

一种高频雷达天线的快速分析方法

向迎春¹, 曲长文¹, 苏 峰¹, 李 楠¹, 周伟江²

(1. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001;

2. 中国人民解放军92493部队 装备部, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 针对高频雷达天线设计中电磁计算耗时长的问题, 提出利用高效的多层快速多极子算法(MLFMA)计算以二元八木天线为基本单元的阵列天线电磁特性参数。根据某高频雷达天线的技术指标, 利用数值优化理论优化阵列天线性能, 优化后的阵列天线满足了相应的指标要求。仿真结果表明, MLFMA 计算高频雷达天线的电磁参数是高效可靠的, 能为天线的高效紧凑设计提供指导和参考。

关键词: 高频雷达; 阵列天线; 多层快速多极子算法; 数值优化天线设计

中图分类号: TN822.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-7649(2011)07-0108-04 **DOI:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2011.07.027

A fast and efficient method for antenna of HF radar

XIANG Ying-chun¹, QU Chang-wen¹, SU Feng¹, LI Nan¹, ZHOU Wei-jiang²

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 92493 of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: Aiming at the time-consuming problem of electromagnetism computation in designing antenna of HF radar, and based on fast and efficient multi-level fast multi-pole algorithm(MLFMA), a new analytical method for calculating electromagnetic parameters of array antenna which consists of two-element Yagi-Uda is presented in this paper. According to the index required for array antenna of HF radar, performance of array antenna through numerical optimization theory is optimized. And performance of optimized array antenna can meet the required index. Results of stimulation indicate that MLFMA algorithm is fast and effective in calculating electromagnetic parameters of HF radar antenna, which can play a guiding role and provide reference for compact antenna design of high performance.

Key words: HF radar; array antenna; MLFMA; antenna design by numerical optimization

0 引言

高频雷达利用垂直极化的高频电磁波(3~30 MHz)沿海面绕射实现对海面舰船和中/低空目标的探测, 具有远程预警、反隐形、反超低空突防、抗反辐射导弹等优点, 被视为远程预警理想而又经济的替代品, 在海防武器系统中占有重要的地位; 其未来将向舰载、多站、天地波合一的高频雷达体制发展^[1~2]。通过选择和优化阵单元的结构形态排列方式和馈电幅相特性, 阵列天线能实现单个天线难以提供的优异

特性而广泛应用于高频雷达。雷达确定目标方向的通常办法是形成很窄的波束, 天线口径为许多个波长大。当这种波束形成方法用于高频雷达时, 需要相控阵天线长度(口径)为几 km, 如澳大利亚的JINDALEE 的接收天线阵长为 2.8 km; 即便是窄波束高频雷达, 如加拿大的HF-GWR 的接收天线阵长也有 880 m^[3]。由于天线分析可能在整个优化过程中反复进行, 精确且快速的天线分析算法对于缩减天线设计的时间开销至为重要。矩量法(MOM)基于格林函数求解麦氏方程组, 自动满足辐射边界条件, 简化

收稿日期: 2010-07-09; 修回日期: 2010-09-08

作者简介: 向迎春(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电子对抗、情报信息获取与处理。

了求解问题的误差累积,因而精度高,但耗时较长。作为 20 世纪十大算法之一的多层次快速多极子算法(MLFMM),虽然以 MOM 为基础,但运算效率远远高于 MOM。因而 MLFMM 算法广泛应用于复杂目标的电磁特性分析,在阵列天线分析中的性能非常好。

1 天线模型构造

1.1 天线几何模型

目前,几何图形软件很多,常用的有 Auto CAD, 3DS Max, Ansys 和 GiD 等,通过这些软件,一般只需目标的点、线、面、体等几何元素信息,经过一系列平移、旋转以及并、交、差等操作即可产生所需的模型。由 8 组二元八木天线组成的线天线阵列,其 CAD 模型如图 1 所示,天线单元沿 V 轴正方向从左至右依次编号为 1~8。

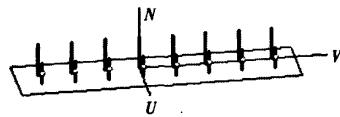


图 1 阵列天线模型示意图

Fig. 1 The sketch map of array antennas model

1.2 天线电磁模型

天线电磁建模就是对 MLFMA 算法中基函数和权函数的选择。通常选取基函数和权函数一致,即采用 Galerkin 方法。对应不同的单元类型,需要在单元上定义适合的基函数,即为未知电流的一个数学完备展开。由 Rao, Wilton 和 Glisson 于 1982 年提出的定义在相邻平面三角贴片上的 RWG 基函数,用共棱的三角形对为基本面元来模拟导体表面。任何 1 个三角形所对应的 3 个棱电流在该三角形内线性叠加,并用来近似三角形块内分布的任意大小和方向的定长矢量电流分布。对于大型阵列天线如美国海军使用的可再定位超视距雷达(ROTHR),天线上的电流分布为面分布,因此本文采用适合表面电流为面分布的 RWG 基函数,其表达式为^[4]:

$$RWG_n(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2a_n^+} \rho_n^+, & r \in t_n^+; \\ \frac{l_n}{2a_n^-} \rho_n^-, & r \in t_n^-; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_n^+ 和 t_n^- 为共棱三角形对; l_n 为公共棱边; a_n^+ 和 a_n^- 分别为两三角形的面积; ρ_n^+ 和 ρ_n^- 分别为两三角形内点的位置矢量。

2 MLFMA 算法

MLFMA 采用多层次分区计算,基于树形结构,具有逐层聚合、逐层转移、逐层配置、嵌套递推的特点^[5-7],其复杂度只有 $O(N \log N)$ (MOM 的复杂度为 $O(N^2)$), N 为未知量的个数。其层次划分采用立方体包围三维目标,将第一层分成 8 个子立方体;每个子立方体再细分为 8 个更小的子立方体,然后增加层数直到最细层满足边长小于半个波长为止。在未知量数目 $N \geq 5 \times 10^4$ 时,MLFMA 的高效率尤为突出。

对理想导体,其电场积分方程为:

$$-\frac{k\eta i}{4\pi} \int \bar{G}(r, r') \cdot J(r') dS = \hat{i} \cdot E^i(r), \quad (2)$$

式中: \hat{i} 为 S 上的正切向量; E^i 为入射场; η 为自由空间波阻抗; $\bar{G}(r, r')$ 为并矢格林函数,其表达式为:

$$\bar{G}(r, r') = [\bar{I} - \frac{1}{k^2} \nabla \nabla'] \frac{e^{ik|r-r'|}}{|r-r'|}. \quad (3)$$

根据式(1)导体表面电流可表示为:

$$J(r) = \sum_{n=1}^N a_n RWG_n(r), \quad (4)$$

则运用 Galerkin 法得到快速多级子算法(FMM)的线性积分方程为:

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} a_n = V_m, \quad m = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

其中

$$Z_{mn} = -\frac{k\eta i}{4\pi} \int_{S_m} \int_{S_n} [RWG_m \cdot RWG_n - \frac{1}{k^2} \nabla \cdot RWG_m \nabla' \cdot RWG_n] \cdot g(r, r') dS' dS, \quad (6)$$

$$V_m = \int_{S_m} RWG_m \cdot E^i(r) dS. \quad (7)$$

MLFMA 是在 FMM 基础上的分层推广,由此得到 MLFMA 的表达式

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} a_n = \sum_l \sum_{n \in G_l} Z_{mn} a_n + \frac{15k^2}{2\pi} \int d^2 \hat{k} V_{ml}(\hat{k}) \times \sum_l \alpha_{ll'}(\hat{k} \cdot \hat{r}_{ll'}) \sum_{n \in G_l} V_{ml}^*(\hat{k}) a_n, \quad m \in G_l. \quad (8)$$

其中: $V_{ml}(\hat{k})$, V_{ml} , $\alpha_{ll'}$ 分别代表配置因子、聚合因子和转移因子; * 表示取共轭。在计算远区电流的相互作用中先将子层中心聚合到父层中心,然后将内向波由父层配置到子层,再逐层转移下去。文献[5]给出了详细的求解过程,在此不再赘述。

3 仿真分析

为了能实时监视 200 km 内沿岸海域的舰船、低空

飞机、海洋表面流和风浪场,同时考虑到实际的海岸条件,某高频超视距雷达天线要求发射天线增益前后比最大,驻波比小于 2;天线阵长不大于 120 m,天线阵 H 面方向图的半功率宽(角分辨率)不大于 35° ^[8]。

3.1 阵列天线仿真

对孤立的单元天线,文献[9]计算了基于矩量法的 H 面天线方向图。在阵列天线的设计之初,很多参数我们是不知道的。不妨假定如图 1 所示的天线阵有源振子长 10 m,无源振子长 15 m,两振子间距为 10 m,单元天线间距为 15 m,仿真频率为 7.5 MHz。不失一般性设各单元天线激励的不同,则尽管阵列天线的物理结构对称,但处于对称位置的单元参数却不同。对它的特殊情况即激励相同时,对称位置参数相同。激励不同时,阵列各单元天线馈源的输入阻抗幅值如图 2(a)所示,相位分布如图 2(b)所示;相应的驻波比和阵列方阵列方向图如图 3 所示。图 3 同时给出了 MOM 和 MLFMA 计算的天线 H 面方向图。计算配置为普通台式机,主频 2.6 GHz,内存 2 GB。在网格剖分相同的情况下,MOM 耗时 5.6 s,使用内存 8 MB;MLFMA 耗时 3.6 s,使用内存 7.6 MB。从 H 面的方向图仿真结果可以看出 MOM 和 MLFMA 精度相当,虽然二者内存使用相差不大,但在计算时间上 MLFMA 明显优于 MOM。

从图 3 所示的阵列天线驻波比和方向图仿真结果也可以看出,驻波比较大,天线效率不高;方向图增益前后比较小,离实际的天线指标相差很远,需要进

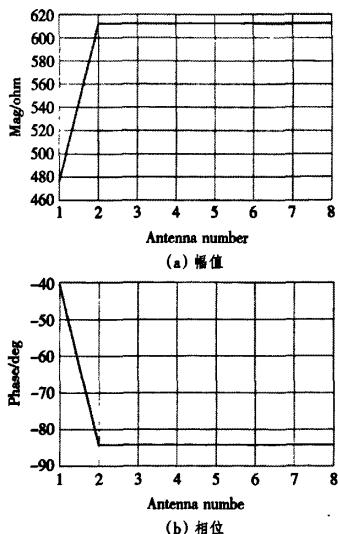


图 2 7.5 MHz 优化前阵列天线的输入阻抗

Fig. 2 The input impedance of array antennas before optimizing at the frequency 7.5 MHz

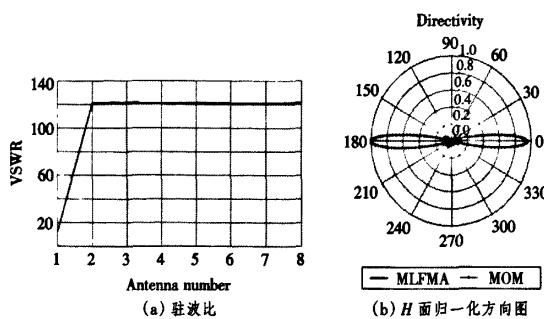


图 3 7.5 MHz 优化前阵列天线的驻波比和方向图

Fig. 3 The VSWR and directional diagram of array antennas before optimizing at the frequency 7.5 MHz

一步优化振子长度、天线间距等参数以满足天线的设计要求。由于在优化的过程中需多次计算阵列天线的电磁参数,这时采用 MLFMA 的优越性就充分地体现了出来。下面就基于 MLFMA 和数值优化理论进行优化分析。

3.2 优化分析

为避免篇幅过长,本文略去了对各个目标函数分别寻优的情况,在进行优化时对天线的长度、间距、输入阻抗的大小等多目标函数进行同时寻优,使用模拟退火算法和遗传算法的组合(PRSA)^[10]求出相应的最优值(优化流程简图见附录)。优化后的输入阻抗幅值和相位如图 4 所示,方向图和驻波比如图 5 所示,优化过程各参数变化曲线如图 6 所示。

当波束指向阵法线,接收和发射输入阻抗完全一

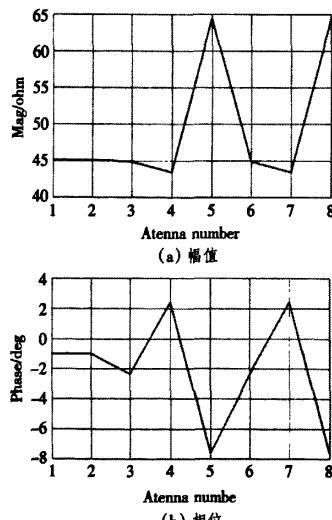


图 4 7.5 MHz 优化后阵列天线的输入阻抗

Fig. 4 The input impedance of array antennas after optimizing at the frequency 7.5 MHz

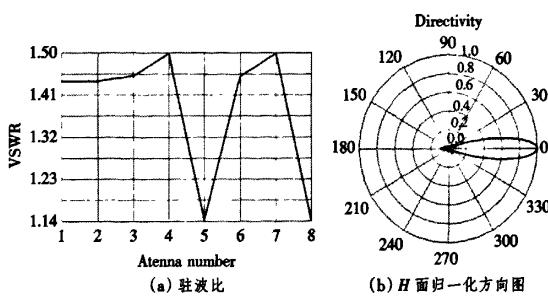


图 5 7.5 MHz 优化后阵列天线的驻波比和方向图

Fig. 5 The VSWR and directional diagram of array antennas after optimizing at the frequency 7.5 MHz

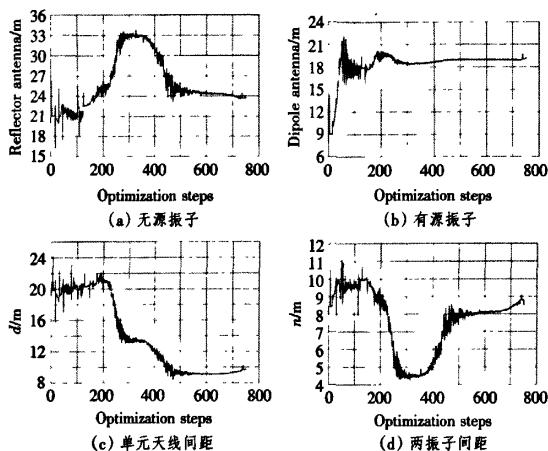


图 6 优化过程各参数变化曲线

Fig. 6 The curve of parametric variation in optimizing process

致,因此可以认为优化后阵列天线是一种收发共用相控天线阵。从优化结果可以看出,驻波比降为 1.1~1.5 时,天线的效率达到了 96% 以上,天线增益的前后比达到最大,阵列扫描方向图半功率波瓣宽度约 15°;各参数值为无源振子长 23.76 m,有源振子长 18.89 m,单元天线间距 9.84 m,单元天线两振子间距 8.57 m,满足所要求的天线指标。由于地网的作用,实际振子长度只需一半即可,即有源振子长 9.45 m,无源振子长 11.88 m,同文献[8]的结果即有源振子长 7 m,无源振子长 10.5 m,天线单元间距 17 m 相比,振子较长,但单元天线间的间距较短,这主要是由天线方案本身的折衷考虑以及工程实现上的误差引

起。整个优化过程共耗时约 45 min。在文中所有参量同时进行了优化,如果仅考虑单参量寻优耗时将更短。因而本文的方法作为工程实现之前的仿真设计是高效的。

4 结语

利用 MLFMA 算法能实现对阵列天线的快速分析,结合优化算法可以方便的设计出满足任意指标的天线布局。实际上任何一种天线都可以采用本文的方法分析,而且对有较大尺寸的天线其高效快速性尤为突出。本文的工作为工程设计天线系统提供了方便,为进一步研制新型高效紧凑的高频雷达天线提供了有益的指导和参考。

参考文献:

- [1] 毛滔,夏卫民,曲翠萍,等.高频频地波超视距雷达特点及应用研究[J].现代雷达,2009,31(3):7~10.
- [2] 刘春波,陈伯孝,陈多芳,等.双基地高频频地波 SIAR 通道幅相误差的自校准方法[J].电子与信息学报,2009,31(3):614~618.
- [3] 吴世才,杨子杰,等.高频频地波雷达信号波形分析[J].武汉大学学报(理学版),2001,47(5):519~527.
- [4] 庄钊文,袁乃昌,莫锦军,等.军用目标雷达散射截面预估与测量[M].北京:科学出版社,2007.216~223.
- [5] 欧阳骏.共形天线及阵列的分析和综合研究[D].成都:电子科技大学,2008.
- [6] 田超,谢拥军,王元源,等.MLFMA 结合最佳一致逼近快速求解目标宽带 RCS[J].电子与信息报,2009,31(11):2772~2775.
- [7] TIE Jun-cui, WENG Cho-chew, GUANG Chen, et al. Efficient MLFMA, RPFMA, and FAFFA algorithms for EM scattering by very large structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(3):759~771.
- [8] 高火涛,柯亨玉,杨子杰,等.高效紧凑的高频频地波雷达天线阵列设计[J].电子学报,2002,30(6):219~221.
- [9] 高火涛,杨子杰,李杰,等.岸基远程高频频表面波雷达小型宽带天线系统的设计[J].电子与信息学报,2004,26(1):112~117.
- [10] 田雨波,钱鉴.计算智能与计算电磁学[M].北京:科学出版社,2008,62~74.

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)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)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)，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>