

# 稀疏阵列天线结构设计\*

唐宝富,王浚海

(中国电子科技集团公司第 14 研究所, 江苏 南京 210013)

**摘 要** 稀疏阵列天线是一类特殊的相控阵天线, 阵列稀疏技术的采用在降低造价的同时给天线结构设计带来很大困难。介绍了一种简洁的模块化稀疏阵列天线结构以及优化设计方法。

**关键词** 稀疏阵列天线; 模块化; 优化设计

中图分类号: TN82 文献标识码: B 文章编号: 1008-5300(2004)04-0022-03

## The Structural Design of the Sparse Antenna Array

TANG Bao-fu, WANG Jun-hai

(The 14th Research Institute of CETC, Nanjing 210013, China)

**Abstract** The sparse antenna array is a special type of phased array antenna. The antenna cost is reduced. But it is hard to perform the structural design of the antenna. A simple and useful technique of modularizing structure of the sparse antenna array and a method of optimizing design process are introduced in this paper.

**Key words** sparse antenna array; modularization; optimizing design

## 0 引言

稀疏阵列天线是指采用阵列稀疏技术的相控阵天线。阵列稀疏是指从线阵或面阵中去掉一些辐射单元, 目的在于降低天线造价。这种技术能在系统造价增加最少的情况下提高测角精度。

稀疏阵的设计方法是按某一规则在满阵的辐射单元位置保留或去掉辐射单元。稀疏阵中单元的位置一种是完全随机确定, 另一种是根据有规则格栅结构确定。与阵列单元完全随机配置的设计相比, 用规则格栅作辐射单元位置有三个重要优点: 第一, 可以采用成本较低的行/列波控技术; 第二, 能更好地控制阵列天线波瓣图设计; 第三, 可以简化阵列结构, 便于结构设计。在稀疏阵中不放置辐射单元的位置上并不是空的, 而是放置了虚单元(无源单元)。这些虚单元的存在使有源单元具有与满阵情况一样的周围环境。有源单元后接 T/R 组件, 无源单元后接负载。正是由于有源单元不规则布置, 造成天线结构的不规则, 使得稀疏阵列天线的结构设计不同于一般的相控阵天线。

## 1 天线结构

对于天线单元是印刷振子的阵列天线结构通常是将天线振子与 T/R 组件合为一体, 随 T/R 组件一体插

拔。这种结构型式微波传输损耗小, 结构简洁, 但天线振子的精度取决于 T/R 组件的安装精度, T/R 组件的位置受天线单元控制。而有源单元不规则布置决定了 T/R 组件排列不规则, 这给天线骨架设计、阵面布线设计和阵面冷却系统设计带来很大困难。

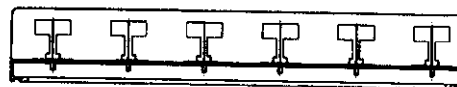


图 1 阵列模块

为解决这个问题, 将天线单元与 T/R 组件分离, 两者之间通过电缆连接。考虑到阵面结构分块和加工、安装方便, 可将  $n$  个单元(不论有源还是无源)做成一个阵列模块(见图 1),  $n$  最好等于一个有源子阵的单元数。单元振子可用薄壁天线罩保护, 如在罩内填充聚氨酯泡沫, 则形成了一个复合材料的夹层结构, 不但刚度好, 重量轻, 而且隔热性能好, 能有效地减少太阳辐射热对天线阵面的影响, 降低阵面冷却系统的能耗。同时, 阵列模块化, 维修方便, 且能很方便地实现天线口径的扩大或缩小。

阵列模块拼装于阵面骨架上, 形成天线阵面。块与块之间留有适当的间隙, 除用来消除加工误差外, 还可作为伸缩缝来消除温度变形的影响。

由于摆脱了天线单元的控制,T/R 组件就可以规则排列。同样将一个子阵的 T/R 组件与波控、电源等,再加上冷却系统和连接电缆一起装入机架组成一个子阵组合模块(见图 2)。该模块紧贴在庫面骨架上安装,这样可缩短 T/R 组件到天线单元之间的电缆长度,以减小损耗。采用子阵组合模块形式,实现了子阵级的模块化,简化了阵面结构和走线,方便加工制造和调试。不需任何改动,就能适应天线口径的变化。

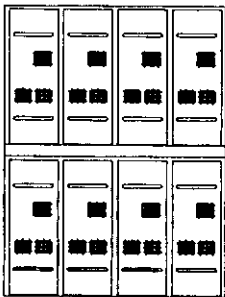


图 2 子阵组合模块

阵列模块和子阵组合模块的采用,使阵面骨架结构得以大大简化。骨架采用型钢焊接成方格框架结构,框架分格大小与阵列单元模块一致。

2 子阵组合模块分布

为方便加工、安装和阵面走线以及美观,每个子阵组合模块安装在阵面骨架的一个格子上,且中心重合。由于是稀疏阵,因而不是每个格子上都有子阵组合模块,一个子阵组合模块可能与周围几个阵列模块上的有源单元相连。子阵组合模块应根据有源单元的子阵划分来分布(见图 3),这样可缩短 T/R 组件到天线单元之间的电缆长度。

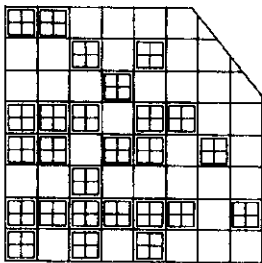


图 3 子阵组合模块分布

要使子阵组合模块分布合理,实际上是一个组合优化问题。通过子阵组合模块与阵面骨架格子的不同组合以及同一个子阵内天线单元与 T/R 组件的不同组合,使 T/R 组件到天线单元之间的连接电缆最短。

2.1 子阵内连接电缆长度计算

为保证相位相等,同一个子阵内的连接电缆要求

等长。因此,需要在  $n$  个天线单元和  $n$  个 T/R 组件的排列组合中找出最佳组合,使连接电缆最短。

最普通的计算方法是遍历算法,即将全部 T/R 组件和天线单元进行连接计算,但是这种方法对于单元数多的子阵计算时间过长,不可以采用。这里采用一种效率较高的算法。

首先依次计算每个 T/R 组件和天线单元的距离,填入表 1。然后将表 1 的  $L_1 \sim L_n$  与  $H_1 \sim H_n$  放在一起,从中找出最大值,记为  $B$ 。再用  $B$  值分别与  $A_{11} \sim A_{nn}$  进行比较,若  $B$  小,则计为 0,否则计为 1,如此就形成一个由 0 和 1 构成的  $n \times n$  矩阵。再对该矩阵进行行列变换,若能够化成对角全 1 的矩阵,则说明矩阵的每一行至少有一个 1,且不同列。也就是说  $B$  是满足要求的最短距离。若不满足,则从  $A_{11} \sim A_{nn}$  中找出比  $B$  大的数值中的最小值赋给  $B$ ,按上述原则重新构造矩阵,判断矩阵能否化成对角全 1 的矩阵。如此循环,直到满足为止。求得最短距离后,再考虑具体结构和电缆安装要求,加上合适的余量,就可得出电缆长度。

表 1 子阵内连接电缆长度

	T/R 组件 1	T/R 组件 2	T/R 组件 3	...	T/R 组件 $n$	行最 小值
天线单元 1	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	...	$A_{1n}$	$H_1$
天线单元 2	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	...	$A_{2n}$	$H_2$
...	...	...	...	...	...	...
天线单元 $n$	$A_{n1}$	$A_{n2}$	$A_{n3}$	...	$A_{nn}$	$H_n$
列最小值	$L_1$	$L_2$	$L_3$	...	$L_n$	

采用 VB 语言编写计算程序,Visual Basic 是开发 Windows 应用程序最易学易用的工具之一,它面向对象与事件驱动,使编程变得非常快捷,在全球范围内被广泛应用。计算程序流程图见图 4。

2.2 子阵组合模块分布优化

假设阵面有  $m$  个有源子阵,  $p$  个阵面骨架格子,通过优化计算,在  $p$  个格子中找出  $m$  个合适的格子来放置子阵组合模块,使得每个子阵组合模块与对应天线单元之间的电缆长度最小。采用与子阵内连接电缆长度计算基本相同的原理进行计算。

首先依次计算每个子阵组合模块与阵面骨架格子对应时的最佳电缆长度,填入表 2。然后在表 2 的  $L_1 \sim L_p$  数值中找出  $m$  个较小的值(相等的值重复计数),将这  $m$  个值与  $H_1 \sim H_m$  放在一起,从中找出最大值,记为  $B$ 。再用  $B$  值分别与  $A_{11} \sim A_{mp}$  进行比较,若  $B$  小,则计为 0,否则计为 1,如此就形成一个由 0 和 1 构成的  $m \times p$  矩阵。再经过行列变换判断该矩阵是否能变换成以短边构成的  $m$  阶方阵的对角全为 1 的矩阵,

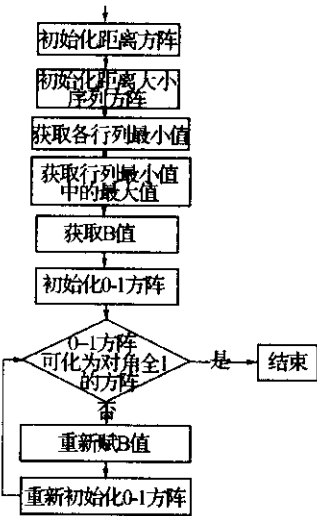


图 4 子阵内连接电缆长度计算流程图

若可以,则说明  $B$  是满足要求的最短长度。若不可以,则从  $A_{11} \sim A_{mp}$  中找出比  $B$  大的数值中的最小值赋给  $B$ ,按上述原则重新构造矩阵,重新判断该矩阵。如此循环,直到矩阵满足判断条件。这样,就找到了使  $m$  个有源子阵电缆长度均不大于  $B$  值的子阵组合模块分布,记录  $B$  值和对应的子阵组合模块号及骨架格子号,剔除该子阵组合模块号和骨架格子号,再重复上述计算。如此反复计算,就可得到最佳子阵组合模块分布及其对应电缆长度。

表 2 子阵组合模块不同分布时的电缆长度

	骨架 格子 1	骨架 格子 2	骨架 格子 3	...	骨架 格子 $p$	行最 小值
子阵组合模块 1	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	...	$A_{1p}$	$H_1$
子阵组合模块 2	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	...	$A_{2p}$	$H_2$
...	...	...	...	...	...	...
子阵组合模块 $m$	$A_{m1}$	$A_{m2}$	$A_{m3}$	...	$A_{mp}$	$H_m$
列最小值	$L_1$	$L_2$	$L_3$	...	$L_p$	

考虑到电缆加工和安装的方便,电缆品种不宜太多,可对计算得到的系列电缆长度进行分档,形成几种电缆。由于相位补偿的需要,不同种电缆的长度应相差波长的整数倍。

为减少计算量,可利用阵面的对称结构,一般只要计算四分之一,即一个象限。

同样采用 VB 语言编写计算程序,流程图见图 5。

3 结束语

稀疏阵列天线是一类比较特殊的相控阵天线,其特点是天线单元的随机分布。将天线单元与 T/R 组

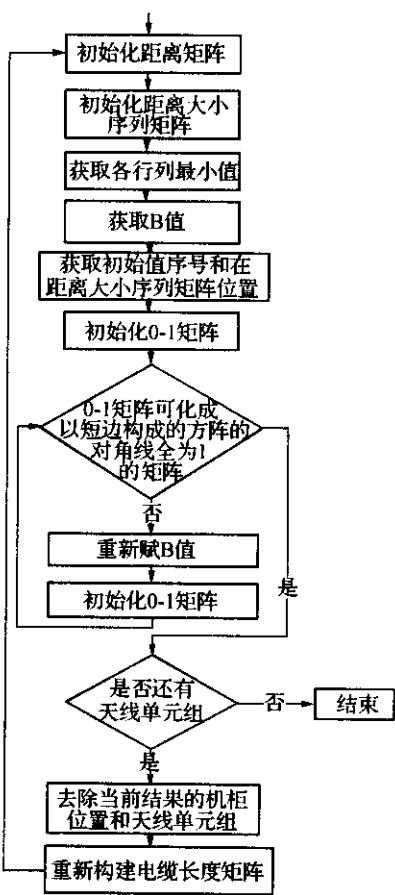


图 5 子阵组合模块分布优化流程图

件分离,虽然增加了电缆损耗,但使得 TR 组件能够规则排列,大大简化了阵面结构。为减小损耗,应使连接电缆长度最短,因而要求子阵组合模块分布最佳。比较详细介绍了其优化计算方法。阵列模块和子阵组合模块的使用,提高了天线的模块化水平。介绍的天线结构方式和设计方法可给同类天线设计提供参考。

参考文献：

[ 1 ] 王军 林强,译. 雷达手册[ M ]. 北京 :电子工业出版社 , 2003.  
[ 2 ] 王栋. Visual Basic 程序设计实用教程[ M ]. 北京 :清华大学出版社 2002.

作者简介 :唐宝富( 1967 - ),男,江苏泰州人,高级工程师,1991 年毕业于江苏大学机械设计专业,长期从事天线微波结构的研究和设计工作 ;

王浚海( 1978 - ),男,助工,2000 年毕业于南京航空航天大学机电学院,从事天线微波结构的设计工作。

## 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,一直致力和专注于微波、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>