

## 新型相控阵天线波束展宽问题研究

安怀彬, 朱爱雅

(解放军驻七八六厂军事代表室, 西安 710043)

**摘要:** 某新型制导雷达在S曲线测试时发现, 在波束展宽状态下曲线异常, 针对此问题, 进行了分析研究, 确认由于天线波束展宽方法引起。对天线波束展宽方法进行了研究, 进行了仿真和实际测试, 试验表明采取外缘单元“0、 $\pi$ 随机配相法”进行波束展宽满足任务要求, 问题得到解决。

**关键词:** 制导雷达; 相控阵天线; 波束展宽; S曲线

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1674-7976-(2014)03-209-05

### Study of Beam Broadening on New Phased Array Antenna

AN Huaibin, ZHU Aiya

**Abstract:** In S curve testing, new guidance radar is found to be unusual in condition of beam broadening. After the analysis, we trust this issue is caused by beam broadening method. So the method of antenna beam broadening is studied, simulated and tested. The experiment result shows that “0、 $\pi$ ” random phase method is satisfied with the mission requirement and the problem is settled.

**Key words:** Guidance Radar; Phased Array Antennas; Beam Broadening; S Curve

## 0 引言

新型制导雷达(以下简称制导站)是武器系统目标和导弹探测、射击、指挥与控制中心, 具有导弹发射、截获和制导功能。在导弹截获初始段, 相控阵天线波束展宽, 在宽波束范围内接收导弹应答信号, 从而实现导弹大散布范围内的可靠截获, 在对应答信号进行确认后, 完成导弹的距离截获; 距离截获后, 还需要完成导弹的角度截获, 才能建立起导弹的稳定跟踪, 制导站采用通过测量导弹偏离天线视线方法获取角度信息, 在测角误差满足一定条件时, 波束经过几次变窄, 实现对导弹三维信息的精确测量, 导弹截获段完成转为制导。

## 1 问题描述

制导站在进行目标偏离天线视线的误差信号角度/幅值曲线(S曲线)测试时发现: 在模拟器状态, 各波束宽度S曲线正常; 在外信号状态, 正常波束宽度(X)下测试, S曲线正常, 但波束展宽至2X、4X时, S曲线异常。

误差信号表达式为:

$$\Delta\theta = \left| \frac{\Delta}{E} \right| \cos \varphi \quad (1)$$

式中,  $\Delta$  为差信号幅值,  $E$  为和信号幅值,  $\varphi$  为相位。

利用中频模拟信号进行测试正常, 排除了由于通道幅相一致性引起的S曲线的变化, 外信号情况下波束正常状态S曲线正常, 展宽后异常, 可以判断是由相控阵天线采取的波束展宽的方法引起。

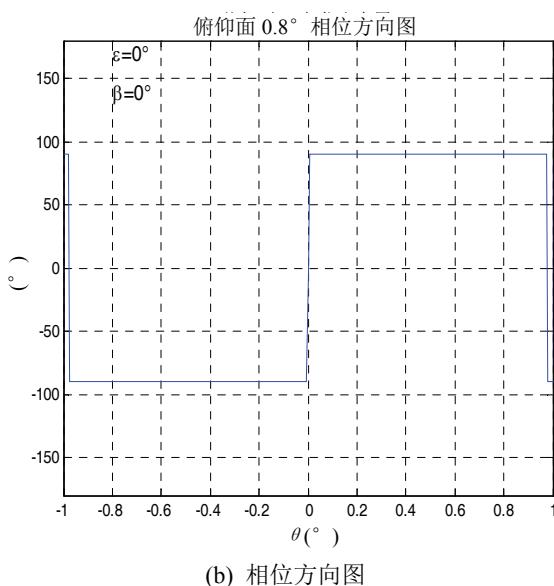
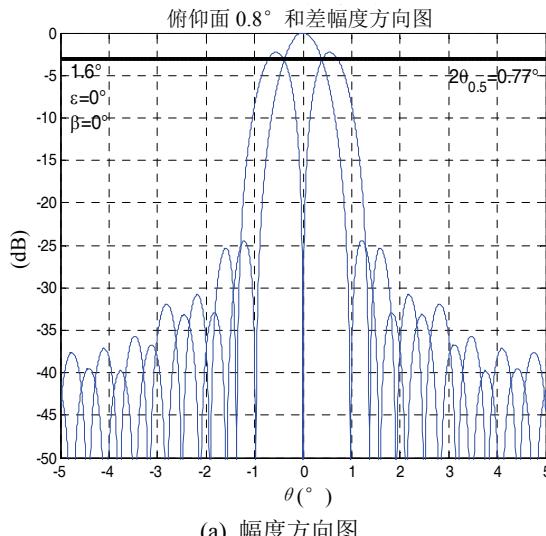
## 2 波束展宽方法研究

### 2.1 现波束展宽方法

相控阵天线的实现方式为无源空馈结构, 波束展宽通过改变相控阵天线的相位来改变方向性图的形状来实现的, 即仅相位方向性图赋形。这种方法基于两种思想: 一种是平方律相位误差法, 另一

$$F(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^M \left\{ A_m(x_m, y_m) \exp \left[ jk \left( \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + F_0^2} - F_0 \right) \right] \times \exp [j(k_x x_m \sin \theta \cos \varphi + k_y y_m \sin \theta \sin \varphi)] \times \exp [-j(k_x x_m \sin \theta_s \cos \varphi_s + k_y y_m \sin \theta_s \sin \varphi_s)] \right\} \quad (2)$$

式中,  $A_m(x_m, y_m) \exp [jk(\sqrt{x_m^2 + y_m^2 + F_0^2} - F_0)]$  是馈源照射时单元接收到的场强,  $\Delta$  和  $\phi$  是波束偏离天线法线的方向角,  $\theta_s$  和  $\varphi_s$  是给定的波束扫描角,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $F_0$  是天线的焦距。



种是相位相反抵消法。

现相控阵天线的波束展宽采用的是平方律相位误差法即把相控阵天线的配相加上一平方律相位分布来展宽天线的方向性图, 在光程差补偿时, 将补偿球面波的焦距有意的加上一种误差。对波束宽度  $X$ 、 $2X$ 、 $4X$  的方向图进行了仿真计算, 见图 1~图 3。天线方向性图可以表示为:

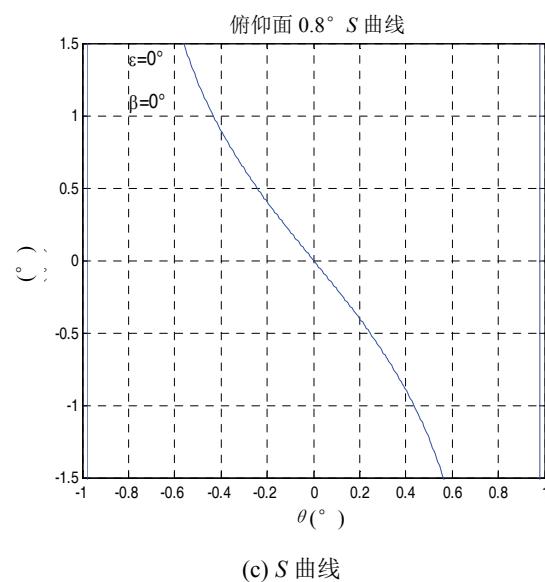


图 1 波束宽度  $X$  天线特性仿真 (俯仰面)

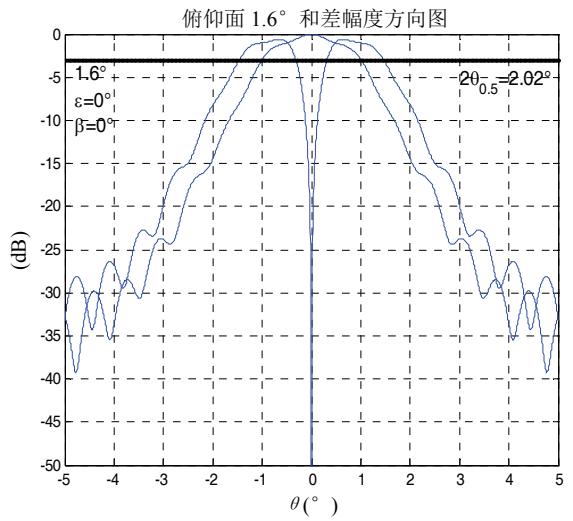
从仿真可见: 天线和方向性图散焦时, 波束形状正常, 副瓣电平也较低, 但此时天线差波束方向性图的有效范围随着和方向性图的展宽而无太多的变化, 相位方向图相位不稳定, 导致  $S$  曲线线性度恶化。因此采用这种波束展宽方法不适于单脉冲工作方式。

### 2.2 波束展宽方法研究

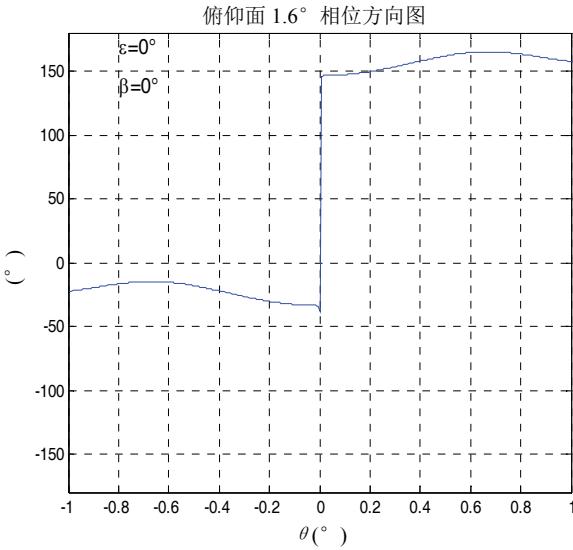
对相位相反抵消法的展宽天线方向图的方法进行研究, 采用外缘单元 “0,  $\pi$  随机配相法”, 该方法较其它相位相反抵消法方向图副瓣电平低。

外缘单元 “0,  $\pi$  随机配相法” 的原理是对半径  $R = \sqrt{x_m^2 + y_m^2} > R_0$  的单元随机地进行 “0,  $\pi$  配相法” (按均匀 0、1 分布), 使  $\varphi_m$  满足

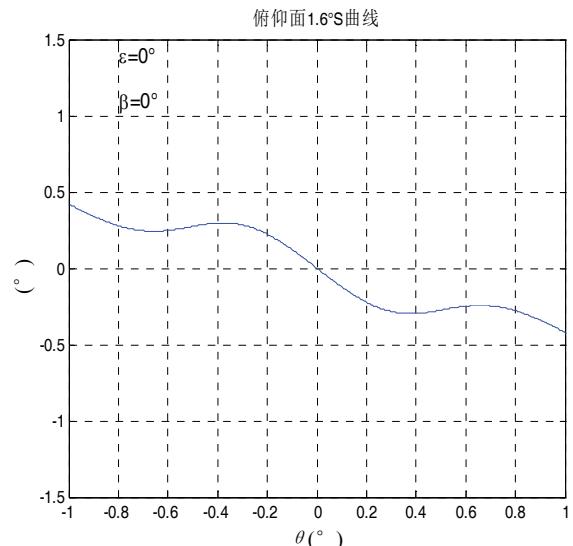
$$\varphi_m = \begin{cases} k \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + F_0^2} - F_0 & \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \leq R_0 \\ k \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + F_0^2} - F_0 + RAN(0,1)\pi & \sqrt{x_m^2 + y_m^2} > R_0 \end{cases} \quad (3)$$



(a) 幅度方向图

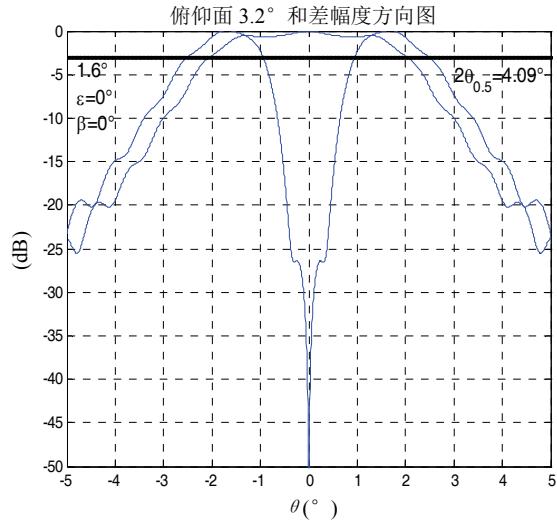


(b) 相位方向图

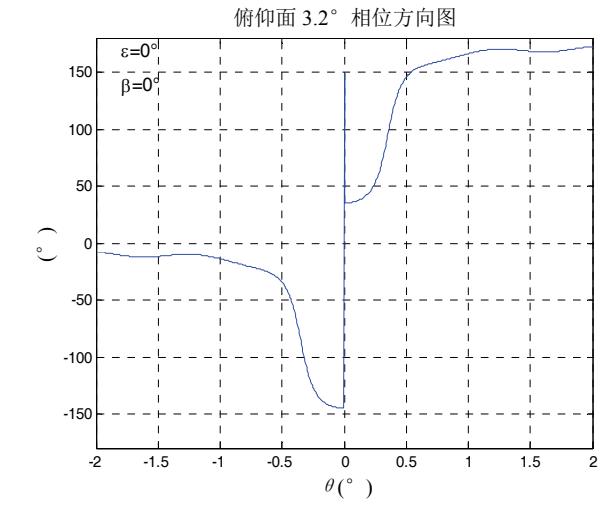


(c) S 曲线

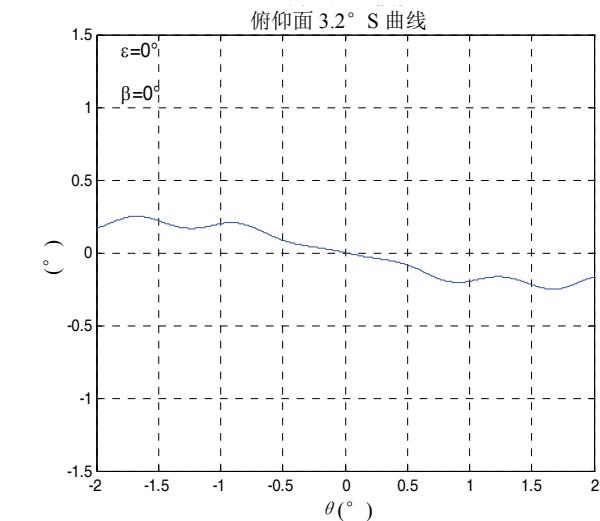
图 2 波束宽度 2X 天线特性仿真 (俯仰面)



(a) 幅度方向图

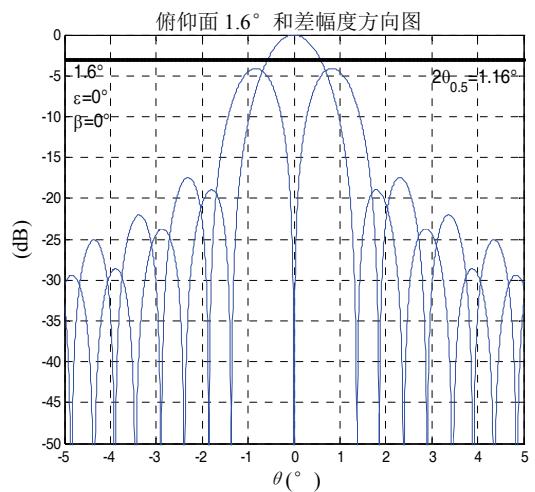


(b) 相位方向图

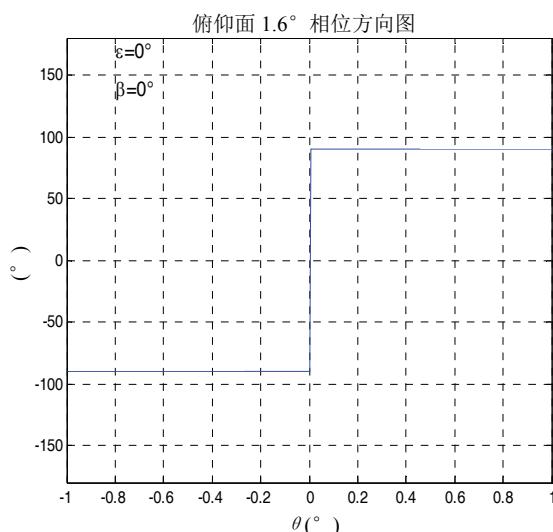


(c) S 曲线 (俯仰面)

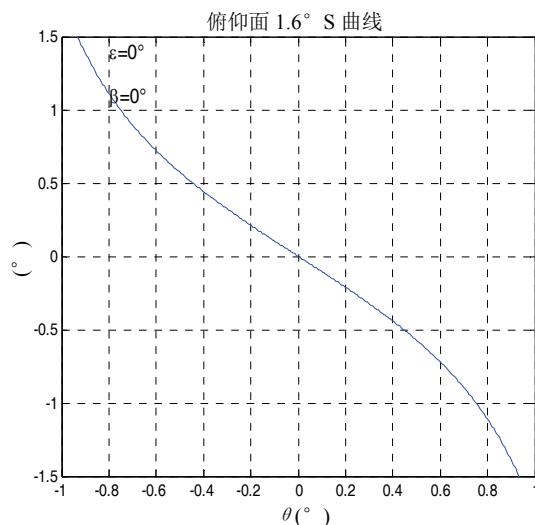
图 3 波束宽度 4X 天线特性仿真 (俯仰面)



(a) 幅度方向图

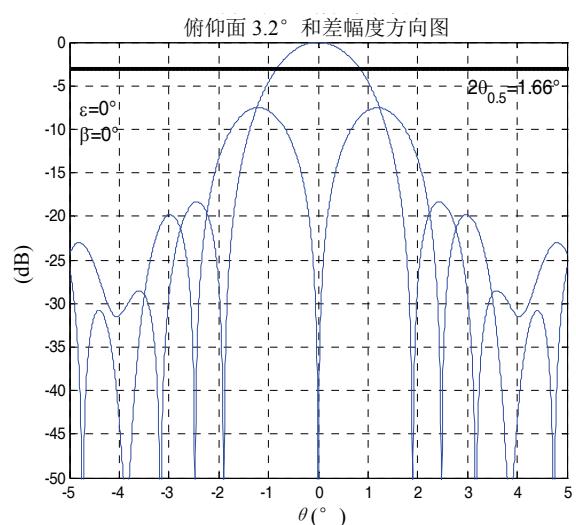


(b) 相位方向图

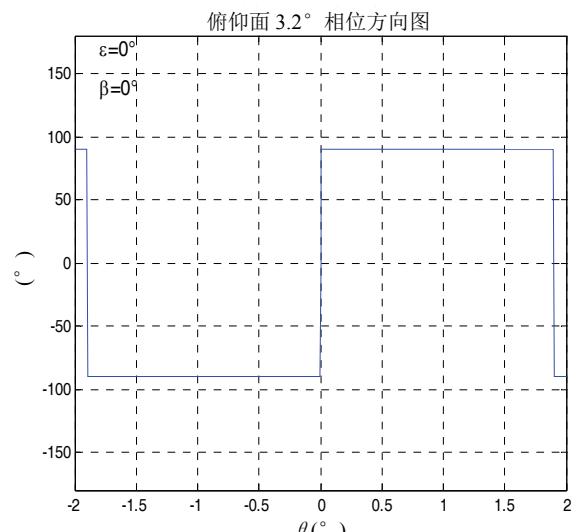


(c) S 曲线 (俯仰面)

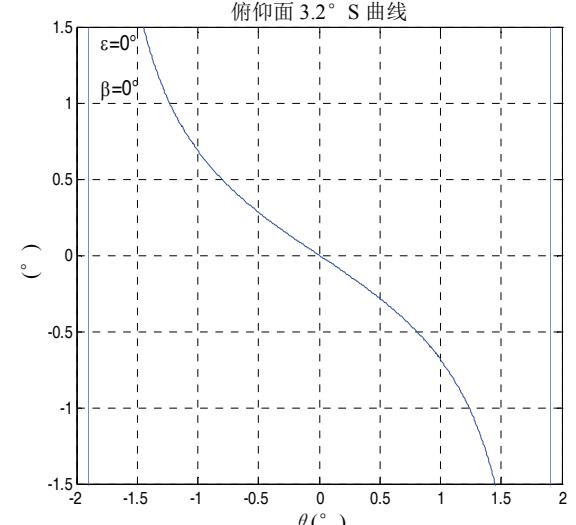
图 4 波束宽度 2X 天线特性仿真 (相位相反抵消法)



(a) 幅度方向图



(b) 相位方向图



(c) S 曲线 (俯仰面)

图 5 波束宽度 4X 天线特性仿真 (相位相反抵消法)

式(3)中,  $R_0$ 是波束展宽所要求的半径,  $RAN(0,1)$ 代表在(0,1)之间均匀分布的随机数。采用这种方法不出现栅瓣, 并且副瓣电平也较低, 差波束宽度能有效展宽。利用该方法进行了仿真, 见图4和图5。

从仿真可见: 和差方向图同时展宽, 相位方向图相位稳定,  $S$  曲线线性度好, 该方法可以使和、差波束的有效工作范围同时展宽, 并且没有栅瓣, 因此适用于单脉冲相控阵天线。

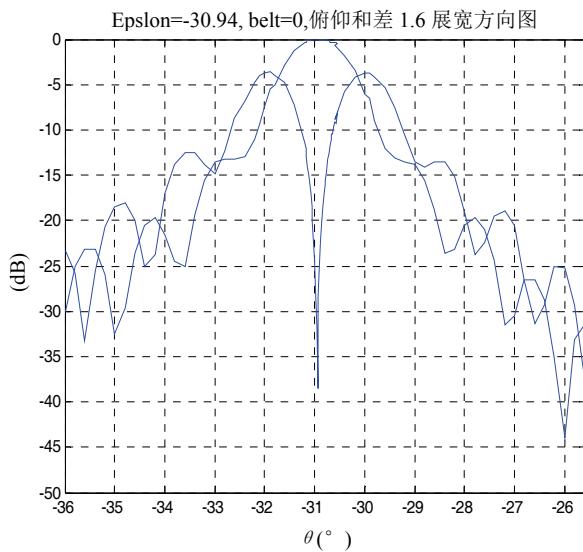


图6 改进后2X方向图

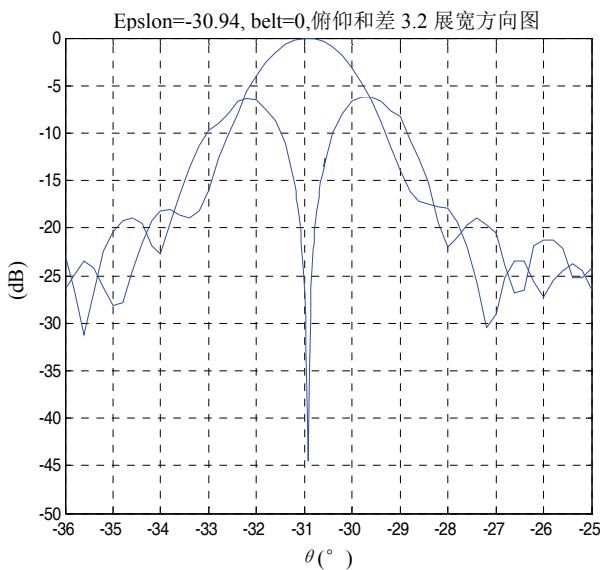


图7 改进后4X方向图

### 3 试验验证

天线波束展宽采用外缘单元“0、 $\pi$ 随机配相

法”后, 对相控阵天线波束展宽后的方向图进行了测试, 结果如图6和图7。

### 4 结论

实测结果与仿真结果基本一致, 原先的方法  $S$  曲线出现反相、变形等现象, 改进后  $S$  曲线线性度较好, 和差方向图同时展宽, 试验表明采用外缘单元“0、 $\pi$ 随机配相法”的波束展宽方法满足要求。

由此可见: 平方律相位误差法展宽波束, 因和差波束不同时展宽且相位方向图相位不稳定, 因此不适于单脉冲工作方式。采用相位相反抵消法展宽天线方向图, 和差方向图同时展宽, 相位方向图相位稳定, 因此适于单脉冲工作方式。

### 参考文献:

- [1] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] 黄槐, 齐润东, 文树梁. 制导雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [3] Merrill I. Skolnik. 雷达系统导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [4] Robert J. Mailloux. 相控阵天线手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [5] 张朋友, 汪学刚. 雷达系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

## 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>