

# 一种圆柱共形阵天线的仿真与设计

郑治泰 孙从武 张小苗 鄢泽洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,西安 710071)

**摘要** 文章对一种  $x$ -频段的圆柱共形阵天线进行了仿真和测试。基于非相似元阵列天线理论计算了远场方向图,仿真设计了射频馈电功分器;测试了功分器的  $S$  参数,测量了天线的水平面方向图,测试结果与计算结果一致。

**关键词** 圆柱共形阵 馈电网络  $S$  参数 天线方向图

## 0 引言

随着科技的发展,现代化的交通运输工具变得越来越快,机械扫描形式的卫星移动通信天线越来越难适应对高速移动目标的实时跟踪。相控阵天线通过电控扫描代替机械扫描,提高了天线对目标的跟踪速度,是目前卫星移动通信天线的发展方向。平面相控阵,其优点是技术成熟,但由于所有天线单元均分布于同一平面,在形如飞机、导弹和航天飞行器等高速移动载体表面无法布置;另外,随着扫描角度的增大,增益跌落较快。共形阵天线单元与载体表面共形,有效地克服了平面阵的上述缺点。

圆柱共形相控阵天线可以实现水平面方向  $360^\circ$  扫描,在天线扫描过程中能维持或基本维持波束的形状和增益,可大体上保持相同的互耦。国外很早就对其展开了研究,1974年美国设计出导弹表面  $X$  波段圆柱共形阵<sup>[1]</sup>,首次把微带应用到天线单元和馈电网络中;1985年以色列计算出圆柱共形阵表面半波微带阵子的辐射方向图<sup>[2]</sup>,随即提出了圆柱共形阵的表面电流模式<sup>[3]</sup>,用于计算天线方向图;1999年德国制作出  $C$  波段室内圆柱共形相控阵天线<sup>[4]</sup>,工作带宽( $-10\text{dB}$ )达  $19\%$ 。

文章根据非相似元法推导出圆柱共形阵天线方向图计算公式,加工了天线的实验模型,测量了方位面方向图;仿真设计出一种微带型馈电网络,制作了印制电路板,测量了  $S$  参数。所有实测结果与理论结果吻合。

## 1 圆柱形共形阵方向图

### 1.1 圆柱形共形阵方向图

如图 1 所示,在半径为  $R$  的圆柱面上,均匀布满  $M$  行  $N$  列天线单元,单元的行距和列距分别为  $d_1$  和  $d_2$ 。以圆柱底面

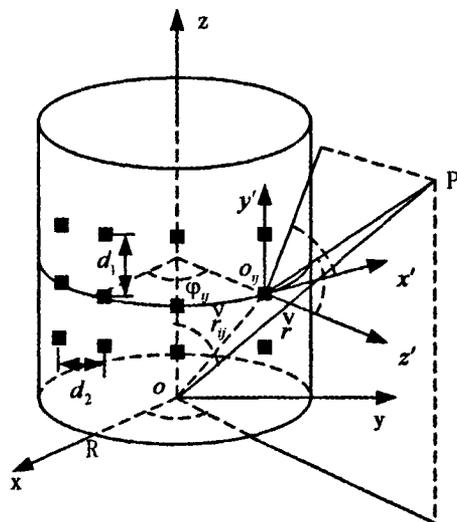


图 1 阵列的坐标关系及其结构示意图

圆心为原点建立总体坐标系 $(x, y, z)$ , 单元 $(i, j)$ 位于总坐标下的 $r_{ij}^{\omega}$ 处, 激励系数为 $a_{ij}$ , 以 $r_{ij}^{\omega}$ 为原点建立局部坐标系 $(x', y', z')$ 。

远区任意一点在总坐标下的球坐标为 $R(\theta, \varphi)$ , 经过坐标变换, 在局部坐标下的球坐标表示为 $P(\theta', \varphi')$ , 其关系式如下:

$$\begin{cases} \theta' = \cos^{-1}(\sin\theta \cos(\varphi - \varphi_{ij})) \\ \varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{\cos\theta}{-\sin\theta \sin(\varphi - \varphi_{ij})}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\varphi_{ij}$ 是局部坐标的原点在总体坐标下柱坐标的 $\varphi$ 坐标(下同)。

由于天线单元的远场与其在总体坐标系下的柱坐标位置 $O_{ij}(R, \varphi_{ij}, z_{ij})$ 有关, 指向又各不相同, 所以常规的方向图乘积定理不再成立。根据非相似元阵列天线理论, 把每一个单元都当成是各不相同的独立项进行叠加。以总坐标系原点 $o$ 为参考中心, 所有天线单元在 $(\theta, \varphi)$ 方向上辐射的合成场的表示式为:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\theta, \varphi) &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} \vec{f}_{ij}^{\omega}(\theta, \varphi) e^{-jk(x_i \sin\theta \cos\varphi + y_j \sin\theta \cos\varphi + z_j \cos\theta)} \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} \vec{f}_{ij}^{\omega}(\theta, \varphi) e^{-jk(R \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_{ij}) + z_j \cos\theta)} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$ 为空间电磁波的波长, 单元在总坐标系下的位置矢量为:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{ij}^{\omega} &= \hat{x}x_{ij} + \hat{y}y_{ij} + \hat{z}z_{ij} \\ &= R(\hat{x} \cos\varphi_{ij} + \hat{y} \sin\varphi_{ij}) + \hat{z}z_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

$\vec{f}_{ij}^{\omega}(\theta, \varphi)$ 为各单元在总体坐标系下的矢量方向图函数。

阵列单元取为矩形微带时, 在局部坐标下的球坐标表示<sup>[5]</sup>为:

$$\vec{f}_{ij}^{\omega}(\theta', \varphi') = \hat{u} \frac{\sin(kh \sin\theta' \cos\varphi')}{kh \sin\theta' \cos\varphi'} \frac{\sin(\frac{1}{2}ka \cos\theta')}{\cos\theta'} \sin\theta' \cos(\frac{1}{2}kb \sin\theta' \sin\varphi') \quad (4)$$

式中 $a, b$ 分别为单元的长和宽,  $h$ 为单元介质基片厚度,  $\hat{u}$ 为极化方向。

由(1)式局部坐标与总体坐标的关系, 可以把 $\vec{f}_{ij}^{\omega}(\theta', \varphi')$ 转换成 $\vec{f}_{ij}^{\omega}(\theta, \varphi)$ 。

### 1.2 圆柱共形天线阵的馈电网络

在相控阵天线中经常采用一分 $n$ 口的功率分配器(简称功分器)作为馈电网络。由于微带功分器体积小, 加工方便简单, 所以经常被用在微波集成电路中。

不等功比 Wilkinson 功分器<sup>[6]</sup>的拓扑结构及特性阻抗如图 2 所示。

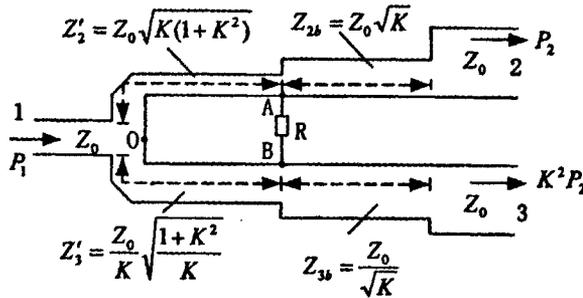


图 2 一分二口不等功分器拓扑结构及其各段特性阻抗

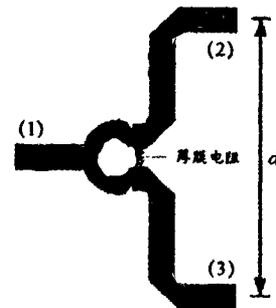


图 3 一分二等分功分器的结构图

在图2中  $K$  是2、3口的功率分配比,  $R$  是隔离电阻, 其阻值计算式<sup>[7]</sup>为:

$$R = \frac{Z'_2 Z'_3}{Z_0} = \frac{1+K^2}{K} Z_0 \quad (5)$$

采用基于矩量法的软件 Ansoft9.0-Designer 对二等分功分器进行仿真计算, 仿真过程中隔离电阻用等效双端口网络代替, 介质的损耗角正切设为  $\tan\delta=0.001$  通过大量的仿真和测试, 最后发现图3的结果较为满意, 在对其仿真过程中, 不断调节弧形阻抗变换段长度, 最终找到较为理想的值为  $0.175\lambda$ 。

测量图3功分器的  $S$  参数, 并与仿真比较, 结果如图4、图5、图6所示。

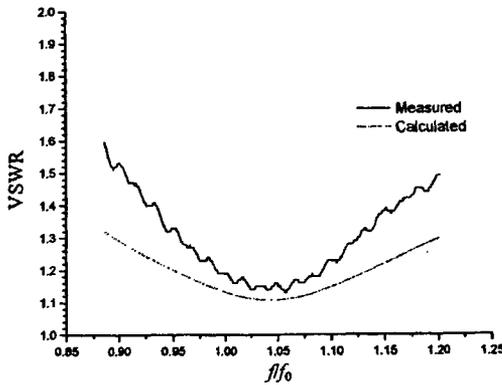


图4 一分二等分功分器1口驻波测量和仿真结果

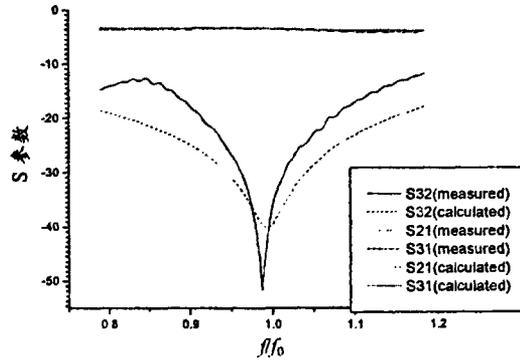


图5 一分二等分功分器  $S$  参数仿真和实测结果

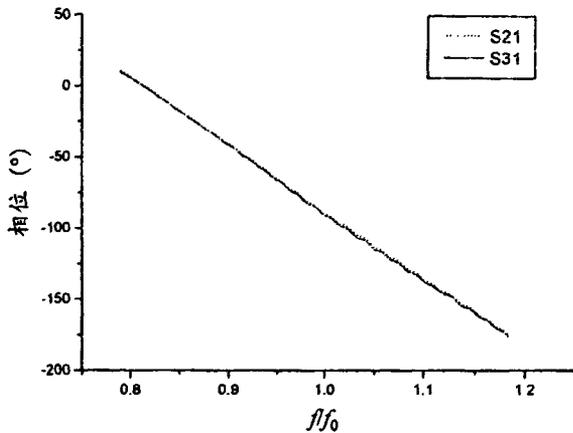


图6 输出端口的相位测量结果

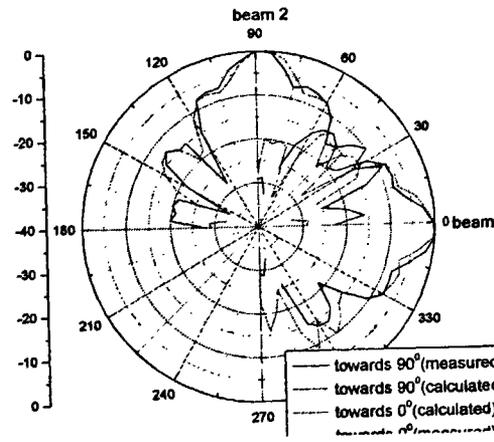


图7 天线扫描至  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时水平面方向图及理论比较

图中  $f_0$  为中心频率, 由图可见, 测试的各项参数与仿真结果吻合。测量的驻波比  $\rho < 1.5$ , 带宽为 35%; 在该带宽内  $S_{21}$  的测量值最大为  $-3.8\text{dB}$ , 最小为  $-3.5\text{dB}$ , 理论值最大为  $-3.7\text{dB}$ , 最小为  $-3.2\text{dB}$ ;  $S_{31}$  测量最大值为  $-3.7\text{dB}$ , 理论值为  $-3.9\text{dB}$ , 测量最小值为  $-3.2\text{dB}$ , 理论值为  $-3.29\text{dB}$ ;  $S_{23}$  的测量值最大为  $-16.383\text{dB}$ , 理论值为  $-22.2\text{dB}$ , 测量最小值为  $-51\text{dB}$ , 理论值最小为  $-41\text{dB}$ , 均在中心频率  $f_0$  附近;  $S_{21}$  和  $S_{31}$  的相位差测量最大值为  $1.85^\circ$ 。实测的驻波比仿真结果略大, 这是由于接头焊接的影响。

## 2 阵列测量结果及分析

这里分别对天线扫描至  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时水平面的方向图进行测量, 并与仿真数据作了比较, 其结果如图7所示。

由图可见,方向图的测量和仿真结果在主、副瓣区吻合,3dB波瓣宽度测量值为 $18^\circ$ ,理论计算值为 $19^\circ$ ,副瓣电平的测量值和理论值均为 $-13\text{dB}$ 。在副瓣区实际测量值的数值比计算值稍大,这是因为天线阵列单元之间存在互耦。

### 3 结 论

文章对一种工作于X频段的圆柱共形阵天线进行了仿真和测试,并设计出相应的微带功分器。推导了圆柱共形阵的一般性方向图函数;测量了天线扫描至 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 的水平面方向图,3dB波瓣宽度为 $18^\circ$ ,副瓣电平为 $-13\text{dB}$ ,与仿真结果吻合;设计的微带功分器,实测驻波比( $\rho < 1.5$ )带宽为35%,在该带宽内,实测插损在0.5dB左右,输出端口间的隔离度大于17dB、相位差小于 $18.5^\circ$ ,与仿真结果吻合。

#### 参考文献

- 1 Hunson R E. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 22, Issue 1, Jan 1974: 74~78
- 2 Ashkenazy J, Shtrikman S and Treves D. Radiation patterns of half-wavelength microstrip elements on cylindrical bodies. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1985. IEEE, Vol 23, June 1985: 401~404
- 3 Ashkenazy J, Shtrikman S and Treves D. Electric surface current model for the analysis of microstrip antennas on cylindrical bodies. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. Vol. 33, Issue 3, Mar 1985: 295~300
- 4 Loffler D, Wiesbeckl W, Johannisson B. Conformal aperture coupled microstrip phased array on a cylindrical surface. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999. IEEE, Vol. 2, 11~16 July 1999: 882~885
- 5 钟顺时. 微带天线理论与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社. 1991
- 6 Wilkinson E J. An  $n$ -way hybrid power divider. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 8, Issue 1, Jan. 1960: 116~118
- 7 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路. 北京: 人民邮电出版社. 1976

#### 作者简介

郑治泰 1981年生,西安电子科技大学电磁场与微波技术专业硕士研究生。

孙从武 总参通信部驻西安地区军事代表室军代表。

张小苗 1967年生,教授,博士,硕士生导师。主要研究方向为多种通信天线的分析与测试。

鄢泽洪 1964年生,教授,博士,硕士生导师。主要从事电磁场与微波技术的教学和研究工作,主要研究方向为移动卫星通信跟踪天线。

(上接第39页)

#### 作者简介

王 岗 1970年生,大本,高工,主要从事导航有效载荷的设计。

李 莘 1970年生,大本,高工,主要从事卫星有效载荷电测工作。

吴春邦 1970年生,大本,高工,主要从事卫星天线的设计。

## 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>