

文章编号 1005-0388(2005)05-0647-04

# 螺旋天线的快速分析及宽带化设计<sup>\*</sup>

周 斌 刘其中 郭景丽

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,  
zhoubin\_zhb@163.com, 陕西 西安 710071)

**摘要** 研究了一种快速计算螺旋天线电特性的新方法,并结合遗传算法对天线进行了宽带、小型化设计。采用直线段对法向模螺旋天线进行划分,应用合成基函数及合成检验函数的矩量法对阻抗矩阵进行了降阶处理,节省了求解矩阵方程所需的时间和存储量。结合遗传算法对加载法向模螺旋天线上的加载集总元件的值、加载位置以及匹配网络参数进行一体化优化设计,并采用 Sherman-Morrison-Woodbury 公式快速求解加载后的矩阵方程,提高了优化设计的效率。最后,成功设计了一副工作在 100~1000MHz 的宽带小型化螺旋天线。

**关键词** 法向模螺旋天线, 矩量法, 合成基函数, 合成检验函数, 遗传算法

中图分类号 TN823<sup>+</sup>.31 文献标识码 A

## Fast analysis and broadband design of the helical antenna

ZHOU Bin LIU Qi-zhong GUO Jing-li

(National Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Xidian University,  
zhoubin\_zhb@163.com, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract** A fast algorithm is investigated for calculating the electric characteristics of a helical antenna, and the broadband miniature helical antenna is designed by Genetic Algorithm (GA). The piecewise-straight segments are used to model the normal mode helical antenna (NMHA), which can be analyzed by method of moments (MoM) with the Composite basis functions and the Composite testing functions. With the reducing of the rank of the impedance matrix, the CPU time and the memory storage will significantly saved. Then the loading circuit parameters, locations of the loads, and matching network parameters are optimized simultaneously by GA. With the application of The Sherman-Morrison-Woodbury formula in the load impedance matrix equation, the optimization efficiency will be improved. Finally, a broadband miniature helical antenna working on 100~1000MHz frequency band is successfully designed.

**Key words** normal mode helical antenna (NMHA), method of moments, composite basis function, composite testing functions, genetic algorithm(GA)

## 1 引言

随着军事及民用通信的发展,通信设备的小型

化要求进一步提高,对天线小型化技术也有了更高的要求。法向模螺旋天线(NMHA)是实现天线小型化的主要技术之一。螺旋天线的辐射特性主要取

\* 收稿日期:2004-05-09

决于螺旋的直径与波长的比值,当小于 0.18 时,这类天线称为法向模螺旋天线(又称基模螺旋天线)。它可有效的降低天线的高度,实现天线的小型化。

通常,采用直线分段的矩量法可以分析任意结构的线天线,但计算曲线上的电流分布需要相当多的分段数,进而会产生阶数很高的阻抗矩阵,而求解高阶矩阵方程时需要很长时间,且占用很大的存储量。文中介绍了一种新的求解曲线积分方程的有效方法<sup>[4,5]</sup>,把通常采用的基函数和检验函数线性的合成新的合成基函数及合成检验函数,这样能大幅度地降低矩阵阶数,减少运算时间和存储量。然后结合遗传算法快速优化设计一副宽带加载法向模螺旋天线,通过与工作在同一频段的单鞭加载天线的比较,显示了法向模螺旋天线的小型化特点。

## 2 宽带化设计原理

宽频带天线可以定义为其输入阻抗在约一倍或更宽的频带内无显著变化的天线。展宽线天线工作带宽的主要方法是在天线上合适的位置插入阻抗元件,其目的是为了改善天线中的电流分布,使之尽可能地接近行波状态,以展宽工作频带。由于加载天线的加载元件、加载位置会影响天线的电性能,合理地选择这些参数值显得尤为重要。只要加载位置适当,加载元件合适,并在相当宽的频率范围内保持天线沿线或部分线段中电流接近行波状态,就可保证天线的输入阻抗随频率的变化不大。为了获得更好的宽带特性,可以在天线输入端加上一个合适的宽带匹配网络,进一步改善天线的阻抗特性及电流分布。

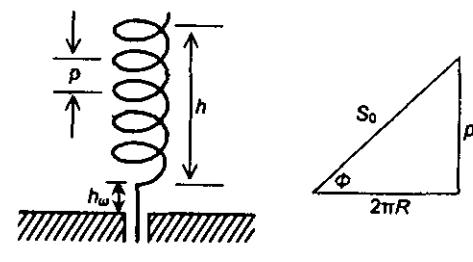
借助于全局最优化算法——遗传算法来优化设计加入集总负载和宽带匹配网络的法向模螺旋天线,设计一副性能优越的超短波超宽带天线,很好的满足现代通信技术的要求。

## 3 螺旋天线的快速分析<sup>[4,5]</sup>

圆柱螺旋天线的几何结构如图 1 所示,图中  $R$  是螺旋半径,  $p$  是螺距,  $\Phi$  是螺距角,  $a$  是螺旋线半径,  $S_0$  是一圈螺旋线的长度,  $h$  是螺旋线的高度,螺旋线圈数为  $\nu$ 。图 1 所示的天线是由  $\nu$  圈螺旋线与一段长为  $h_w$  的直线段相连接组成,直线段与特性阻抗为  $50\Omega$  的同轴线馈源内芯相连。

螺旋天线上的电流采用合成三角基函数展开如下

$$I(l)\hat{\mathbf{I}}(l) \approx \sum_{q=1}^{\bar{N}} \bar{I}_q \tilde{\Lambda}_q(l) \hat{\mathbf{I}}_q(l) \quad (1)$$



(a) 螺旋结构 (b)螺旋结构几何分析

图 1

选取如下所示的合成脉冲函数

$$\tilde{\Pi}_p(l) = \sum_{k=1}^{\tau} u_k^p \Pi_k^p(l) \quad (2)$$

为检验函数,其中

$$\Pi_k^p(l) = \begin{cases} 1, l \in (l_k^p, l_k^{p+}), \\ 0, otherwise \end{cases}$$

$u_k^p$  等于 1 或者 0

采用电场积分方程,经推导可得如下矩阵方程

$$[\tilde{\mathbf{Z}}_{pq}][\tilde{\mathbf{I}}_q] = [\tilde{\mathbf{V}}_p] \quad (3)$$

经过降阶后,阻抗矩阵的阶数由原来的  $N \times N$  降为  $\tilde{N} \times \tilde{N}$ <sup>[4,5]</sup>,这种方法有效地降低了阻抗矩阵的阶数,节约了存储空间,减少了求解阻抗矩阵方程所用的时间<sup>[4,5]</sup>。

## 4 加载法向模螺旋天线的优化设计

在天线适当的位置上插入集总元件,假设集总加载元件位于合成基函数间的节点处,应用电场积分方程(EFIE),矩阵方程可写为

$$\mathbf{ZI} = (\mathbf{Z}^0 + \mathbf{Z}^L)\mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (4)$$

式中  $\mathbf{Z}$  是上述降阶后  $\tilde{N} \times \tilde{N}$  阶阻抗矩阵,  $\mathbf{I}$  是  $\tilde{N}$  维电流系数向量,  $\mathbf{V}$  是  $\tilde{N}$  维激励向量,  $\mathbf{Z}^0$  是不加载天线的阻抗矩阵,  $\mathbf{Z}^L$  是一个对角矩阵,其中元素为

$$Z_{pq}^L = \sum_{i=1}^M Z_i^L \delta_{p, q_i^L} \delta_{q, q_i^L} \quad (5)$$

式中  $Z_i^L$  表示在节点  $q_i^L$  ( $i = 1 \dots M$ ) 处的加载阻抗值,  $M$  是加载个数。  $\mathbf{Z}^L$  可分解为  $\mathbf{Z}^L = \mathbf{UW}^T$ , 式中  $\mathbf{U}, \mathbf{W}$  都是  $\tilde{N} \times M$  阶矩阵, 定义为

$$\mathbf{u}_{pi} = Z_i^L \delta_{p, q_i^L}, \mathbf{w}_{qi} = \delta_{q, q_i^L} \quad (6)$$

应用 Sherman-Morrison-Woodbury 公式,求解(7)式可得

$$\mathbf{I} = (\mathbf{Z}^0 + \mathbf{Z}^L)^{-1} \mathbf{V} = \mathbf{Z}^{0^{-1}} \mathbf{V} - \mathbf{Z}^{0^{-1}} \mathbf{U} \cdot (\hat{\mathbf{I}} + \mathbf{W}^T \mathbf{Z}^{0^{-1}} \mathbf{U})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{Z}^{0^{-1}} \mathbf{V} \quad (7)$$

式中  $\hat{\mathbf{I}}$  表示  $M \times M$  阶单位矩阵。可以看出,只需预先计算出所有频点上的  $\mathbf{Z}^{0^{-1}}$ ,就可以很容易计算(7)式的右侧,显然需要求逆的矩阵阶数为  $M \times M$ 。

因为  $M$  远小于  $\tilde{N}$ , 所以矩阵方程的求解速度大大提高, 天线的优化效率也得以提高。

利用以上快速计算加载天线的方法就可以快速优化设计任意加载和匹配网络的法向模螺旋天线了。笔者采用近年来广泛使用的智能全局优化算法——遗传算法来优化设计加载法向模螺旋天线。

在设计天线时, 希望在满足天线增益指标的情况下, 去获取最小的天线驻波比 VSWR。为兼顾上述两项指标, 建立了如下用于法向模螺旋天线优化设计的目标函数

$$F = \max \begin{cases} -\max V - \alpha [G_0 - \min G] & \min G \leq G_0 \\ -\max V & \min G > G_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\max V$  表示天线带内最大电压驻波比,  $\min G$  表示天线带内最小系统增益,  $\alpha$  是一个常数, 称作罚因子, 不同问题需在优化计算的过程中予以调整和确定,  $G_0$  为设计指标所容许的最小系统增益值。系统增益定义为

$$G = G^a(\theta = 90^\circ) + 10 \log_{10}(1 - |\Gamma|^2) \text{ dB} \quad (9)$$

$G^a$  是天线的功率增益,  $\Gamma$  是天线的匹配网络输入端的电压反射系数。

## 5 数值结果

下面用一个优化设计的例子来说明以上方法的应用。选定的法向模螺旋天线的结构参数为  $a = 0.003 \text{ m}$ ,  $R = 0.01 \text{ m}$ ,  $p = 0.055 \text{ m}$ ,  $h_w = 0.03 \text{ m}$ ,  $h = 0.275 \text{ m}$ ,  $\nu = 5$ 。常用的加载集总元件为电阻、电容和电感, 选用合适的加载值和加载位置, 并加上合适的宽带匹配网络可以极大的展宽天线的工作带宽, 如图 2 所示,  $h_i^L$  是第  $i$  个加载的位置。

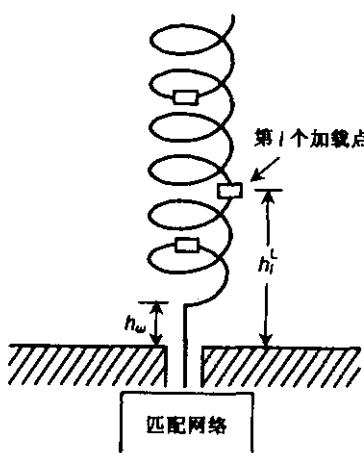


图 2 加载法向模螺旋天线

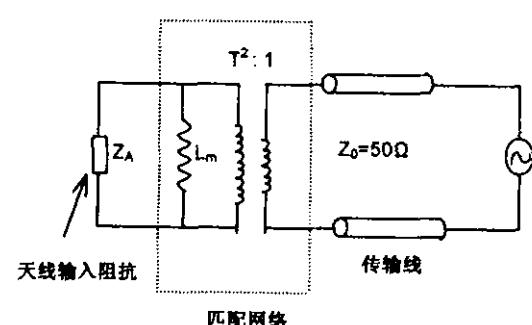


图 3 匹配网络

未加载天线在  $100 \sim 1000 \text{ MHz}$  范围内的电特性如图 4 和图 5 所示, 驻波比远高于 3, 特别是在频率低端, 驻波比非常大; 而天线在  $650 \sim 850 \text{ MHz}$  附近系统增益也很小, 达到  $-13 \text{ dB}$ , 显然没有达到指标要求, 优化设计成为必然。

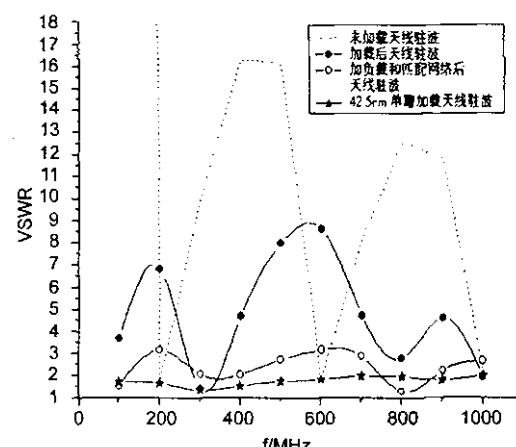


图 4 天线的驻波特性

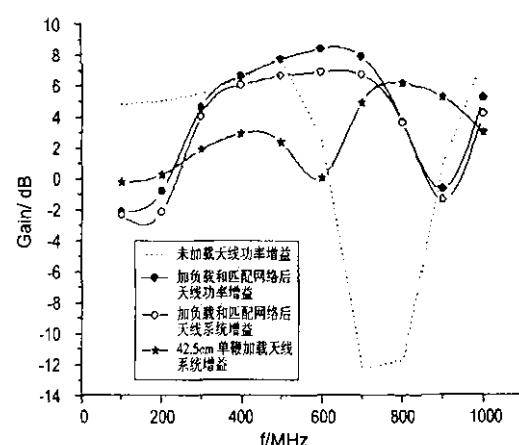


图 5 天线的增益特性

优化设计中采用 RLC 并联电路作为加载形式, 匹配网络采用图 3 的形式。经过遗传算法的优化设计,

所得到的加载元件的值、加载位置如表 1 所示,匹配网络中各参数值分别为  $L_m = 520.4\text{nH}$ , 传输线变压器变压比  $T = 1.71$ 。

表 1 加载的位置和元件值

加载位置/m	电阻值/ $\Omega$	电感值/nH	电容值/pF
1# 加载	0.197	1866.5	181.7
2# 加载	0.202	756.7	280.0
3# 加载	0.231	520.5	386.1

由图 4,5 可以看出,由于加载后天线的阻抗特性得到了改善,改变了天线上的电流分布,天线在整个频带内的驻波及增益特性得到极大的改善,满足驻波比  $VSWR < 3.0$ , 增益  $Gain > -2.0\text{dB}$ 。并且通过比较,在满足相同要求的条件下,单鞭加载天线的设计高度达到  $0.425\text{m}$ , 线径为  $0.006\text{m}$ , 而螺旋高度仅为  $0.275\text{m}$ , 很明显加载法向模螺旋天线更能达到小型化、宽频带的要求。

## 6 结论

文章中采用直线段对法向模螺旋天线进行划分,应用合成基函数及合成检验函数的矩量法对阻抗矩阵进行了降阶处理,进而节省了求解矩阵方程所需的时间和存储量,然后结合遗传算法对法向模螺旋天线进行了加载和加匹配网络的一体化优化设计,成功设计了一副工作在  $100\sim1000\text{MHz}$  频段上的宽带小型化天线,对短波、超短波天线小型化宽带化的设计具有重要的现实指导意义,提高了法向模螺旋天线在现代无线移动通信中的实用价值。

## 参考文献

- [1] 王元坤, 李玉权. 线天线的宽频带技术 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [2] 康行健. 天线原理与设计 [M]. 国防工业出版社, 1995.
- [3] R F Harrington. Field Computation by Moment Methods [M]. Malabar, FL: Krieger, 1968.
- [4] Shawn D Rogers. An efficient curved-wire integral equation solution technique [J]. IEEE Trans. AP, Junuary 2001, 49(1): 70~79.

[5] 周斌, 纪奕才, 刘其中. 快速计算法向模螺旋天线的电特性 [J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(3): 409~412.

[6] 孙保华, 刘其中, 焦永昌, 等. 快速计算套简单极子天线 [J]. 电波科学学报, 2000, 15(4): 517~521.

B H Sun, Q Z Liu, Y C Jiao, et al.. Efficient computation of sleeve monopole antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(4): 517~521.

[7] Boag A, Michielssen E, Mittra R. Design of electrically loaded wire antennas using genetic algorithms [J]. IEEE Trans on AP, 1996, 44(5): 687~695.

[8] G J Burke and A J Poffio. Numerical electro-magnetics code (NEC) —— method of moments [R]. Rep. UCID 18834, Lawrence Livermore Lab., CA, Jan. 1981.



周斌 (1978—), 男, 陕西人, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所博士生, 主要研究方向为天线数值计算、短波超短波宽带小型化天线研究、电磁散射及电磁兼容等。



刘其中 (1938—), 男, 重庆人, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所教授、博士生导师, 在国内外刊物上发表论文 100 多篇, 主要研究方向为天线数值计算与 CAD, 宽带小型化天线和智能天线、电磁散射以及电磁兼容等。



郭景丽 (1979—), 女, 山西人, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所博士研究生, 主要研究方向为天线数值计算、电磁散射和电磁兼容等。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>