

# 非对称副瓣相控阵天线优化设计

司军, 李翔

(船舶重工集团公司723所, 扬州 225001)

**摘要:**为了降低相控阵雷达低角反射的干扰影响,提出了一种非对称相控阵雷达天线副瓣设计方法,通过对天线的幅度与相位进行优化设计实现不对称方向图,来提高雷达抗杂波的能力。

**关键词:**非对称副瓣;相控阵;幅相加权

中图分类号:TN821.8

文献标识码:A

文章编号:CN32-1413(2011)04-0107-03

## Optimization Design of Unsymmetrical Side-lobe Phased-Array Antenna

SI Jun, LI Xiang

(The 723 Institute of CSIC, Yangzhou 225001, China)

**Abstract:** In order to decrease the influence of interference on low-angle reflection of phased-array radar, this paper brings forward a kind of method to design the antenna side-lobe of unsymmetrical phased-array radar, optimizes the amplitude and phase of antenna to realize the unsymmetrical directional pattern, and accordingly improve the capability of radar to confront with the clutter.

**Key words:** unsymmetrical side-lobe; phased-array; amplitude-phase weighting

## 0 引言

相控阵技术目前已经得到广泛应用,地基雷达、海基雷达、天基雷达都大量使用了相控阵技术。随着技术的发展,雷达向固态化、小型化、数字化以及宽带化发展。

对舰载有源相控阵雷达和陆基车载有源相控阵雷达而言,从低成本角度考虑,大都是采取俯仰面相控扫描、方位面机械扫描方式。舰载相控阵雷达进行低空搜索时,海杂波等极易从副瓣进入而影响雷达工作,从而影响对低空目标的探测。

若在雷达天线设计时把打地副瓣降低,可以较好地减少地杂波的影响,提高雷达抗干扰的性能。由于在单元数目和间距一定的情况下,打地副瓣降低也就意味着高仰角副瓣的抬高,本文在选取目标函数优化时,高仰角副瓣一般比低角副瓣高 20 dB。

## 1 技术指标

针对舰载多功能有源相控阵雷达对天线的要求,本文实现的多功能天线可以分别在两坐标模式

和三坐标模式下工作。

通过对天线的幅相进行优化设计来实现特定的方向图,主要包括以下几个方面:

- (1) 对一个余割平方发射阵列采取仅相位加权、幅度相位均加权的方式分别进行优化设计。
- (2) 对一个均匀分布的阵列采取仅相位、幅相一起加权的方式进行优化设计。
- (3) 对一个 Taylor 加权发射阵列采取幅相加权来实现低角副瓣设计。

选取遗传算法编程计算并进行优化设计,达到馈电网络的幅度和相位可以实现为准。根据优化的幅度、相位来设计功分网络和发射组件,达到波束赋形的目的。其性能参数为:

工作频率: X 波段; 带宽: 900 MHz; 单元数目: 32 个; 单元间距: 0.56 波长; 方向图特性:

- (1) 余割平方: 覆盖 40° 空域, 低角副瓣 -35 dB, 高仰角副瓣 -20 dB。
- (2) 均匀分布: 低角副瓣为 -40 dB, 高仰角副瓣为 -13.4 dB。

Taylor 加权: 低仰角副瓣为  $-35$  dB, 高仰角副瓣为  $-23$  dB。

## 2 遗传算法简介

阵列天线综合与设计中, 常用的是 Taylor、切比雪夫等针对幅度加权的方法, 但在一些幅度和相位都需要加权的场合, 比如余割平方赋形就不适用了, 而遗传算法因其稳定性、随机性和全局寻优功能而被广泛应用于阵列天线综合中。

遗传算法是上世纪 70 年代美国学者提出的模拟自然界物种遗传与进化, 依据“物竞天择, 适者生存”原则, 通过对染色体的选择、交叉、变异来趋近于最优解的一种算法。

种群中的染色体个体就是阵列天线的幅度与相位分布, 是待确定的参数:

$$I = (I_0, I_1, I_2, \dots, I_{N-1}, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N-1}) \quad (1)$$

一个单元间距为  $d$  的  $N$  元线阵如图 1 所示。

阵列的阵因子可表示为:

$$S(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jn\frac{2\pi}{\lambda}d \cos\theta} \quad (2)$$

若目标方向图是  $f(\theta)$ , 则对其进行多点采样, 在确定单元数和间距情况下, 使  $S(\theta)$  逼近于  $f(\theta)$ , 通过进化来改变幅度和相位。均方差函数为:

$$Jf(\alpha) = \sum_{i=0}^N [ |S(\theta_i) - f(\theta_i)| ]^2 \quad (3)$$

优化过程中, 均方差越小, 表示越逼近目标函数, 则越近似最优化。

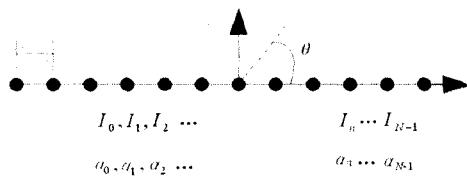


图 1  $N$  元线阵示意图

## 3 余割赋形阵列天线优化设计

舰载相控阵雷达的主要目标是飞机和导弹, 为了实现低角远距离检测, 雷达一般设计成余割平方波束, 通过幅相加权以及仅相位加权实现低仰角的低副瓣设计。

仅相位加权状态下, 通过优化阵列天线的相位分布来实现波束赋形, 在迭代了 15 900 次后实现了如图 2 所示的方向图。由于仅仅是相位加权, 实现

较低的副瓣较难, 打地副瓣电平最低为  $-17$  dB, 还无法满足实际需要。

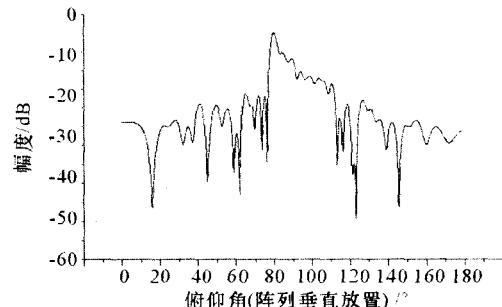


图 2 仅相位加权的余割赋形

为了实现较低的副瓣, 下面对幅度和相位一起加权来赋形。经过 23 000 次的迭代后实现了高仰角副瓣最大为  $-17$  dB, 打地副瓣为  $-37$  dB, 实现了较低的低角副瓣电平, 如图 3 所示。

优化后的幅度和相位分布较均匀, 无突变和很大的跳跃现象, 可以直接用来进行相控阵天线的加权。

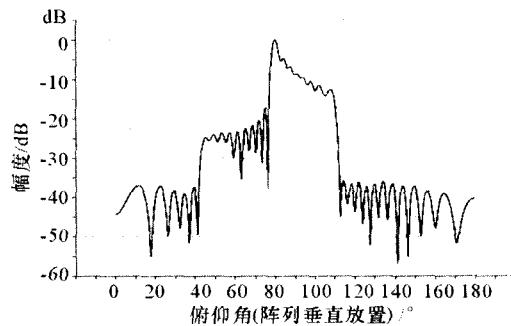


图 3 幅相均加权的余割赋形

## 4 均匀分布的阵列非对称优化设计

均匀分布的阵列副瓣电平较高, 对抗副瓣跟踪的反辐射导弹是很难的。但对 1 个线阵而言, 只需要 1 个种类的 TR 组件, 若 TR 出现故障, 只需要 1 种备件就可以, 且均匀分布增益损失最小。

在相控阵雷达中, 提高雷达天线增益需要增加单元数目, 每增加 3 dB 的增益就要增加 1 倍的单元数目。对 1 个 3 000 个单元的阵面而言, 若欲增加 3 dB 的增益, 就要增加到 6 000 个单元, 成本增加不言而喻。在发射状态下, 采取均匀分布发射就显得尤为重要。

为了降低均匀发射时的副瓣电平, 提高抗敌杂波和抗干扰的能力, 采取遗传算法优化馈电幅度相位, 使天线的打地副瓣电平由  $-13.4$  dB 降低到

-23 dB,如图4所示。

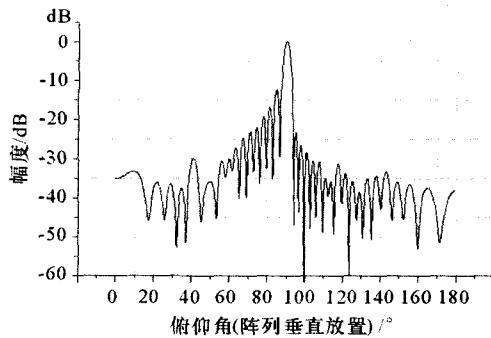


图4 幅相加权优化的均匀阵列方向图

若仅采取相位加权,则对一个32单元的线阵,其副瓣最低可以降到-18.5 dB,但仅靠改变相位来实现副瓣不对称设计是不能实现的,如图5所示。相位加权是很适合相控阵雷达的一种加权方式,只需要改变初始相位值就能实现副瓣加权,实现简单,缺点是对副瓣的降低有限。

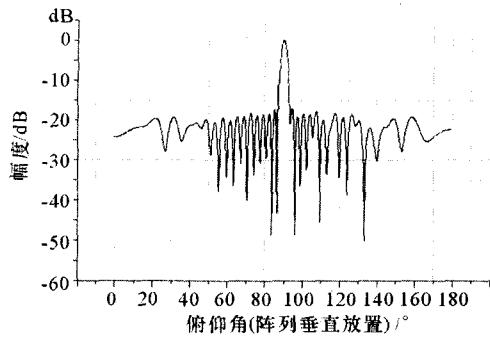


图5 仅相位加权赋形

## 5 Taylor 加权阵列非对称优化设计

Taylor加权的阵列能得到较低的副瓣电平,目前得到了广泛运用。但对一个面阵而言,要实现低副瓣需要不同种类的TR组件,通过合理的功率分配使其符合Taylor加权参数可以降低发射和接收副瓣。若TR出现故障,需要有不同种类的备件才可以,且采取Taylor发射加权,有增益损失。

选取了一个副瓣为-23 dB的Taylor加权阵列,其打地副瓣目标值为-35 dB。

在优化过程中,遗传参数的选取决定了优化的速度和效率,经过择优,选取了一组参数进行优化,经过40 000次迭代后(如图6所示),其打地副瓣为-31 dB,打地平均副瓣在-37 dB以下,若适当提高目标值,增加单元数目,可以继续降低打地电平。

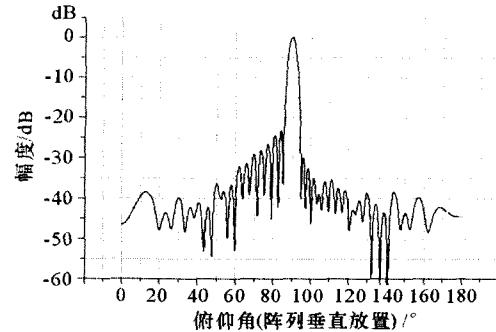


图6 Taylor 加权副瓣赋形

## 6 优化程序软件

该程序可以方便地实现各种阵列天线方向图的赋形优化设计,根据优化的幅度和相位来设计功分网络或者进行幅度相位控制,达到要求的赋形方向图。针对一个余割波束,覆盖高度为3 km,最大距离18 km,打地距离为0.8 km,经过优化计算得到了12元线阵的幅度相位分布,根据幅相分布使用Ansoft仿真的天线赋形方向图如图6所示。

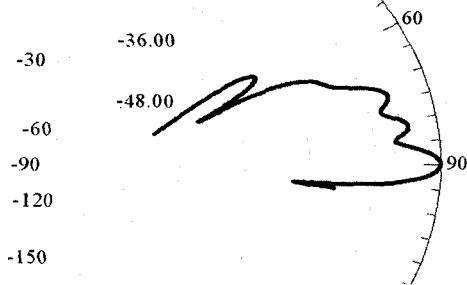


图7 余割平方赋形波束

## 7 结束语

本文分别对余割平方赋形、仅相位加权、Taylor加权等常用的相控阵天线的加权方式进行了副瓣不对称优化设计,经过对一个阵列天线的幅度和相位值优化后,其打地电平达到了目标值,对存在幅度、相位跳跃较大的数据组不能采纳,需甄别择优挑选。

## 参考文献

- [1] 吴春光.相控阵雷达跟踪海上低空目标的关键技术研究[D].长沙:国防科技大学,2002.
- [2] 韩培尧.雷达抗干扰技术[M].西安:西北电讯学院,1980.
- [3] 邓均兮,许小玲,喻肇川.基于遗传算法的阵列天线方向图综合[J].零八一科技,2009(4):12-14.
- [4] 黎晓春.基于DBF的雷达有源相控阵天线.硕士学位论文[D].南京:南京理工大学,2004.

## 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>