

文章编号 1005-0388(2013)03-0479-06

## 一种 W 波段圆极化微带天线研究

赵国强 时 亮 陈卓著 孙厚军 吕 昕

(北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

**摘 要** 研究了不同馈电形式的 W 波段圆极化微带天线阵列, 并采用等幅同相馈电方式以及新型波导到微带过渡结构, 完成了圆极化阵列天线的设计. 由理论分析和仿真结果可知, 通过选择合适的介质, 以及利用单元间等幅同相馈电, 既能有效减小 W 波段天线的损耗, 又能实现圆极化的良好轴比特性. 功分网络的合理排布, 波导到微带过渡结构亦有利于减小天线损耗. 对  $8 \times 8$  阵列天线进行实测,  $S(1,1)$  小于  $-15$  dB 的相对带宽为 4.3%, 轴比小于 3 dB 的波瓣宽度为  $11^\circ$ , 中心频点 94 GHz 时天线增益为 20.6 dB, 与仿真结果基本吻合.

**关键词** W 波段; 圆极化; 微带天线

**中图分类号** TN820.1<sup>+</sup>1

**文献标志码** A

### Circular polarization microstrip antenna at W band

ZHAO Guoqiang SHI Liang CHEN Zhuozhu SUN Houjun LÜ Xin

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** A circular polarization array antenna at W band is designed by analyzing and comparing different feeding forms, using constant amplitude and in-phase feeding and waveguide-microstrip transition. According to the theoretical analysis and simulation results, the loss of W band antenna can be reduced, good axial ratio and suitable arrangement of feeding network can be realized by choosing proper dielectric, using waveguide-microstrip transition and constant amplitude and in-phase feeding of each unit radiation patch, which is ideal for the realization of circular polarization array antenna at W band. The bandwidth of the  $8 \times 8$  array antenna are 4.3% when  $S(1,1) < -15$  dB. The beamwidth of the antenna is  $11^\circ$  when axial ratio is below 3 dB. And the maximum achievable gain of this antenna is 20.6 dB. Test and simulation results are in good agreement.

**Key words** W band; circular polarization; microstrip antenna

### 引 言

随着航空事业的迅猛发展, 毫米波高频段雷达和通信系统的需求量日益增大<sup>[1-3]</sup>, 毫米波处于微波和红外之间, 与红外相比, 毫米波更能适应战场复杂的环境和恶劣的气候条件<sup>[4]</sup>; 与微波相比, 毫米波目

标探测有着更高的精度, 因此, 在精确制导领域有着非常重要的应用价值. 天线作为雷达制导的重要组成部分之一, 会直接影响整个系统的性能. 如何在国内外现有工艺及加工条件下制造出性能优良的 W 波段天线, 从而充分利用 W 波段的优势已成为当今的研究热点. 国内外已经成功研制了工作在 W 波

收稿日期: 2012-05-17

联系人: 赵国强 E-mail: zhaogq1976@bit.edu.cn

段的卡塞格伦天线和波导缝隙天线<sup>[5-6]</sup>,因为它们具有增益大、效率高等特点.但是卡塞格伦天线为反射面天线结构,会占用大量的空间,而波导缝隙天线虽然具有低剖面、结构紧凑等特点,但由于毫米波尤其是W波段波导尺寸较小,对加工精度要求很高,加工微小的误差会对天线性能造成很大的影响,制作难度非常大<sup>[7]</sup>.微带天线以其体积小、重量轻、成本低、易于与有源电路集成等优点而得到广泛应用<sup>[8-9]</sup>.而国内利用印制板工艺亦可保证其加工精度,将微带天线利用于W波段能大大节省空间,降低生产成本,降低制作难度.

圆极化微带天线相对于线极化天线具有显著的优点<sup>[10-11]</sup>,因为圆极化天线能接收到任意极化的来波,并且其辐射出去的圆极化波也可以由任意极化的天线接收.因此圆极化天线具有较强的电子侦察和抗干扰能力,具有广泛的应用.

## 1 天线圆极化激励原理分析

### 1.1 天线单元圆极化激励原理分析

根据微带天线的腔模理论,其 $TM_{01}$ 模和 $TM_{10}$ 模在天线面法向形成相互垂直的电场分量.使此二分量大小相等、相位相差 $90^\circ$ ,便可产生圆极化辐射.设贴片尺寸为 $a \times b$ ,则 $TM_{01}$ 模辐射电场

$$E_y = j \frac{2aU_{01}}{\lambda_0 r} e^{-jk_0 r}. \quad (1)$$

式中:  $U_{01} = hB_{01} = jk_0 \eta_0 \frac{I_0 h}{k^2 - k_{01}^2} \left( \frac{2}{ab} \right) \cos \frac{\pi y_0}{b}$ ;  
 $k_{01} = \frac{\pi}{b}$ .

$TM_{10}$ 模的辐射电场为

$$E_x = j \frac{2bU_{10}}{\lambda_0 r} e^{-jk_0 r}, \quad (2)$$

式中:  $U_{10} = hB_{10} = jk_0 \eta_0 \frac{I_0 h}{k^2 - k_{10}^2} \left( \frac{2}{ab} \right) \cos \frac{\pi x_0}{a}$ ;  $k_{10} = \frac{\pi}{a}$ .

选择 $a \approx b$ ,则 $k_{01} \approx k_{10}$ ,于是当选择频率使 $k$ 接近于 $k_{01} \approx k_{10}$ 时,两种模式同时被激励,称为简并模.此时,只需满足 $k - k_{10}$ 比 $k - k_{01}$ 超前或滞后 $\pi/2$ 即可辐射圆极化波.

天线的加工精度和损耗也是设计微带天线必须要考虑的问题<sup>[12]</sup>.选择合适介电常数和厚度的介质对W波段的实现至关重要.介电常数大的介质,其贴片尺寸小,加工精度不易保证;而对于介电常数一定的介质,越厚损耗越大.因此,对介质的选取应该

越薄、介电常数越小越好.本天线形式选用厚度为 $0.127 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r = 2.2$ 的介质.

### 1.2 圆极化阵列排布分析

对于阵列天线单元间距的选择主要从两个方面考虑:既要使单元的个数尽可能多从而提高口径的利用率和天线的增益,同时也要考虑互耦的影响.

按照格林函数法分析四元阵的结果表明:当单元间距 $d = 0.8 \lambda_0$ 时能获得最大方向系数,而当 $d = 0.75 \lambda_0$ 时能获得最大增益.互耦的影响可通过适当选取单元间距 $d$ 来处理.由于W波段波长较短,为了便于各贴片单元间功分网络的排布,单元间距不宜过小.综合上述各方面考虑,选取H面单元间距 $d = 0.8 \lambda_0$ ,E面单元间距 $d = 0.8 \lambda_0$ .

对于圆极化阵列天线,不仅要考虑圆极化的轴比及驻波带宽,还要考虑天线功分网络的排布以及损耗.圆极化天线馈电方式也有多种形式<sup>[13-15]</sup>,为了确定阵列的排布形式,可对单元间反相馈电、同相馈电以及相位差 $90^\circ$ 旋转馈电做具体的分析.

$2 \times 2$ 子阵设计方法通常有如图1(a)、(b)、(c)所示,图1(a)为单元间等幅反相馈电,图1(b)为等幅同相馈电,图1(c)单元间 $90^\circ$ 旋转馈电.其中,每个贴片单元为在边射方向上每个单元的辐射场都可以分解为两个极化正交且相移 $90^\circ$ 的场,图1(a)、(b)所示馈电结构四个单元等幅反相或同相馈电,在边射方向上的辐射场仍然可以分解成四个相位相同的相移是 $90^\circ$ 的圆极化场,所以在边射方向上的辐射场仍然是圆极化场.图1(c)的等幅 $90^\circ$ 相差馈

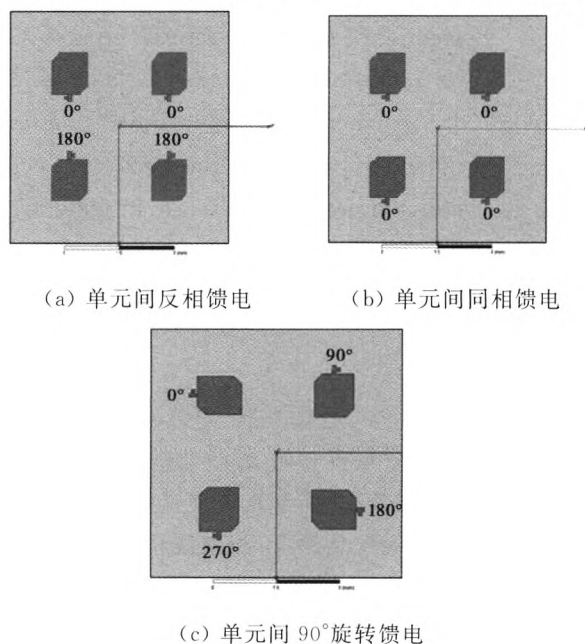


图1 天线阵馈电方式

电结构,四单元的馈电相位分别为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ ,振幅都相同.馈电点的位置要正确选择,以使  $180^\circ$  和  $270^\circ$  的单元分别与  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的单元辐射同相的相同极化分量,这样,它们在  $xoz$  面总辐射场可以表示为

$$\begin{aligned} E_{xx} &= E_1 e^{j90^\circ} e^{jk_0 d_x \sin \theta} + E_2 e^{j0^\circ} e^{-jk_0 d_x \sin \theta} \\ &\quad + E_3 e^{j90^\circ} e^{-jk_0 d_x \sin \theta} + E_4 e^{j0^\circ} e^{jk_0 d_x \sin \theta} \\ &= (E_1 e^{j90^\circ} + E_4 e^{j0^\circ}) e^{jk_0 d_x \sin \theta} + (E_2 e^{j0^\circ} \\ &\quad + E_3 e^{j90^\circ}) e^{-jk_0 d_x \sin \theta}. \end{aligned} \quad (3)$$

假设单元为左旋圆极化

$$\begin{cases} E_1 = E_3 = E_x \hat{x} e^{j0^\circ} + E_y \hat{y} e^{j90^\circ} \\ E_2 = E_4 = E_x \hat{x} e^{j90^\circ} + E_y \hat{y} e^{j180^\circ} \end{cases}, \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得

$$E_{xx} = e^{j90^\circ} (E_x \hat{x} e^{j0^\circ} + E_y \hat{y} e^{j90^\circ}) \times 8 \cos(k_0 d_x \sin \theta). \quad (5)$$

当在  $xoz$  面上偏离边射方向 ( $\theta=0$ ) 时,1、2 单元因波程差所引入的辐射场相移正好与 3、4 单元的波程差相移相反,其效应相互抵消,改进了轴比特性.

将三种馈电结构进行仿真对比如图 2 所示,亦可观察到利用旋转馈电能改善其轴比特性.

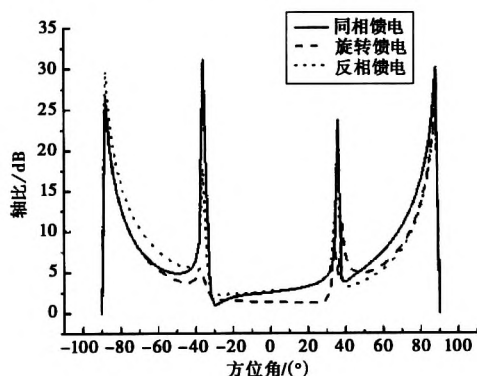


图2 不同馈电方式轴比仿真对比

虽然根据仿真结果利用旋转馈电,轴比效果有所改善,但是要求其馈电端口相位均相差  $90^\circ$ ,其馈电网络设计复杂,对于 W 波段来说,复杂的馈电网络将导致损耗增大,馈线间的耦合量也会增大,这些因素将对此波段的天线性能产生重大的影响.单元间反相馈电由于需要在馈电端口引入  $180^\circ$  的相位差,而为了抑制栅瓣的出现 W 波段两贴片间距不宜过大,两贴片间距限制了微带线  $180^\circ$  的相位差的实现,单元间反相馈电也不利于 W 波段微带天线的实现.根据以上分析可得知,最理想的阵列摆布形式为单元间同相馈电.

万方数据

## 2 天线设计与结果分析

### 2.1 天线单元设计

根据上述分析设计圆极化天线单元,并对单元进行仿真优化得到下列结果.

天线单元形式如图 3 所示.

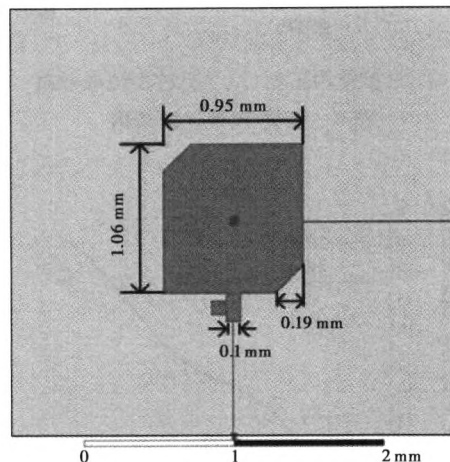


图3 圆极化天线单元形式

由仿真结果可知,中心频率 94 GHz 时,驻波小于 1.3,驻波小于 2 的相对带宽能达到 9%,单元左旋圆极化增益为 7.4 dB,其轴比为 1.5 dB.

### 2.2 波导-微带过渡结构设计

天线馈电方式可考虑采用波导-微带转换馈电.对于 W 波段天线,相比于同轴-微带过渡,波导-微带过渡结构损耗小,即有利于天线的加工,又有利于天线的测试.传统的微带-波导过渡将微带线深入波导侧壁,微带线相当于探针在波导内部激励  $TE_{10}$  波,从而实现良好的过渡.这种结构虽然比较成熟,但是需要引入四分之一波长金属短路壁,相当于在微带线上方引入微小的“金属帽”,这在加工精度上增加了难度.在波导口放置金属贴片,通过缝隙使波导与微带线之间产生耦合亦可以实现波导到微带线的过渡<sup>[16]</sup>,这种方法可避免金属帽的出现,使过渡结构与加工更加简单方便.

波导-微带过渡结构如图 4 所示.

图 5 为此过渡结构 S 参数曲线,中心频点损耗为 0.5 dB,驻波小于 1.1,能实现良好的波导-微带过渡.

### 2.3 圆极化微带阵列天线设计及实验

以  $2 \times 2$  单元结构为基础,将其扩展成  $8 \times 8$  阵列,引入波导-微带过渡结构,从而实现圆极化微带阵列天线.图 6 为此天线实物图.

对该天线进行测试,结果如图 7 所示.此 W 波

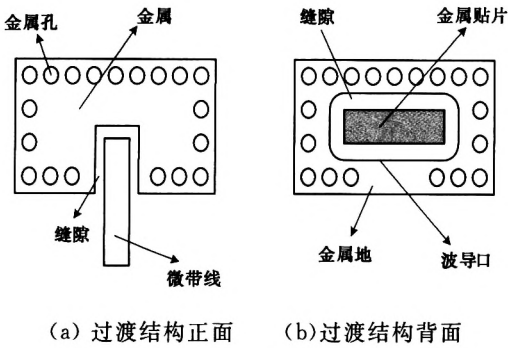
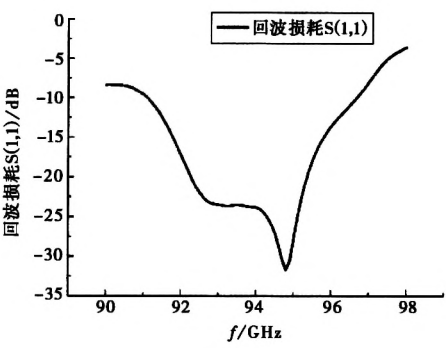


图 4 波导-微带过渡结构



(a) 天线回波损耗

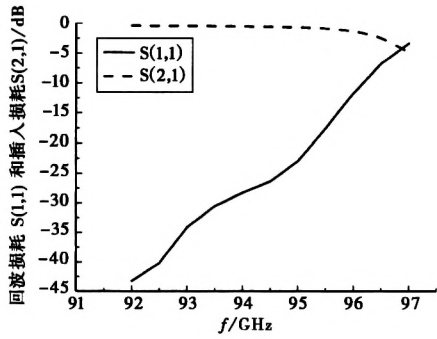
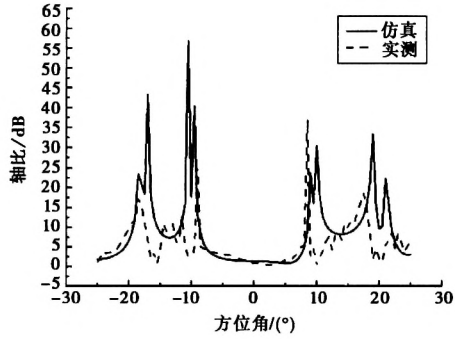


图 5 过渡结构仿真结果



(b) 轴比仿真与实测

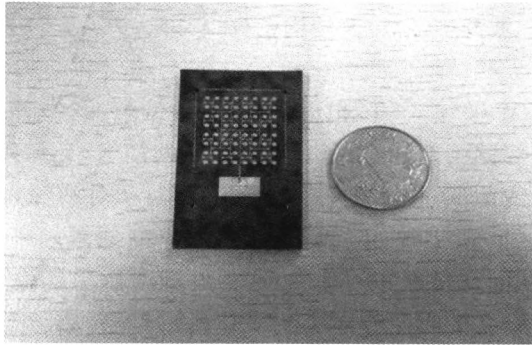
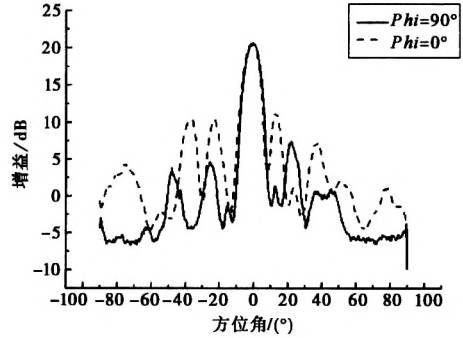


图 6 阵列天线实物图



(c) 方向图实测

图 7 微带阵列实测结果

段圆极化阵列天线实测结果回波损耗优于 $-15\text{ dB}$ 的相对带宽为 $4.3\%$ ,具有良好的驻波特性.比较仿真与实测结果后发现,实测天线轴比与仿真结果吻合较好,中心频点处轴比小于 $3\text{ dB}$ 的波束宽度为 $11^\circ$ 有着较好的圆极化特性.

天线方向图 $\text{Phi}=90^\circ$ 一维具有很好的副瓣特性,但是在 $\text{Phi}=0^\circ$ 副瓣电平较高,这是由于天线的馈电结构的不对称引起电流分布不均匀,从而导致天线副瓣电平在这一维较高.

表 1 列出了天线在不同频率的仿真与实测增益,比较可以发现,天线实测增益比仿真低一些.这主要由两个因素引起:1)波导-微带过渡结构的加工

误差导致过渡结构的损耗比仿真大;2)W 波段天线的波束宽度较窄,造成测试中最大波束指向与标准喇叭不能准确对准所造成的测试误差.综上所述,天线具有较好的圆极化辐射特性,与仿真结果较为一致.

表 1 阵列天线增益

频率	93 GHz	93.5 GHz	94 GHz	94.5 GHz	95 GHz
仿真	21.3 dB	21.5 dB	21.5 dB	21.2 dB	20.5 dB
实测	20.2 dB	20.3 dB	20.6 dB	20.2 dB	19.9 dB

3 结 论

通过分析和仿真了 W 波段圆极化微带阵列天

线的不同馈电形式,确定了阵列天线的单元形式和组阵方式,对阵列进行加工测试,回波损耗优于-15 dB的相对带宽达到4.3%。最高增益可以达到20.6 dB,轴比优于3 dB的波瓣宽度为 $11^\circ$ ,具有良好的圆极化辐射特性。在导弹、雷达等航空航天领域,具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] POZAR D M, TARGONSKI S D, SYRIGOS H D. Design of millimeter wave microstrip reflect arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(2): 287-296.
- [2] MUNSON R, JOY E. Microstrip antenna technology at ball aerospace systems, Boulder Colorado [J]. Antennas and Propagation Society Newsletter, 1979, 21(3): 4-6.
- [3] RAMANT S, BARKER N S, REBEIZ G M. A W-band dielectric-lens-based integrated monopulse radar receiver [C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1998, 2(2): 517-520.
- [4] 路 远, 凌永顺, 冯云松. 毫米波制导武器及其防护 [J]. 现代防御技术, 2004, 32(3): 23-26.  
LU Yuan, LING Yongshun, FENG Yunsong. Millimeter wave guidance weapons and defence against them [J]. Modern Defence Technology, 2004, 32(3): 23-26.
- [5] MENG Hongfu, DOU Wenbin. Design of diffractive Cassegrain antenna at W band [C]// 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, 2011, 2: 1176-1178.
- [6] MIGLIACCIO C, DAUVIGNAC J Y, BROCHIER L, et al. W-band substrate integrated waveguide slot antenna [J]. Electronics Letters, 2005, 41(4): 165-167.
- [7] 尤立志, 窦文斌. W波段雷达导引头低剖面单脉冲天线研究 [J]. 现代防御技术, 2008, 36(6): 124-129.  
YOU Lizhi, DOU Wenbin. Low profile monopulse antenna for radar seeker at W band [J]. Modern Defence Technology, 2008, 36(6): 124-129.
- [8] POZAR D M. Microstrip antennas [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(1): 79-91.
- [9] CARVER K R, MINK J W. Microstrip antenna technology [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(1): 2-24.
- [10] 朱 莉, 王光明, 高向军. 一种新型宽带圆极化微带天线的设计 [J]. 微波学报, 2008, 24(3): 21-24.  
ZHU Li, WANG Guangming, GAO Xiangjun. Design of a new circular polarization broadband microstrip antenna [J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(3): 21-24.
- [11] 薛睿峰, 钟顺时. 微带天线圆极化技术概述与进展 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(4): 331-336.  
XUE Ruifeng, ZHONG Shunshi. Survey and progress in circular polarization technology of microstrip antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(4): 331-336.
- [12] POZAR D M. Considerations for millimeter wave printed antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1983, 31(5): 740-747.
- [13] TESHIOGI T, TANAKA M, CHUJO W. Wide-band circularly polarized array antenna with sequential rotations and phase shift of elements [C]// Proc Int Symp on Antennas and Propagation. Japan, 1985: 117-120.
- [14] HALL P S, HUANG J, RAMMOS E, et al. Gain of circularly polarized arrays composed of linearly polarized elements [J]. Electron Letters, 1989, 25(2): 124-125.
- [15] ITO K, ITOH K, KOGO H. Improved design of series-fed circularly polarized printed linear arrays [J]. IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation, 1986, 133(6): 462-466.
- [16] IIZUKA H, SAKAKIBARA K, KIKUMA N. Millimeter-wave transition from waveguide to two microstrip lines using rectangular patch element [J]. IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(5): 899-905.

## 作者简介



**赵国强** (1976—), 男, 北京理工大学讲师、硕士生导师, 研究方向为微波/毫米波电路与系统、多极化天线技术、目标极化散射特性和极化信息处理。



**时 亮** (1989—), 男, 硕士生。主要研究方向为微波/毫米波电路与系统、天线理论与技术。



**陈卓著** (1988—), 男, 硕士生. 主要研究方向为微波/毫米波电路与系统、天线理论与技术.



**吕昕** (1960—), 男, 北京理工大学教授、博士生导师, 中国电子学会微波分会副主任委员. 研究方向为微波毫米波和太赫兹系统工程、微波毫米波和太赫兹集成电路、天线理论与技术.



**孙厚军** (1969—), 男, 北京理工大学教授, 博士生导师, 研究方向为毫米波雷达系统、微波通信系统等.

---

(上接第 478 页)

#### 作者简介

**陶伟** (1985—), 男, 湖北人, 中国科学院研究生院在读博士生, 主要研究方向为高纬电离层不规则体及扰动传播.

**史建魁** (1954—), 男, 陕西人, 博士, 中国科学院空间科学与应用研究中心研究员, 中国科学院研究生院教授, 博士生导师, 主要从事电离层与磁层及其耦合以及地球与行星比较研究.

**王国军** (1977—), 男, 黑龙江人, 博士, 主要从事电离层扰动和不规则体以及电离层模型研究.



## 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>