

# 一种校正阵面天线单元馈电的方法<sup>①</sup>

杨文丽, 吴春邦, 刘 波

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

**摘要:**文章从一种阵面波束赋形天线单元馈电分析与实测结果比较出发, 结合阵列天线工作和测试原理, 给出了比较分析结果, 并提出了阵面天线除了在生产过程需确保每个单元的馈电满足设计要求外, 还需对天线阵面的每个辐射单元进行实际幅相检测, 以消除和校正可能存在的误差。

**关键词:**阵面天线; 波束赋形; 检测; 仿真

## 0 引言

阵列天线能够实现波束扫描、自适应、赋形等多种功能, 在军用/民用卫星通信中得到越来越多的应用。

有一种圆极化阵面天线, 通过阵元之间一定的馈电分布达到赋形波束效果。研究发现, 在实际加工过程中, 天线阵面单元之间由于各种误差及天线单元之间耦合的作用, 其一致性并不能完全符合要求。为了保证阵面上所有单元的馈电分布满足技术要求, 除了在生产过程中确保每个单元的馈电满足设计要求外, 还需对天线阵面的每个辐射单元进行实际幅相检测, 以消除和校正可能存在的馈电误差。

文章从一种阵面天线单元馈电的分析和实际检测结果比较出发, 结合阵面天线工作和测试原理, 给出了比较分析结果, 为阵面天线波束赋形误差校正提供了重要的参考。

## 1 理论基础

### 1.1 阵列天线方向图

如图1所示, 对于一个  $N$  元的天线阵, 其远场方向图<sup>[1]</sup>如公式(1)所示。

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_{ni} a_{ni} e^{j(\vec{k} \cdot \vec{\rho}_{ni} + \varphi_{ni})} \quad (1)$$

式中,  $\vec{E}_{ni}$  为单元方向图,  $a_{ni}$  为单元馈电幅度,  $\vec{k} \cdot \vec{\rho}_{ni}$  是阵列中单元辐射场到达同一观察点的波程差, 称为空间相差,  $\varphi_{ni}$  为单元的馈电相位。

可以看出, 在一般情况下, 假设阵面中所有单元

均为自由空间单元, 其单元方向图一致, 均为  $f_i(\theta, \varphi)$ , 则阵面方向图为单元方向图与阵因子的乘积。在单元方向图一致的情况下, 天线波束本质上仅受单元的馈电控制。

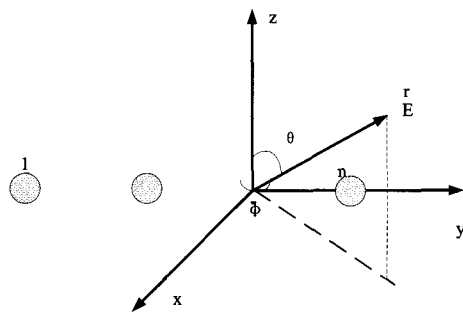


图1 阵面天线示意图

而实际上, 当某个单元以自由空间单元方向图  $f_i(\theta, \varphi)$  向空间辐射时, 由于互耦, 会在附近的天线元  $n$  上激起电流, 并以  $C_{in} \cdot f_n(\theta, \varphi)$  向空间辐射, 叠加到  $f_i(\theta, \varphi)$  上, 构成有源单元方向图  $g_i(\theta, \varphi)$ , 这里的  $C_{in}$  称为第  $n$  个元对第  $i$  个元的耦合系数,  $f_n(\theta, \varphi)$  代表第  $n$  个元的自由空间单元方向图与该元的空间方向相位因子的乘积。则

$$g_i(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N C_{in} \cdot f_n(\theta, \varphi) \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

其中,  $N$  为天线元总数。

所以, 公式(1)中  $\vec{E}_{ni}$  应该为单元的有源方向图, 而  $a_{ni}$ 、 $\varphi_{ni}$  为考虑有源方向图情况下的馈电幅相因子。在得到单元有源方向图情况下, 改变单元馈电

① 收稿日期: 2010-11-05; 修回日期: 2011-01-19。

方式可得到所需波束方向图。

## 1.2 天线的极化表示方法

极化是天线的一项重要特性,它是时变电场矢量端点的运动状态。电场矢量端点轨迹的旋向方向规定为沿波传播方向观察的旋转方向。设有一沿负 $Z$ 方向传播的无衰减均匀平面波,其瞬时电场可表示为:

$$\vec{E}(z,t) = \text{Re}(Ee^{j(\omega t + kz)}) \quad (3)$$

在垂直于传播方向的平面(称为极化平面)内,可以将式(3)分解为2个互相垂直的分量,即

$$\vec{E}(z,t) = \vec{i}_\theta E_\theta(z,t) + \vec{i}_\varphi E_\varphi(z,t) \quad (4)$$

亦可将式(3)分解为2个旋向分量,得到式(5):

$$\vec{E} = E_\theta \vec{i}_\theta + E_\varphi \vec{i}_\varphi = E_R \vec{R} + E_L \vec{L} \quad (5)$$

式(5)中:

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{i}_\theta + j\vec{i}_\varphi & \vec{E}_R &= E_\theta + jE_\varphi = |E_R| e^{j\varphi_R} \\ \vec{L} &= \vec{i}_\theta - j\vec{i}_\varphi & \vec{E}_L &= E_\theta - jE_\varphi = |E_L| e^{j\varphi_L} \end{aligned}$$

任意极化电场亦可分解为左旋和右旋2个极化分量,即由主极化和交叉极化组成,如图2所示。

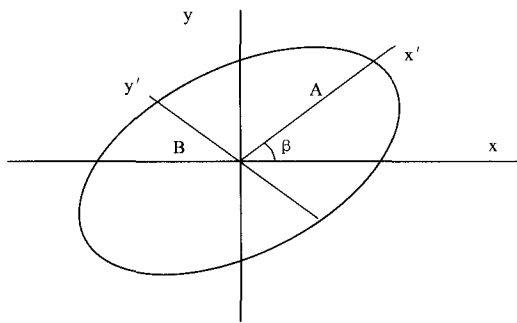


图2 圆极化分解示意图

通过第1.1节可以知道,阵列天线波束本质上受单元的馈电幅相控制,在得到单元的有源方向图之后即可通过改变阵因子(空间波程差)得到阵列方向图。在进行阵面波束赋形时,如果不考虑单元之间的加工误差及互耦引起的馈电误差,将可能导致赋形波束产生畸变。而为了消除各种加工及互耦引起的误差,可以首先进行单元的有源单元方向图测试,得到每个辐射单元的幅相,然后在馈电系统中对其进行一定的补偿,将大大改进波束的赋形效果。

在进行单元的有源单元方向图测试时,可依据

第1.2节中所述方式,即任何波束电场均可分解为主极化与交叉极化分量或者是2个正交分量,采集每个单元的正交分量,通过计算即可得各主极化与交叉极化的分量,进而得到其主极化的未校正前的有源馈电幅相。

## 2 工程实例

图3所示为某天线布局图,仿真设计的赋形波束方向图如图4所示,为马鞍型波束。

在实测过程中,馈电系统均满足设计要求的情况下,得到如图5所示的方向图。将实测方向图与设计仿真的方向图进行对比,不难发现,方向图远离设计要求,发生了畸变。该畸变是由于单元之间的加工、制造误差及单元之间的互耦导致单元方向图和阵因子均发生了变化而引起的。

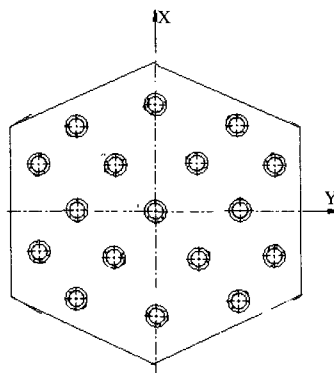


图3 一种发射天线布局图

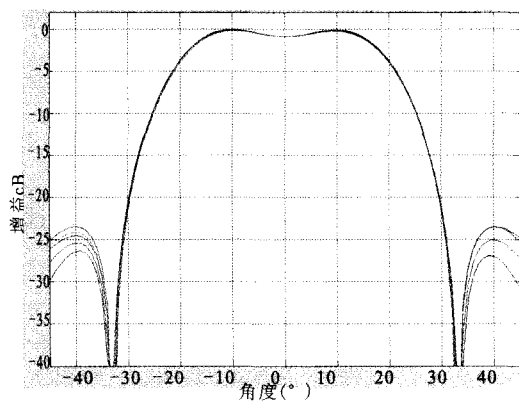


图4 一种发射天线仿真设计的赋形波束方向图

对每个单元均进行了幅相检测,结果如表1所示。可以看出其与设计值比较,单元之间最大相位差异为 $30^\circ$ 。阵面单元相位的不一致性与馈电组件之间的相位误差累计,使实际馈电相位大大偏离各

辐射单元所需的设计相位。该偏离差异的最终结果是使波束未能达到预期的赋形效果。为了部分消除单元之间的加工误差及单元之间互耦影响,在馈电系统中对其进行改进馈电补偿。重新测试得到的方向图如图 6 所示,满足要求。

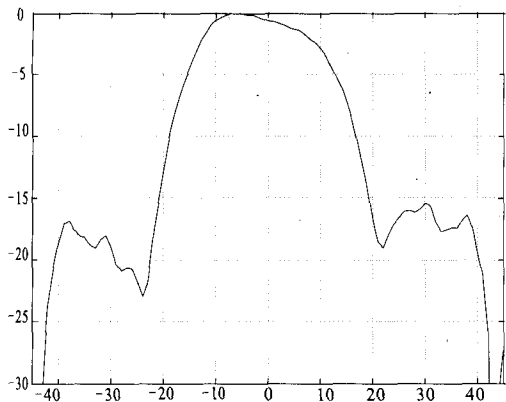


图 5 一种发射天线实测波束方向图

表 1 天线阵面幅相检测结果

序号	主极化 幅度(dB)	主极化 相位(°)	与目标相 位差异(°)
1	-3.5	74	-30
2	-3.3	60	-26
3	-3.2	130	-25
4	-3.5	-150	-27
5	-3.1	-109	-28
6	0.1	-121	-1
7	0.1	-11	-3
8	0.2	153	-1
9	0.1	141	-3
10	0.2	170	-3
11	0.2	-153	1
12	0.1	-131	-2
13	0.1	-89	-2
14	0.1	-69	-3
15	0.1	-55	1
16	0.1	-11	-3
17	0.2	32	-2

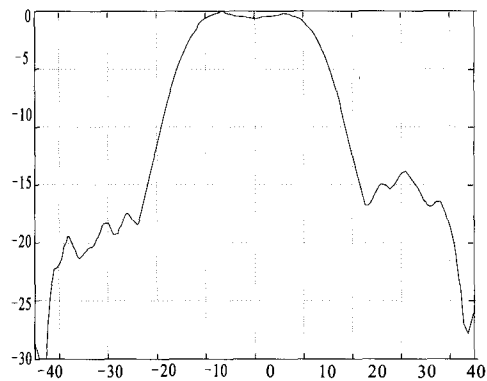


图 6 一种阵面天线改进馈电后的实测波束方向图

3 结束语

阵面天线的仿真结果得到标准的马鞍型赋形波束,而在实测中发现方向图发生畸变。通过采集有源单元方向图后再对辐射单元通道进行改进激励系数馈电,得到的实测方向图改善效果明显,满足要求。文章提出的在仿真设计基础上,结合单元实测有源方向图后再进行天线馈电补偿改进的设计方法,可以广泛应用到阵列天线领域,为阵面天线达到实际赋形效果提供参考依据。该方法可以消除一定的误差,避免研制过程中的其他不必要的重复工作,从而节约研制周期和经费。

参考文献:

[1] 汪茂光,吕善伟,刘瑞祥. 阵列天线分析综合[M]. 成都:电子科技大学出版社,1988.

作者简介:

杨文丽 1979 年生,工程师。主要从事卫星天线研制。  
吴春邦 1970 年生,研究员。主要从事卫星有效载荷研制。  
刘 波 1963 年生,研究员、博士生导师。从事卫星有效载荷研制。

## A Method to Correct Coefficient of the Array Antenna

YANG We-nli WU Chun-bang LIU Bo

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The results of the simulating and measuring the array antenna are provided in the paper, as well as the theory of it. The paper compares the results and points out that, for the array antenna, not only the coefficient of every channel should be met the requiring, but also the coefficient of every cell should be detected. According to the detected results, the paper describes the method of correcting the coefficient of the array antenna, which provides an important reference to the error correcting of beamforming.

**Key words:** Array antenna; Beamform; Measure; Simulating

=====

(上接第 34 页)

作者简介:

孙钰林 硕士研究生。主要研究方向:信道编码、航天器数据传输与处理。

吴增印 研究生导师,研究员。主要研究方向:

卫星通信、星载高速数据传输与处理。

王菊花 高级工程师。主要研究方向:信道编码、信源编码。

## FPGA Design and Implement of LDPC Code Encoder in CCSDS

SUN Yu-lin, WU Zeng-yin, WANG Ju-hua

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

**Abstract:** A class of low-density parity-check (LDPC) codes is recommended by CCSDS for application in deep space communication. To meet the requirement of using multi-rate LDPC codes in one space communication system, a general encoder that can implement 4 coding rates LDPC codes in CCSDS was designed. This encoder can save resource through arranging the storage reasonably and multiplexing the hardware resources completely. The encoder was implemented on FPGA, using VHDL language, and simulation results verify that it can realize 4 coding rates LDPC codes correctly with not much hardware resource.

**Key words:** CCSDS; LDPC; General encoder; Multi-rate; FPGA implement

## 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>