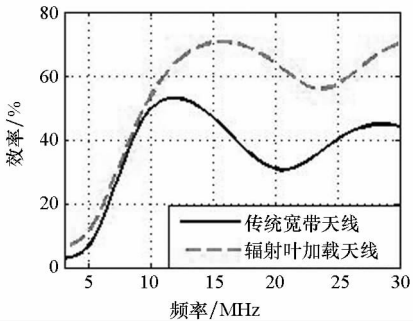
（a）驻波比

（a）Voltage standing wave ratio



（b）增益

（b）Gain



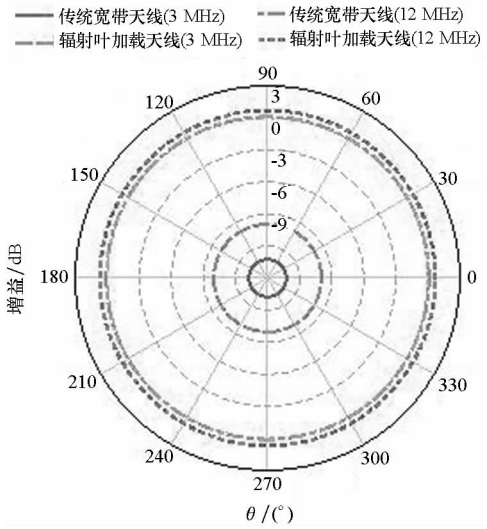
（c）效率

（c）Efficiency

图 14　天线添加辐射叶前后电性能对比

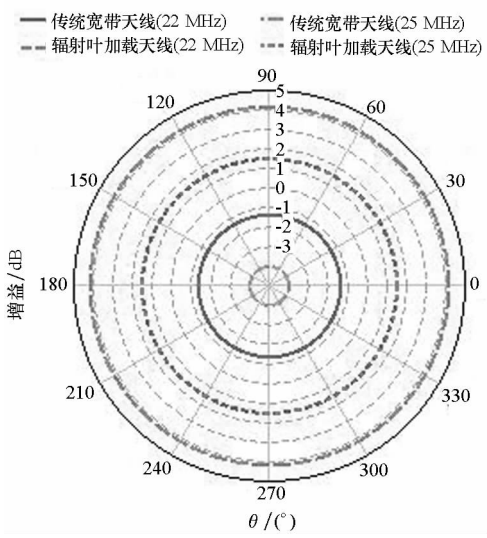
Fig. 14　Comparison of electrical properties before and after adding radiation lobes

从图 14 可以看出，天线在添加辐射叶后驻波比全部小于 3. 5，至少 99% 频点的驻波比小于 3，与未添加辐射叶的天线驻波比相比略有波动，但整体趋势相差不大；天线在添加辐射叶后增益全部大于 −7 dB，在低频段最高提高了 3 dB，高频段的增益提高得非常明显，平均值为 5 dB，最高提高了 5 dB；天线在添加辐射叶后的最低效率由 3% 提高到了 8%，中高频段的效率提高得很大，平均值高达 60% 以上，最高提高了 35%。从图 15中可以看到，所提天线水平方向图始终保持



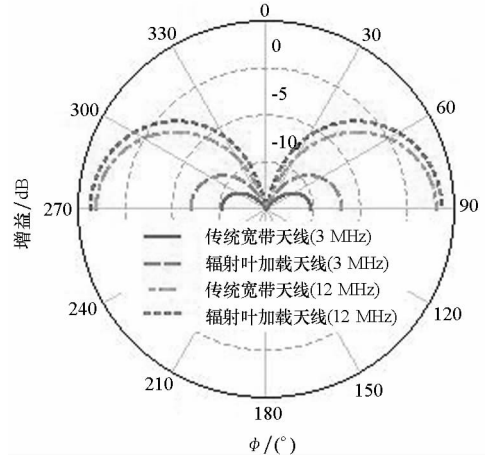
（a）水平方向图（3 MHz 和 12 MHz）

（a）Horizontal pattern（3 MHz and 12 MHz）



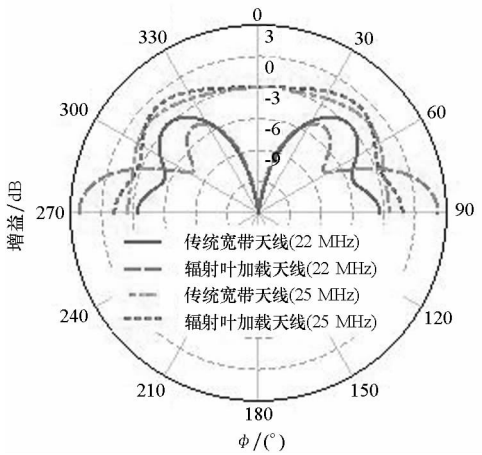
（b）水平方向图（22 MHz 和 25 MHz）

（b）Horizontal pattern（22 MHz and 25 MHz）



（c）垂直方向图（3 MHz 和 12 MHz）

（c）Vertical pattern（3 MHz and 12 MHz）



(d) 垂直方向图(22 MHz 和 25 MHz)

(d) Vertical pattern(22 MHz and 25 MHz)

图 15　天线添加辐射叶前后方向图对比

Fig. 15　Comparison of radiation patterns before and after adding radiation lobes

全向,垂直方向图在中低频段呈半个“∞”状,当在频率为 23 MHz 时,天线的主瓣率方向才发生改变,而传统宽带天线在 21 MHz 时就已经改变了,因此所提辐射叶加载天线还能有效抑制主瓣偏离水平方向。

图 16 描述了辐射叶加载天线在不同频率下天线体上的电流分布,其分段按从天线顶端到底端编号。考虑到天线的横向面积和结构的复杂度,辐射叶的长度只有 32 cm,相对 10 m 高的天线来说已经很短了,其水平方向上的电流非常小,水平辐射可以忽略不计,此种辐射叶结构不仅使天线在低频段的电流得到改善,高频段的电流也得到大幅提升,使得高频段天线的增益和效率改善得比较明显。

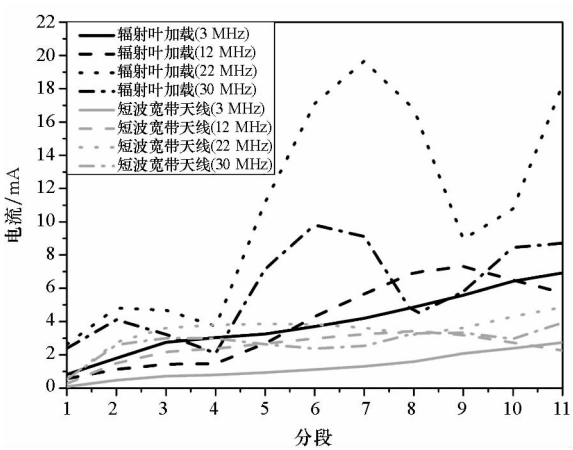


图 16　不同频率下天线体上电流分布

Fig. 16　Current distribution at different frequency

总而言之,短波宽带鞭状天线的多层辐射叶结构能在相对较好的驻波比下有效地提高天线的增益和效率,有效抑制天线的方向图上翘,此种结构能为进一步优化短波宽带鞭状天线的辐射性能提供一种有效的方法。

4　结论

从天线顶加载的角度出发,为天线体添加了多层辐射叶,对辐射叶的层数、半径、长度、分支数、仰角及其分布情况对天线性能的影响展开了研究,降低了天线的谐振频率,并为 10 m 鞭状天线设计了一款新型的辐射叶结构,同时为天线进行了加载网络和宽带匹配网络的 IWO 算法优化。仿真结果表明,在保证驻波比良好的前提下,天线增益和效率得到了较大的提高,天线的方向图上翘得到了有效抑制,天线的辐射能力也得以增强,充分说明此款新型辐射叶结构设计是鞭状天线实现小型化和高效率的一种有效技术。

参考文献(References)

[1] Davis W A, Stutzman W L. Antenna theory[M]// Chang K. Encyclopedia of RF and microwave engineering. USA: Wiley-Interscience, 2005.

[2] Simpson T L. The disk loaded monopole antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2004, 52(2): 542 - 550.

[3] Jou C F, Wu J W, Wang C J. Novel broadband monopole antennas with dual-band circular polarization [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2009, 57(4): 1027 - 1034.

[4] Jiang Z H, Hong W. Design and experiments of bandwidth-controllable broadband monopole antennas with conformal anisotropic impedance surface coatings [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(3): 1133 - 1142.

[5] Rogers S D, Butler C M, Martin A Q. Design and realization of GA-optimized wire monopole and matching network with 20 : 1 bandwidth[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(3): 493 - 502.

[6] Petko J S, Werner D H. Miniature reconfigurable three-dimensional fractal tree antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(8): 1945 - 1956.

[7] Wang C F, Kong L B, Hu F G, et al. Electrically small magneto-dielectric coated monopole antenna at HF band[C]// Proceedings of IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 2012.

[8] Connor W A. Top loaded disk monopole antenna: US7265727 B2[P]. 2007 - 09 - 04.

[9] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. Ecological Informatics, 2006, 1(4): 355 - 366.

[10] Mallahzadeh A R R, Oraizi H, Davoodi-Rad Z. Application of the invasive weed optimization technique for antenna configurations[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 79: 137 - 150.

[11] 王衡峰, 柳超, 吴华宁. 基于入侵性野草算法的短波宽带鞭状天线优化[J]. 无线电工程, 2016, 46(11): 63 - 67.
WANG Hengfeng, LIU Chao, WU Huaning. HF wideband whip antenna optimization based on invasive weed optimization algorithm[J]. Radio Engineering, 2016, 46(11): 63 - 67. (in Chinese)

[12] 柳超, 刘其中, 梁玉军, 等. 舰用短波宽带鞭状天线研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(6): 955 - 958.
LIU Chao, LIU Qizhong, LIANG Yujun, et al. Design of broadband shipboard whip-type antenna at high frequency band[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21 (6): 955 - 958. (in Chinese)