

# Ka 波段大型单脉冲平板缝隙天线的分析与设计

王文秀 王建\* 彭中卫

(电子科技大学电子工程学院, 成都, 611731)

2012-07-23 收稿, 2012-08-21 收改稿

**摘要:** 论文所分析的 Ka 波段平板缝隙阵列天线具有阵面尺寸大( $534.89 \text{ mm} \times 494.3 \text{ mm}$ )、缝隙多(5120)的特点, 因而对于阵面的设计运用优化总体设计, 并运用等效电路法结合电磁仿真软件 HFSS 得到精确的辐射缝以及耦合缝参数。同时为了减小加工难度, 对天线分象限分层分象限进行加工。经过实测验证, 测试结果与理论吻合良好, 在 $\pm 300 \text{ MHz}$  频带范围内驻波小于 2, 整个阵面的增益均大于 42 dB, 天线的方位副瓣电平达到 $-22.8 \text{ dB}$ , 倾仰副瓣电平达到 $-23.8 \text{ dB}$ , 零值深度在倾仰和方位均达到 $-30 \text{ dB}$ 。

**关键词:** 单脉冲; 平板缝隙天线; 等效电路法; 加工难度

中图分类号: TN823<sup>+</sup>.24 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2013)01-0057-06

## Analysis and Design of Ka-band Monopulse Large Waveguide Longitudinal Slot Array Antenna

WANG Wenxiu WANG Jian PENG Zhongwei

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, CHN)

**Abstract:** According to the manufacturing difficulty of MMW slotted waveguide longitudinal array antenna, the whole array including slots of 5120, and the area was  $534.89 \text{ mm} \times 494.3 \text{ mm}$ . the antenna parameters were designed accurately by optimizing whole design method and extracting impedance data of coupling slots, etc. Then we used the equivalent circuit of slotted array antenna. and obtained parameters with electromagnetic field simulator HFSS. In order to reduce the difficulty of processing, the antenna uses sub-quadrant layered and stratification process. After the actual test, the test results are in good agreement with the theoretical. In the working frequency band the VSWR all less than 2, the Gain of the whole array were above 42 dB, The Azimuth plane SLL could reach to  $-22.8 \text{ dB}$ , The elevation plane SLL could reach to  $-23.8 \text{ dB}$ , The zero depth in the azimuth and elevation plane all reach to  $-30 \text{ dB}$ .

**Key words:** monopulse; waveguide slot array antenna; equivalent network method; manufacturing difficulty

EEACC: 1310; 5270

\* 联系作者:E-mail:jianw5@uestc.edu.cn

## 引言

由于平板缝隙阵天线具有低剖面、重量轻、体积小、效率高并且易幅度相位加权等优点,且其体积小,比较容易实现低副瓣和极低副瓣,因而得到人们的关注并广泛应用于雷达通信领域。而随着脉冲多普勒雷达的发展,雷达的抗干扰性面临更大的挑战,使得低副瓣的平板缝隙天线得到很高的重视。单脉冲跟踪由于具有获取误差信号迅速、跟踪速度快、不存在起伏干扰、角跟踪精度高、抗干扰能力强等优点,因此在现代雷达中也得到了广泛的应用。由于以上一系列的优点,单脉冲平板裂缝阵天线被广泛用于雷达系统中,并显示了其优异特性。

Ka波段单脉冲平板裂缝阵天线阵面尺寸较大且缝隙数较多。而天线系统要实现单脉冲体制,其方位及俯仰均要实现和、差波束的要求,可将天线阵面分成四个子阵。由于天线阵面太大,而使加工天线面临比较大的挑战。通过将天线分为四块16个子阵,加上功分器网络和馈电结构,每块需要分四层应用真空焊接工艺进行焊接成。这种做法有效的降低设计的风险以及加工的难度。

对于天线阵起馈电作用的馈电网络,它包括耦合波导、馈电波导、若干个H-T以及非标准波导到标准波导过渡段等。考虑到整个天线的厚度限制,将耦合波导的一个宽壁与平面阵底部共壁,使其壁厚为0.8 mm,耦合波导仍然为非标准波导并且波导两端短路,与平面阵底部共壁的宽壁上开中心斜缝,子阵之间的辐射波导均共用短路板的箱梁结构,且每一个子阵需要一根耦合波导馈电。馈电波导通过缝耦合给耦合波导馈电,馈电波导也为非标准波导。而馈电波导之间则由H-T相互连接,这样可以减小馈电网络的高度,最后通过非标准波导到标准波导过渡段过渡到标准波导,连接到后面电路。在阵列的相邻两子象限各有两根耦合波导,这两根耦合波导成一条直线,当这两根耦合波导端与端相碰时,便没有足够的空间使每个波导在最末一个裂缝的 $\lambda_g/2$ ( $\lambda_g/2$ 为耦合波导内波长)处再接以短路端。因此,必须将段路端折叠起来。

## 1 理论分析及设计实例

阵面设计是根据天线的指标来设计整个天线的

口径尺寸、口径的分布、子阵的划分以及辐射耦合馈电波导的尺寸等关键参数,当各个部分设计完成后进行优化设计和综合性能分析。

### 1.1 天线总体布局

平板缝隙天线阵设计包括激励缝、辐射纵缝阵、耦合斜缝阵、和差网络、功率分配网络的设计几个部分组成,由于其馈电装置与辐射装置为集成一体,因而体积小、重量轻。图1为平板缝隙天线的加工图示。

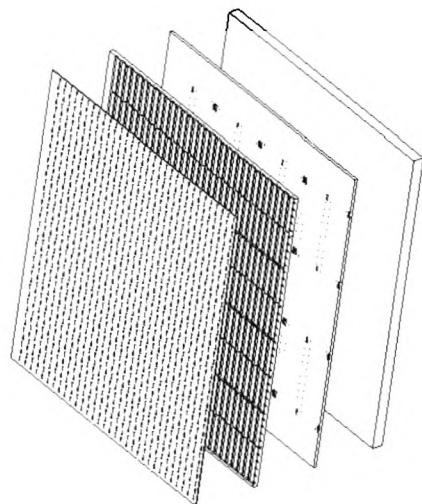


图1 天线分层加工图

Fig. 1 The process graph of separated layered antenna

由图1知,天线共分四个象限,每个象限为一个子阵,一个子阵由四层构成,分别为辐射缝(0.8 mm)、辐射波导和耦合缝及耦合波导(3.8 mm)、馈电缝和馈电网络(2.3 mm)、输入口盖板和法兰盘(8.5 mm)。总的厚度约为15.4 mm。

发射时,能量由和/差网路馈入,经由和差器组成的和差网络后等幅同/反向馈给功分网络,再通过功分网络的功率分配后,由辐射缝馈给耦合缝隙阵,耦合缝隙阵列的每个耦合缝将会对每行的辐射缝阵列进行馈电,而后通过各个辐射缝将能量辐射到自由空间。接收状态与发射状态是互易的。因此功分网络、和差网络、激励缝、耦合缝、辐射缝各个环节都必须严格控制,从而保证天线的性能。

### 1.2 缝隙参数的提取方法

对于缝隙的谐振缝长、导纳等参数可以通过实验的办法得到,缺点是费时费力并且成本较高;也可以通过理论计算,Elliott<sup>[1]</sup>为此做的贡献是为波导

缝隙阵列的设计提出了三个公式,引入了有源导纳的概念。当考虑了互耦的作用,可采用等效磁流片法或者矩量法计算而得到缝隙的各个参数,但是当考虑到互耦的计算时会比较繁琐。

随着计算机软件的飞速发展,使得通过有效地软件仿真来得到缝隙的谐振参数变得可行,同时能考虑缝隙的内外部互耦<sup>[2]</sup>,并且有效地节约了时间和成本,同时计算的精确性也使天线的设计效率得到极大的提高。

1.2.1 辐射缝隙参数的等效传输线模型 辐射缝隙可以等效于传输线中的并联导纳<sup>[3-4]</sup>。对开有辐射纵缝的一根波导,其等效电路如图2所示。

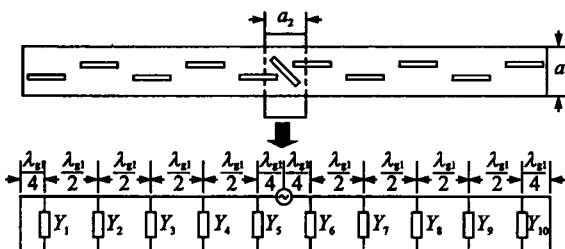


图2 小阵中一根波导辐射缝等效电路模型

Fig. 2 The equivalent circuit of longitudinal seam waveguide

设波导中第m行n列的那个缝隙的激励幅度为 $U_{mn}$ ( $m=1, 2, \dots, 64; n=1, 2, \dots, 80$ ),各缝隙工作在谐振状态,缝宽w、缝长l都一样,则每个辐射缝隙的电导 $G_s$ 都一样,且 $\frac{w}{l} \ll 1$ 。

得到辐射缝隙的等效并联电导与口径分布的关系即第mn个缝隙的等效电导为:

$$g_{mn} = g_{in} \frac{U_{mn}^2}{\sum_{n=1}^N U_{mn}^2} \quad (1)$$

由上式可见,知道了各缝隙的激励幅度分布,就可确定其等效电导。

对于辐射缝隙参数的提取可以仿真分析考虑互耦的小阵,由小阵中间或边缘那根波导缝隙线阵的等效电路,在理论上导出其输入反射系数 $S_{11}$ 和缝隙等效并联导纳 $y$ 的关系<sup>[5]</sup>,即

$$y = \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \times \frac{1}{N} \quad (N \text{ 为缝隙数}) \quad (2)$$

根据采用插值法绘出等效并联电导随偏心距变化的曲线以及谐振缝长随偏心距变化的曲线。

以考虑了互耦的 $8 \times 8$ 个辐射纵缝模型为例,得到缝隙长度和电导与偏置的关系曲线如图3和图4所示。

所示。

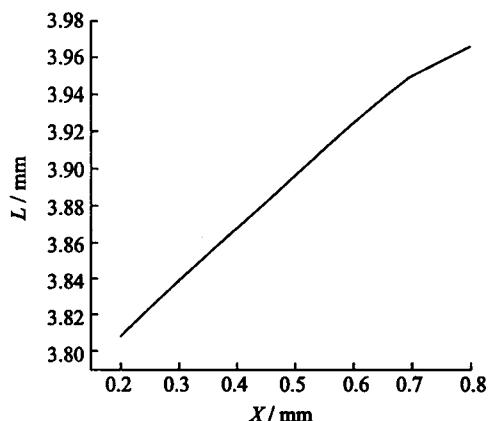


图3 缝长与偏置的关系曲线

Fig. 3 The relation curve of slot length and offset

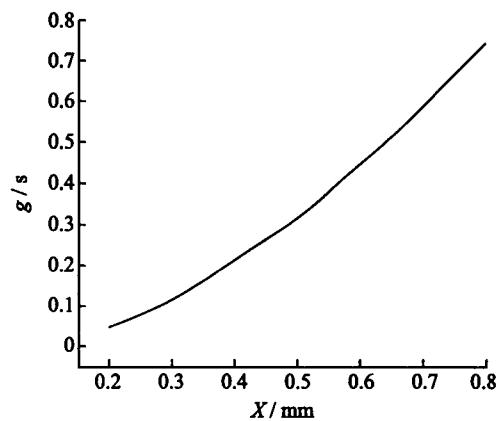


图4 电导与偏置的关系曲线

Fig. 4 The relation curve of conductance and offset

同样的,耦合缝隙是开在波导宽边上的斜缝,它们的倾角交错排列,这种宽边斜缝等效于传输线中的串联阻抗,其等效电路如图5所示。其中各缝隙间距为 $\lambda_g/2$ ,耦合波导终端为短路板,最后一个缝隙距离短路板距离为 $\lambda_g/2$ ,保证了各缝隙激励在磁耦合处且相同相位。

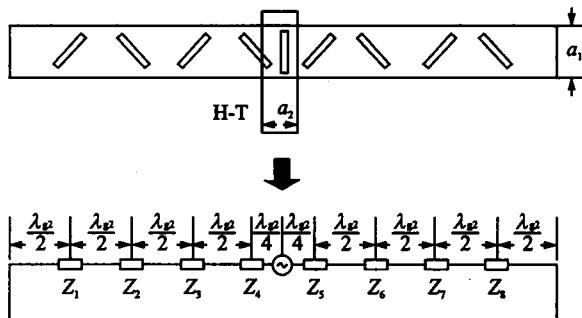


图5 小阵中一根波导耦合缝等效电路模型

Fig. 5 The equivalent circuit of one coupling waveguide

和辐射缝隙的分析类似,可以得出设第  $k$  个耦合斜缝的归一化等效串联谐振电阻为  $r_k$ , 可得出:

$$r_k = r_{in} \frac{\sum_{n=1}^N U_{kn}^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M U_{mn}^2}, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

其中,  $r_{in}$  为耦合波导的输入总电阻, 对耦合波导端馈时为 1, 中馈时为 2。 $M$  为耦合缝隙的个数, 也即辐射波导的根数。所以, 知道了斜缝的分布也就确定了耦合波导的导纳参数。

耦合缝隙的参数提取选择与辐射缝提取参数的模型有些差别, 耦合缝的位置必须处于两个辐射缝之间。耦合波导的接入位置则可根据矩形平面阵一个象限中各行辐射波导上的辐射纵缝等效电导值的分布来确定。对于中馈情况, 各辐射波导中各辐射纵缝的归一化导纳的总和应等于 2。由于每根辐射波导宽边上有  $N$  个辐射纵缝, 所以每个辐射缝隙的导纳应为  $2/N$ 。再通过前面设计小阵的辐射缝有源导纳得到的关系曲线来确定导纳为  $2/N$  的辐射纵缝偏置和长度。根据在理论上导出其输入反射系数  $S_{11}$  和缝隙等效串联阻抗  $Z$  的关系, 即

$$Z = \frac{S_{11} + 1}{1 - S_{11}} \times \frac{1}{M} (M \text{ 为中心斜缝数}) \quad (4)$$

根据式(1)得到的这些电导值通过查曲线便可以得到设计所需要的物理尺寸。与辐射缝隙一样, 耦合缝隙的设计可根据耦合缝隙等效电路得到其分布和阻抗的关系, 再根据提取的缝隙参数曲线就可得到给定分布的缝隙参数(倾角和谐振缝长)。根据插值法得到的倾角与谐振缝长及缝隙电阻之间的曲线关系见图 6 及图 7。

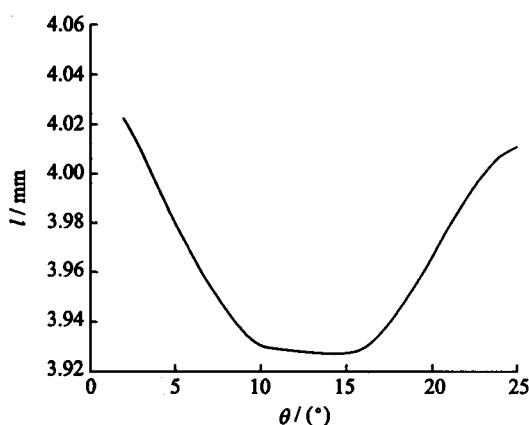


图 6 耦合缝隙的倾角和谐振长度曲线

Fig. 6 The relation curve of dip Angle and resonance length of coupling slot

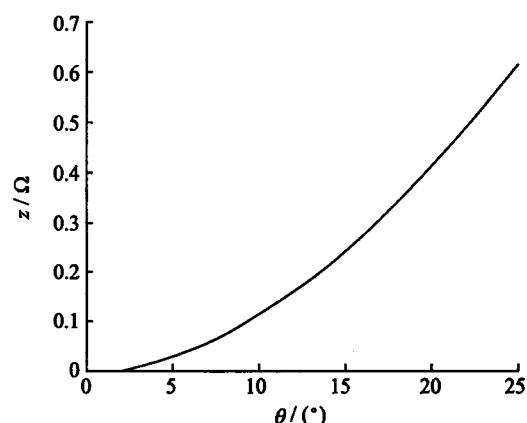


图 7 耦合缝隙的倾角和有源电阻关系曲线

Fig. 7 The relation curve of dip angle and active resistance of coupling slot

### 1.3 实例验证

天线的预定目标为: 工作频率 Ka 波段; 天线和波束增益大于 42 dB; 副瓣电平小于 -18 dB(两个主平面内); 零值深度小于 -25 dB; 驻波比小于 2; 频带宽度为 600 MHz; 口径尺寸不大于 500 mm(俯仰面) × 600 mm(方位面)。

首先对天线辐射特性测试在电子科大微波暗室进行的, 由于当时的条件限制, 天线的和方向图、方位差方向图、俯仰差方向图的平面近场是分别进行测试的。测试结果是和方向图及方位差方向图基本满足要求, 其和波束增益测试结果为 42 dB, 但俯仰差方向图的两个峰差约 3 dB, 上边频时的两个峰差达 4 dB, 显然, 天线输入端 1 口和 2 口与 3 口和 4 口之间存在幅度和相位的不平衡。

然后为解决这个问题又对天线进行了室外远场调试及测试, 图 8 为挑选的四块子阵所组成的天线。

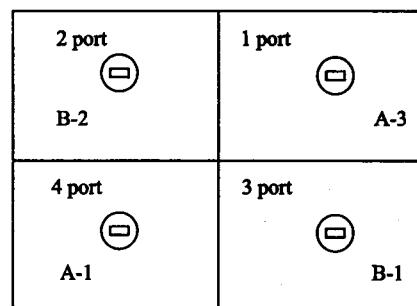


图 8 实测天线组装图

Fig. 8 The antenna assembly figure

组成天线后测试的俯仰差方向图两个峰差较大为 3~4 dB, 而在 1 口和 2 口的链接波导(和差网络的

输出对应端口的波导)内加适当的介质片平板缝隙天线就可测得较好的方向图特性。测得了加入介质片后所产生的附加相位,如表1所示。

表1 加入介质片后所引入的附加相位值

Tab. 1 The additional phase of the dielectric slab

$f/\text{GHz}$	Phase/(°)	
	1 port	2 port
$f_0 - 300 \text{ MHz}$	7.0	9.5
$f_0 - 200 \text{ MHz}$	7.8	10.5
$f_0 - 100 \text{ MHz}$	8.3	10.0
$f_0$	6.9	8.3
$f_0 + 100 \text{ MHz}$	7.9	10.3
$f_0 + 200 \text{ MHz}$	7.6	10.2
$f_0 + 300 \text{ MHz}$	8.1	9.1

在测试场地,有两个信号发射点,发射点A距被测天线230 m,发射点B距被测天线100 m,如图9所示。虽然在发射点B附近有障碍物(一栋建筑),但两个发射点对应的测试结果相差不是很大。

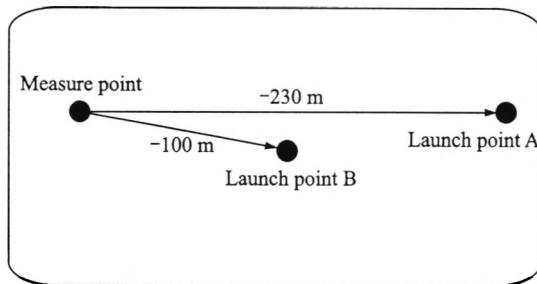


图9 测试场地示意图

Fig. 9 Diagram of test site

由远场条件公式,取中心频率对应的波长为 $\lambda=8.57 \text{ mm}$ ,天线口径尺寸 $D=538 \text{ mm}$ 则得

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} = 67.5 \text{ m} \quad (5)$$

所以,被测天线到两个发射点的距离均满足远场条件。

## 2 测试结果以及加工实物

测试结果为:天线和波束增益基本为42 dB;副瓣电平基本达到-23 dB(两个主平面内);零值深度小于-30 dB;驻波比基本小于2。

图10-图13为图8所示天线经过远场测试后得到的方位面以及俯仰面的和差方向图以及驻波,可以看到均基本符合指标要求。

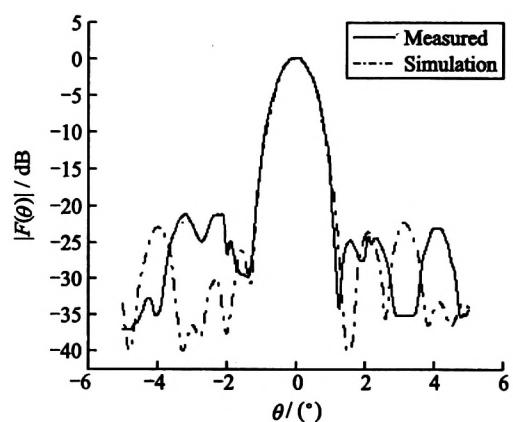


图10 方位面和方向图

Fig. 10 The sum pattern of the azimuth plane

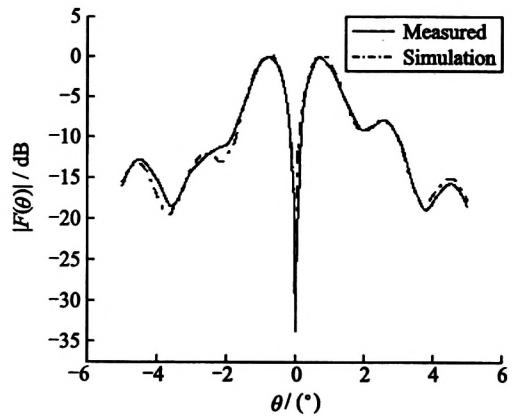


图11 方位面差方向图

Fig. 11 The difference pattern of the azimuth plane

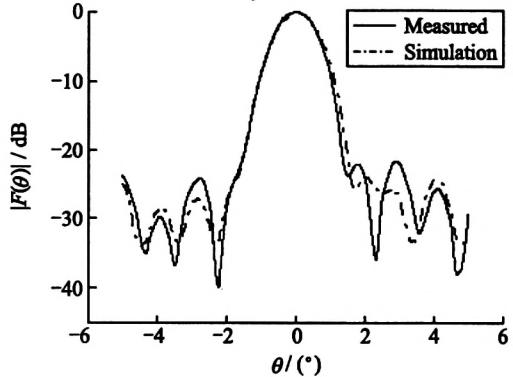


图12 倾仰面和方向图

Fig. 12 The sum pattern of the elevation plane

由表2可以看出,只有A-1编号的子阵在高频的时候其驻波会大于2,其他的均小于2而基本满足技术指标的要求。而子阵A-1在高频时略大的原因是由于加工误差引起的。

图14给出整个天线的实物图的正面,组成整副天线的四层实物图见图15(馈电缝以及馈电网络、辐射缝、辐射波导耦合缝以及耦合波导以及输入人口盖板和法兰盘)。

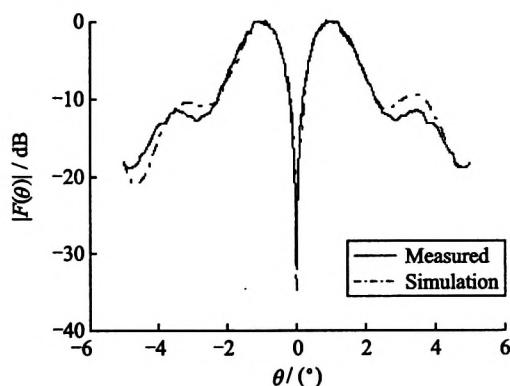


图13 俯仰面差方向图

Fig. 13 The difference pattern of the elevation plane

表2 测试天线的驻波  
Tab. 2 The VSWR of the antenna

Label of sub-array	Frequency		
	$f_0 - 300$ MHz	$f_0$	$f_0 + 300$ MHz
B-2	1.41	1.43	1.87
A-3	1.12	1.52	1.54
A-1	1.27	1.71	2.12
B-1	1.57	1.47	1.83

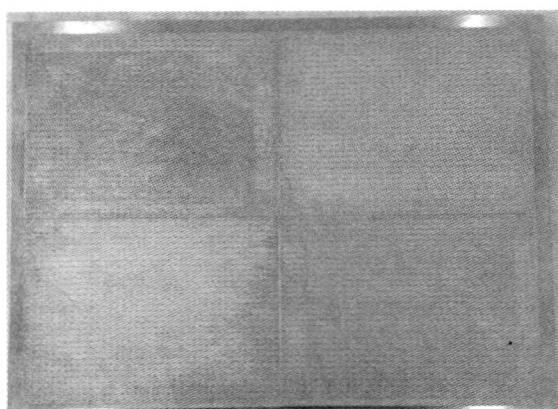


图14 整个天线的实物图

Fig. 14 The final test antenna

### 3 结 论

提供了一种简单而又独特的利用等效电路法的缝隙提参方法,应用电磁仿真软件HFSS得到缝隙的详细数据,并使用分层分象限的加工方法大大降低了天线的加工难度。使用这种设计方法得到的天线实物的测试结果表明了设计的正确性。

### 参 考 文 献

- [1] Elliott R S. Design, analysis of slotted waveguide antenna array[J]. Journal of Microwaves, 1988, 31(6):

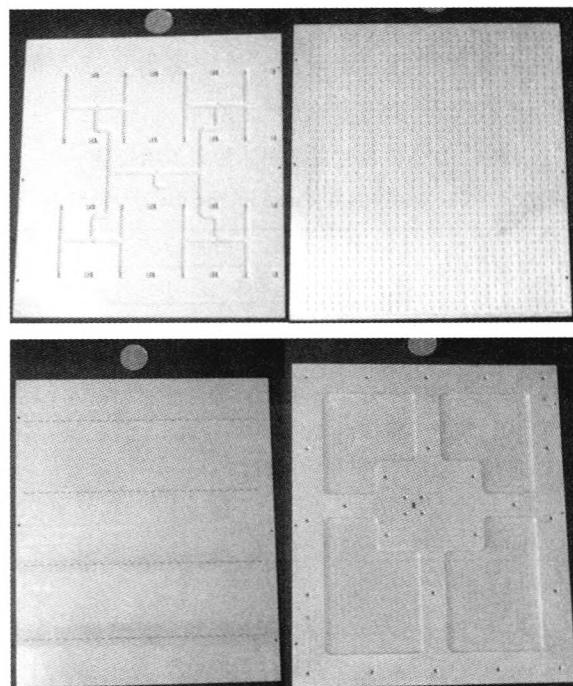


图15 天线实物的四层结构图

Fig. 15 The four-layer structure of the antenna

109-125.

- [2] Brown K W. Design of waveguide slotted arrays using commercially available finite element analysis software [J]. IEEE Antennas Propag Mag, APS, 1996, 2(6): 1000-1003.
- [3] 金剑,万笑梅,汪伟,等.波导平板裂缝天线阵的设计[J].雷达科学与技术,2007,3(5):232-235.
- [4] 李龙,张玉,李建瀛,等.大型波导纵缝阵列天线的分析与设计[J].微波学报,2002,18(1):11-14.
- [5] 齐美清,汪伟,金谋平.基于HFSS的波导裂缝有源导纳的计算方法[J].雷达科学与技术,2006,4(2):121-128.



王文秀(WANG Wenxiu) 女,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:天线理论与技术。



王 建(WANG Jian) 男,1956年生,教授,硕士生导师,研究领域:天线理论与技术,计算电磁学。

## 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>