

某相控阵天线幅相分配网络的设计与实现

穆 健, 袁安民, 赵颖辉, 陈 亿

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

【摘要】在某相控阵天线设计中, 需要对铅垂放置的天线单元的方向图赋形。本文采用最小二乘法得到天线单元各振子电流的幅度和相位, 并用 MATLAB 进行方向图计算仿真; 根据计算结果, 设计了幅相分配网络, 并用 HSFF 仿真软件进行模型仿真; 应用矢量网络分析仪对实物进行测量。测量结果表明, 天线单元铅垂方向图与计算、仿真结果一致, 满足设计要求。

【关键词】方向图; 赋形; 幅相分配网络; 相控阵天线

【中图分类号】TN819.1

【文献标识码】A

【文章编号】1002-0802(2008)12-0013-03

Design and Realization of Amplitude-phase Distribution Network for Phased Array Antenna

MU Jian, YUAN An-min, ZHAO Ying-hui, CHEN Yi

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China)

【Abstract】Shaping vertical pattern is an important content in designing phased array antenna. This paper describes a method which, through adopting Least Square method, obtains the amplitude and phase of current for the elements of antenna unit. The algorithm is simulated by using MATLAB. An amplitude-phase distribution network is designed, and the model is simulated by using HSFF. The test results show that the vertical pattern of antenna unit is consistent with the results of the calculation and the simulation, and meets the requirement of design.

【Key words】Pattern, Shaping; Amplitude-phase distribution network; Phased array antenna

0 引言

在某相控阵天线研制中, 相控阵设计为由若干天线单元在水平面上排成的等距圆阵, 工作频段为 962MHz—1213MHz。其中, 天线单元设计成铅垂线阵, 目的是在空间形成特定的铅垂方向图, 满足顶空盲区、辐射方向和天线增益的要求。这就需要设计一种对天线单元方向图赋形的幅相分配网络。

天线方向图赋形有多种方法: 伍德沃德罗森取样法^[1], 傅立叶变换法和多项式综合法等^[2]。本文采用最小二乘法设计实现了幅相分配网络, 对其馈电反射系数、传输损耗、传输相位采用基于有限元的仿真计算, 应用矢量网络分析仪进行实物测量; 对其方向图采用 Matlab 进行理论仿真。

1 方向图赋形

根据设计指标, 对相控阵天线铅垂方向图要求如下: 最大值方向的水平仰角约为 10°, 水平方向幅度为-6dB 左右,

水平面以下辐射理想值为 0, 3dB 宽度为 30°~50°。

1.1 方向性函数与目标函数

天线单元采用 5 层半波对称振子。设振子间距 $d = \lambda_0/2$, 馈电电流为 $I_1, I_k = m_k I_1 e^{j\beta_k}$, ($k = 2, 3, 4, 5$), β_k 为 I_k 超前 I_1 的相位角。则合成方向图函数为^[3]

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} (1 + m_2 e^{j\varphi_2} + m_3 e^{j\varphi_3} + m_4 e^{j\varphi_4} + m_5 e^{j\varphi_5}) \quad (1)$$

其中, $\varphi_i = \beta_i + ikd \cos\theta$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\theta = 90^\circ$ 时表示水平方向,

$\theta > 90^\circ$ 时表示地平面以下方向。

通过分段线性函数建立目标方向图函数为

$$f_{aim}(\theta) = \begin{cases} 0, & (0 \leq \theta \leq \pi/6), \\ 1.8\alpha/\pi + 0.2, & (\pi/6 < \theta \leq 8\pi/18), \\ -18\alpha/\pi + 9, & (8\pi/18 < \theta \leq \pi/2), \\ 0, & (\pi/2 < \theta \leq \pi). \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2008-04-07。

作者简介: 穆 健(1978-)男, 硕士研究生, 主要研究方向为军用无线电导航专业; 袁安民(1962-), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事导航工程、天线及微波方面的研究二十多年; 赵颖辉(1978-)男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为军用无线电导航专业; 陈 亿(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为军用无线电导航专业。

1.2 最小二乘法

最小二乘法以待定函数和目标函数的误差均方根最小为准则，即

$$\min_{\mathbf{X}} \frac{1}{2} \| \mathbf{C}\mathbf{X} - \mathbf{d} \|^2_2. \quad (3)$$

将式(1)中的 θ 离散化，并设各振子电流幅度相同，则式(1)用矩阵表示为

$$f(\theta) = \mathbf{C}\mathbf{X}, \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = F_1(\theta)[1 \ e^{jkd \cos \theta} \ e^{j2kd \cos \theta} \ e^{j3kd \cos \theta} \ e^{j4kd \cos \theta}].$$

$$\mathbf{X} = [e^{j\beta_1} \ e^{j\beta_2} \ e^{j\beta_3} \ e^{j\beta_4} \ e^{j\beta_5}]^T.$$

式中， $F_1(\theta) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta}$ 。将 θ 代入式(4)，得到 X 的极

小范数最小二乘解为^[4]

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}^* \mathbf{d}. \quad (5)$$

1.3 天线单元方向图赋形

表 1 X 的极小范数最小二乘解

X 分量	$x(1)$	$x(2)$	$x(3)$	$x(4)$	$x(5)$
归一化后	0.915	$1e^{j92.6689^\circ}$	$0.4457e^{j181.9365^\circ}$	$0.1538e^{j94.2194^\circ}$	$0.3043e^{j181.1413^\circ}$

由图可知，方向图 3dB 宽度约为 40° ，水平方向幅度为 0.5 (-6dB)，水平面以下的辐射在 0.2 (-14dB) 以下，满足指标要求。

2 幅相分配网络设计

要实现图 1 的方向图，各振子的馈电电流应按表 1 进行幅相分配。因而需设计一个功分网络实现该功能。为减少辐射损耗，保证带宽，功分网络设计成带状线结构。网络由 4 个功分器级联组成。在设计时，以 I1 的相位为基准，将 I2、I3 和 I5 反相放置，I4 同相放置，这样，信号到达各振子的路径长度基本相等。此时，幅相分配网络输出端的相对相位依次应为： 0° 、 87.33° 、 -1.9365° 、 -94.22° 、 -1.14° 。根据带状线和功分器的计算公式^[5]，求出各功分器尺寸和传输线长度。

此外，为对天线单元的输入电流取样监测，完成相位校准。根据发射机输出功率，在网络输入端设计一个 24dB 平行线定向耦合器，其尺寸根据公式计算得到^[6]。设计的幅相分配网络结构如图 2 所示。

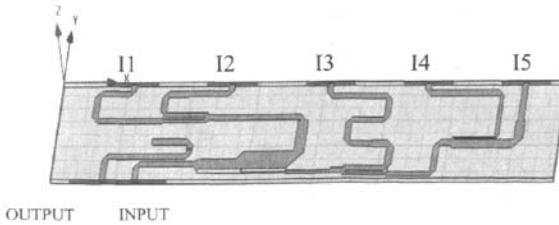


图 2 幅相分配网络结构及仿真模型

3 模型仿真

根据幅相分配网络的设计参数，建立 HFSS 仿真模型如

将 θ 非均匀离散化为 530 个数据点，并对间距 d 微扰。当 $d=150\text{mm}$ 时，得到较理想的方向图如图 1 所示。此时，五个振子的馈电关系见表 1。

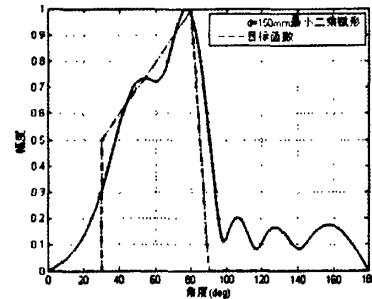


图 1 采用最小二乘法实现的方向

图 2 所示。仿真结果见图 3。

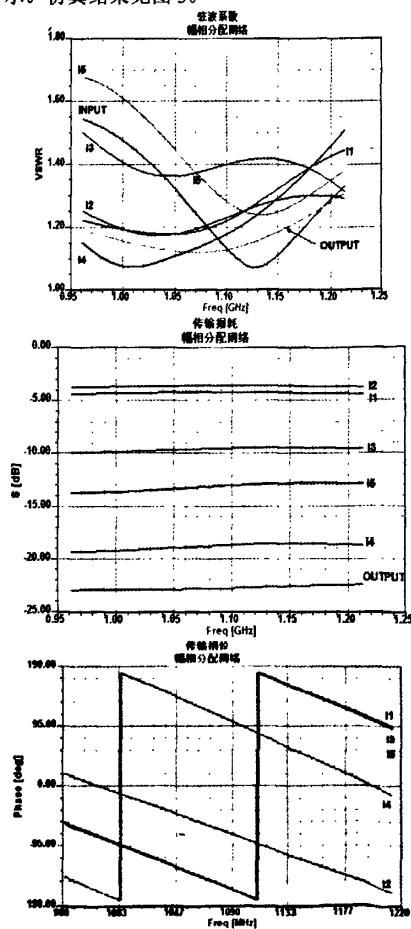


图 3 幅相分配网络模型仿真结果

由图可见，网络输入端的驻波系数小于 1.55，耦合输出端的驻波系数在 1.13 至 1.31 之间，各振子馈电端的驻波系

数在 1.3 左右, 最大为 1.7; 输入端至各振子馈电端的传输损耗符合表 1 的幅度关系; 输入端至耦合端的耦合度在 -22.5dB 至 -23dB 之间; I1、I3 和 I5 的传输相位相近, 符合设计目的。传输损耗与传输相位在频段内一致性较好, 满足带宽要求。

由 HFSS 仿真结果, 得到的中心频率和边缘频率处各振子的馈电电流与表 1 的最小二乘解略有偏差, 原因是: (1) 在计算带状线尺寸时采取了舍入法, 模型建立存在误差。(2) HSFF 仿真软件采用有限元法进行计算, 也存有误差。将所得数据代入公式(1)得到模型仿真方向图如图 4 所示。可见, 中心频率处方向图与最小二乘法赋形方向图基本吻合。边缘

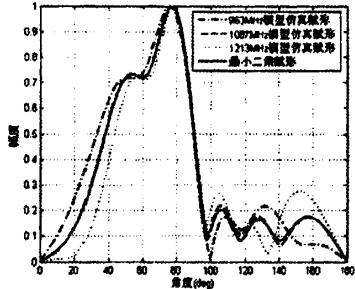


图 4 幅相分配网络模型仿真方向

表 2 幅相分配网络实测数据

振子	I1	I2	I3	I4	I5
电流幅度相位	962MHz 0.933	$1e^{j102.75^\circ}$	$0.4721 e^{j183.52^\circ}$	$0.1552 e^{j83.92^\circ}$	$0.3058 e^{j179.49^\circ}$
	1087 MHz 0.9226	$1e^{j93.28^\circ}$	$0.4597 e^{j181.64^\circ}$	$0.1565 e^{j93.41^\circ}$	$0.3122 e^{j177.48^\circ}$
	1213 MHz 0.9441	$1e^{j84.20^\circ}$	$0.4603 e^{j181.22^\circ}$	$0.1526 e^{j103.28^\circ}$	$0.3080 e^{j177.44^\circ}$

将表 2 数据代入公式(1), 得到实测方向图如图 6 所示。

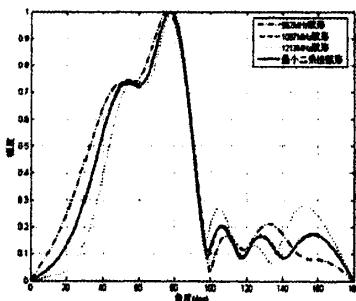


图 6 幅相分配网络实测方向

由表 2 和图 6 看出, 实测值与理论值、仿真值略有偏差; 中心频率处的方向图与最小二乘法赋形的方向图基本拟合, 两个边缘频率处的方向图与最小二乘法赋形方向图相近。其原因是: 网络的制造公差导致了偏差, 但较小的偏差不会对方向图造成明显的影响; 在整个工作频段内, 幅度和相位的变化具有较好的一致性, 保证了网络带宽。

另外, 测得输入端口反射驻波比在 1.035 至 1.13 之间, 输入端到耦合端的耦合度在 25.78dB 至 26.12dB 之间, 满足设计要求。

频率处, 方向图最大方向分别约为 76° 和 78° ; 水平方向辐射幅度均在 -6dB 以下; 水平面以下方向图具有较陡的斜率变化; 当频率偏离中心频率时, 水平面以下方向的辐射稍有增加, 最大值为 0.275, 满足设计要求。

4 实物测试

使用 Anritsu 公司的 37347C 型矢量网络分析仪进行实物测试, 实物见图 5。在测试数据中, 将电流幅度归一化, 将 I2、I3 和 I5 的相位减 180° 。中心和边缘频率处的测试数据见表 2。



图 5 幅相分配网络实物

5 结语

本文采用最小二乘法设计了一种幅相分配网络。该网络的赋形结果、高频仿真结果和实物测量结果均满足设计要求, 达到了预期效果。目前, 该网络已经在某装备的相控阵天线中应用。

参考文献

- [1] Woodward P W. A Method for Calculating the Field over a Plane Aperture Required to Produce a Given Polar Diagram[J]. J. IEE, 1975, 23: 764-769.
- [2] 吕善伟. 天线阵综合[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1988.
- [3] 蒋文科. 天线与电波传播[M]. 西安: 空军工程大学电讯工程学院出版, 1990: 50-52.
- [4] 程云鹏. 矩阵论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004, 08: 307-343.
- [5] 吴万春. 集成固体微波电路 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981, (05): 169-186.
- [6] Andrei Grebennikov. 射频与微波功率放大器设计 [M]. 张玉兴, 赵宏飞[译]. 北京: 电子工业出版社, 2006, 4: 110-132.

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>