

# 超宽频带单脉冲跟踪天线系统研究

张凤林, 孙向珍

(北京遥测技术研究所 100076)

摘要: 分析了一种六单元宽频带新型单脉冲天线的跟踪原理, 并论述了实现单通道的技术途径。介绍了基于六单元单脉冲体制的一套 1GHz~12GHz 单通道单脉冲自跟踪抛物面天线系统的研制情况。

关键词: 单脉冲天线 单通道变换 宽频带跟踪天线 六单元照射器

## 1. 前言

在宽频带侦察等电子对抗领域, 电子设备多种多样, 发射的频率分布在无线电的各个频段, 能侦察、侦听、并自动跟踪这些无线电信号一直是相关人员追求的目标, 也是富于挑战的课题。

跟踪天线主要有单脉冲天线、圆锥扫描天线、相控阵多波束天线等形式, 其中单脉冲天线分为多口径单脉冲天线和单口径多模单脉冲天线两种。多口径单脉冲天线又有四单元、五单元、七单元等多种形式, 单口径多模单脉冲天线也有二模、三模、七模等多种。这些传统的跟踪天线都无法实现宽频带工作, 频带宽度约 10%, 能达到一个倍频程, 而且增益大于 30dB 的跟踪系统很少。

超宽频带单通道自跟踪天线系统是 863 某重大课题的关键分系统, 对国内外现有技术水平具有突破性进展。

本文对六单元单脉冲天线系统这种新型跟踪天线进行了研究。结果表明: 六单元单脉冲天线的工作原理有别于传统的多口径馈源。传统的多口径馈源的方向图有方位方向的左右、俯仰方向的上下、轴向五个针状波束, 输出信号分为方位差信号、俯仰差信号、和信号三个信号; 而六单元单脉冲天线只有一个锥状的差波束、一个轴向的和波束两个波束, 输出一个差信号、一个和信号, 差信号中包含了方位和俯仰误差信息。

采用六单元单脉冲天线形式, 首次设计了一个 1GHz~12GHz 超宽频带左右旋圆极化单脉冲跟踪天线系统, 并将差信号调制到和信号上, 实现单通道工作。

## 2. 六单元单脉冲跟踪天线工作原理

六单元单脉冲跟踪馈源可以分为三部分: 照射器、波束形成网络和单通道变换网络。照射器接收到的信号经过波束形成网络后, 分别形成左旋和信号、右旋和信号、左旋差信号以及右旋差信号。下面通过数学分析来阐明该馈源的工作原理。

### 2.1 照射器

照射器由六个宽频带单元天线组成, 如图 1 所示。六个单元天线均分布在 xy 平面上, 相邻的两个天线单元之间的空间角度为  $60^\circ$ 。设天线单元收到的信号为  $E_i$  ( $i=1,2,3,4,5,6$ )。  $E_i$  既包括接收信号的幅度信息、相位信息, 又包括空间矢量信息, 因此可以用来反映来波方向等信息。

以偶极子天线为例, 同时不考虑天线单元之间的互耦,  $E_i$  可写为如式 (1) 所示的表达式, 式中  $a_i = \frac{k^2 I_0 \cdot L}{\omega \epsilon_0} \frac{e^{-jk r_i}}{4\pi r_i}$  ( $I_0$  为偶极子天线上均匀分布的电流;  $L$  为偶极子天线的

长度;  $r_i$  为单元  $i$  至远区场点的距离;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ),  $r$ 、 $\theta$ 、 $\varphi$  为球坐标的参量。

$$\begin{cases} E_{\theta i} = (-1)^{i+1} ja_i \cos\theta \cos\varphi, (i=1,4) \\ E_{\varphi i} = (-1)^{i+1} ja_i \sin\varphi \\ E_{\theta m} = ja_m \cos\theta [(-1)^m \frac{1}{2} \cos\varphi + (-1)^k \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\varphi] \\ E_{\varphi m} = ja_m [(-1)^m \frac{1}{2} \sin\varphi + (-1)^{k-1} \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi] \end{cases} \begin{cases} m=2,3,5,6; \\ k=m+1, m=2,5; \\ k=m, m=3,6 \end{cases} \quad (1)$$

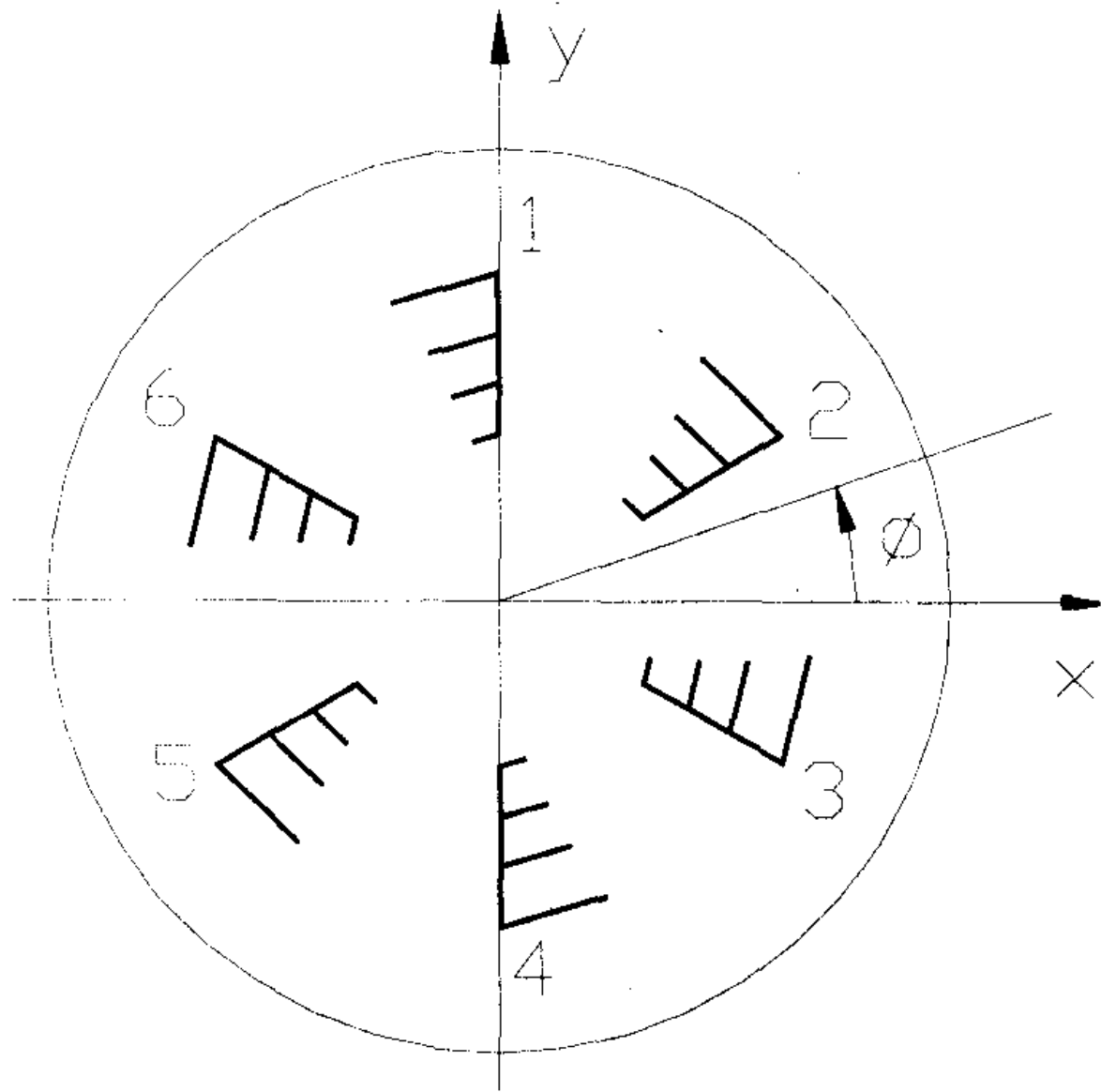


图1 馈源照射器空间分布

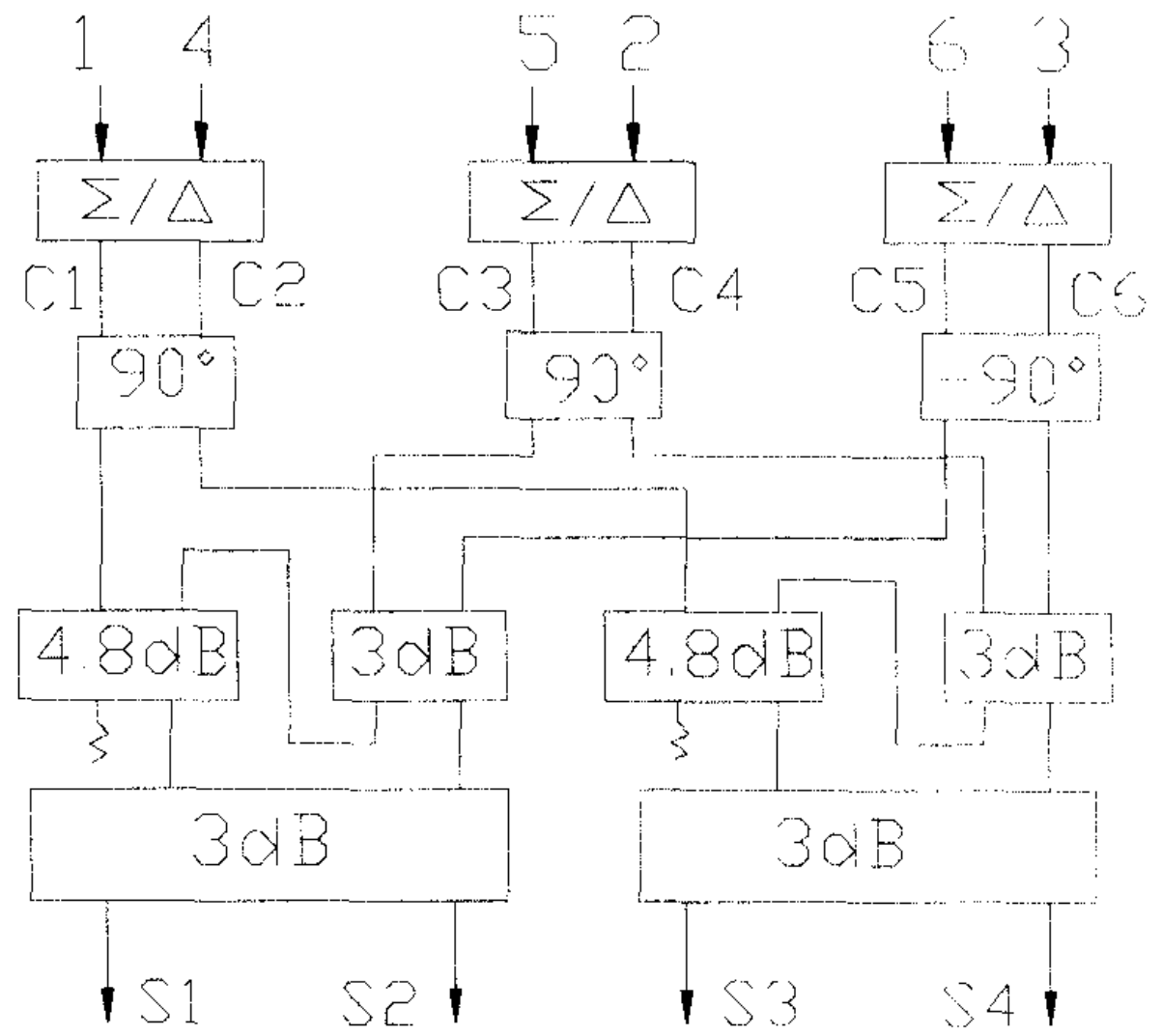


图2 波束形成网络

## 2.2 波束形成网络及跟踪原理分析

波束形成网络根据功能可以分成三部分：和差形成网络、波束变换网络和圆极化器，如图2所示。和差形成网络由三个和差器组成，分别形成相对的两个单元天线的和、差信号。照射器接收到的信号经过和差形成网络后，输出的信号记为 $C_i$  ( $i=1,2,3,4,5,6$ )，其表达式可写为：

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_4 - E_1), C_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_4 + E_1)\angle 90^\circ \\ C_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_2 - E_5), C_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_2 + E_5)\angle 90^\circ \\ C_5 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_3 - E_6), C_6 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_3 + E_6)\angle 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

由于天线单元1和4、2和5、3和6接收到的信号相互反相，故由式(2)可知， $C_1$ 、 $C_3$ 、 $C_5$ 分别是相对的两个天线单元的和信号， $C_2$ 、 $C_4$ 、 $C_6$ 是相应的差信号。

波束变换网络由三个 $90^\circ$ 移相器、二个 $3\text{dB}$ 电桥、二个 $4.8\text{dB}$ 电桥组成，将三个和差波束变成一个锥形差波束、一个和波束。

圆极化器由二个电桥组成，形成左右旋圆极化和、差信号。信号 $C_i$ 经过波束变换、圆极化器后，输出的信号记为 $S_j$  ( $j=1,2,3,4$ )，其表达式可写为：

$$\begin{cases} S_1 = \frac{1}{\sqrt{6}}(E_1\angle 0^\circ + E_2\angle 60^\circ + E_3\angle 120^\circ + E_4\angle 180^\circ + E_5\angle 240^\circ + E_6\angle 300^\circ) \\ S_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(E_1\angle 270^\circ + E_2\angle 210^\circ + E_3\angle 150^\circ + E_4\angle 90^\circ + E_5\angle 30^\circ + E_6\angle 330^\circ) \\ S_3 = \frac{1}{\sqrt{6}}[(E_1 + E_4)\angle 180^\circ + (E_2 + E_5)\angle 60^\circ + (E_3 + E_6)\angle 300^\circ] \\ S_4 = \frac{1}{\sqrt{6}}[(E_1 + E_4)\angle 90^\circ + (E_2 + E_5)\angle 210^\circ + (E_3 + E_6)\angle 330^\circ] \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)的物理意义可知, S1 为右旋和信号, S2 为左旋和信号, S3 为左旋差信号, S4 为右旋差信号, 差信号中包含了俯仰误差和方位误差。因此, 六单元自跟踪天线与普通的多口径自跟踪天线不同。前者的俯仰误差和方位误差合成在一个差通道中, 与单口径多模馈源类似, 而后者的俯仰误差和方位误差是独立的两个通道。

以右旋和、差信号为例来说明如何从差信号中将方位差、俯仰差信号分离出来。将式(1)代入式(3), 重新写出S<sub>1</sub>、S<sub>4</sub>的表达式。为简化分析, 令  $\theta = 90^\circ$ , 和、差信号的表达式如下式所示:

$$\begin{cases} S_1 = -\frac{\sqrt{6}}{2} a_0 \cdot e^{-j\varphi} = -E_s \cdot e^{-j\varphi} \\ S_4 = \frac{\sqrt{6}}{8} a_0 k d \cdot e^{-j2\varphi} = E_d \cdot e^{-j2\varphi} \end{cases}, a_0 = \frac{k^2 I_0 \cdot L e^{-jkr}}{\omega \epsilon_0 4\pi r} \quad (4)$$

上式中, E<sub>s</sub>、E<sub>d</sub>分别为和信号、差信号的幅值, d为天线单元之间的距离。从(4)式可以看出, 和信号的相位变化与方位角的变化量相同, 而差信号的相位变化是方位角的两倍, 根据这个差别就可以从差信号中将方位差、俯仰差信号分离出来。

### 3. 单通道变换网络的调制与解调原理

传统的跟踪系统多为和、差通道分别传输, 从馈源进入收发处理设备, 通道间的相位、交叉耦合是系统设计、调试过程中的一个难点。通过单通道变换网络, 在馈源内将和差信号调制在一个通道, 将大大减少系统的难度, 减少接收信道数量, 提高系统机动性能, 提高跟踪性能, 因此, 单通道技术在测控设备中广为采用。

传统的和通道、方位差通道、俯仰差通道三通道跟踪馈源实现单通道的技术已经非常成熟<sup>(1)</sup>。但是, 六单元这种新型跟踪体制如何实现单通道变换是一个新课题。

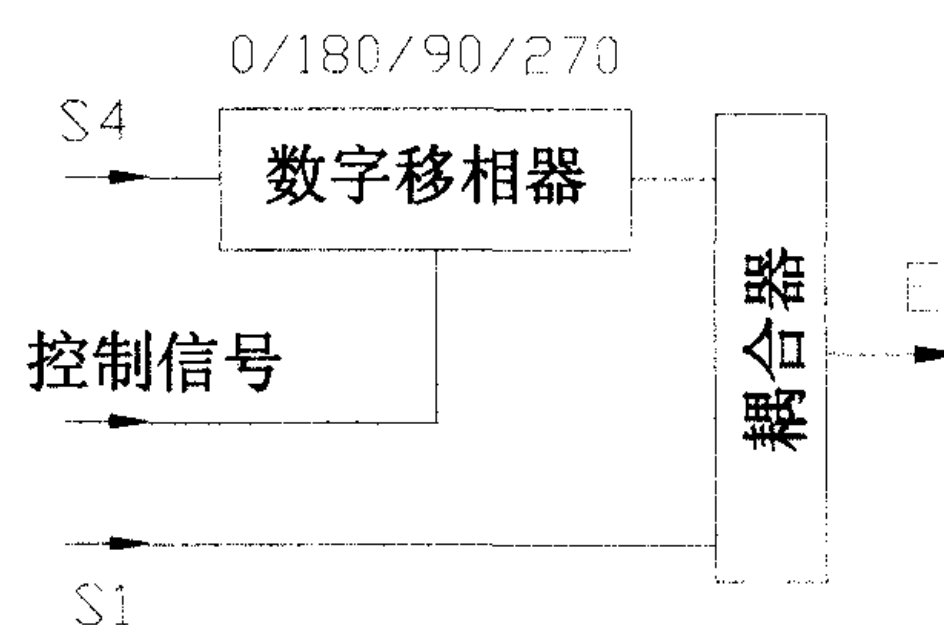


图3 单通道变换网络

下面就和差信号的调制与解调进行论述。

和、差信号经过单通道变换网络, 如图3所示, 其输出的调制信号为:

$$E \approx -E_s \cdot e^{-j\varphi} + c \times E_d \cdot e^{-j2\varphi} e^{j\alpha} \quad (5)$$

上式中, c 为耦合系数,  $\alpha$  为数字移相器(差通路)相对于和通路的相位, 根据控制信号的时序(00, 01, 10, 11),  $\alpha$  依次取值  $180^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $90^\circ$ 。由(5)式可知, 当  $\varphi$  为不同的角度时, 在相同的控制信号下, 调制信号的幅度不同。

$$\begin{cases} |E| = E_s + cE_d, \alpha = 180^\circ \\ |E| = E_s - cE_d, \alpha = 0^\circ \\ |E| = \sqrt{E_s^2 + (cE_d)^2}, \alpha = 270^\circ \\ |E| = \sqrt{E_s^2 + (cE_d)^2}, \alpha = 90^\circ \end{cases}, (\varphi = 0^\circ), \begin{cases} |E| = \sqrt{E_s^2 + (cE_d)^2}, \alpha = 180^\circ \\ |E| = \sqrt{E_s^2 + (cE_d)^2}, \alpha = 0^\circ \\ |E| = E_s + cE_d, \alpha = 270^\circ \\ |E| = E_s - cE_d, \alpha = 90^\circ \end{cases}, (\varphi = 90^\circ) \quad (6)$$

同理, 可以写出  $\varphi = 180^\circ$ 、 $\varphi = 270^\circ$  时的调制信号幅度。当调制信号经过包络检波, 就可获得如式(6)所示的方波信号。当把  $\alpha = 180^\circ$  和  $0^\circ$ 、 $270^\circ$  和  $90^\circ$  时的信号幅度两两相减时, 可以分别得到  $2cE_d$  和 0。其中  $2cE_d$  就是所需的角误差信息。根据实际情况, 可以定义  $\varphi = 0^\circ$  时的误差为正方位误差,  $\varphi = 180^\circ$  为负方位误差,  $\varphi = 90^\circ$  为正俯仰误差,  $\varphi = 270^\circ$  为负俯仰误差。



#### 4. 超宽频带六单元单通道单脉冲天线的研制

为了能在 1GHz~12GHz 全频段实现自跟踪、获得较高的天线增益、保证一定的天线波束宽度、降低复杂性, 采用一个 3.2m 的抛物面天线覆盖 1GHz~8GHz 频段, 一个 1.2m 的抛物面天线覆盖 7GHz~12GHz 频段, 1.2m 天线安装在 3.2m 抛物面的上方边缘, 抛物面天线采用前馈方式。

照射器接收到的 1GHz~8GHz 宽频带信号经分波器分成 1GHz~2GHz、2GHz~4GHz、4GHz~8GHz 三个倍频程信号, 再分别经波束形成网络和单通道变换网络输出。

##### 4.1 宽频带照射器

有多种形式的宽频带天线可以作为六单元照射器, 如单极对数周期阵照射器<sup>(2)</sup>。研制的两个照射器分别覆盖 1GHz~8GHz 和 7GHz~12GHz。在整个工作频带内, 和波束-10dB 宽度为  $100^{\circ} \sim 130^{\circ}$ ; 差波束零深 30dB; 天线的相位中心基本不变。

##### 4.2 宽频带波束形成网络

波束形成网络主要由和差器、 $90^{\circ}$  移相器、耦合器以及极化电桥等组成。L/S/C/X (1GHz~2GHz、2GHz~4GHz、4GHz~8GHz 和 7GHz~12GHz) 四个频段分别对应一套波束形成网络。

研制了性能良好的宽频带部件。耦合器、极化电桥采用宽边耦合带状线的形式, 工作带宽可以达到 3 个倍频程。在整个工作带宽内, 部件的驻波小于 1.3, 幅度不平衡度小于  $\pm 0.5\text{dB}$ , 相位误差  $\pm 2.5^{\circ}$ 。在开路型、短路型微带移相器<sup>(3)</sup>的基础上, 我们提出了开槽径向线开路型带状线移相器的新电路形式<sup>(4)</sup>, 在倍频程范围内,  $90^{\circ}$  移相器的驻波小于 1.5, 相位误差  $\pm 2.5^{\circ}$ 。

##### 4.3 单通道变换网络

宽频带数字移相器是分离方位、俯仰误差, 实现单通道自跟踪的关键部件。采用路径选择型电路形式, 在  $90^{\circ}$  移相器的基础上, 研制了 L/S/C/X 倍频程带宽的  $0^{\circ}/90^{\circ}/180^{\circ}/270^{\circ}$  2bit 数字移相器, 驻波小于 2, 插入损耗 4~8dB, 相位误差在  $\pm 10^{\circ}$  范围内。

宽频带和差相位的匹配是单通道技术成功与否的关键, 决定了调制效率和跟踪的交调性能, 甚至容易出现发散, 无法跟踪的现象。在式 (3)、(4) 中, 只反映了馈源网络各通路之间的相对相位关系, 实际上, 还必须考虑各部件自身的相位突变。

#### 5. 结束语

本文研究了六单元单通道单脉冲天线这一新型跟踪天线的工作原理, 结果表明六单元单通道单脉冲自跟踪天线与传统的多口径单脉冲自跟踪天线具有很大的区别, 反而与单口径多模喇叭单脉冲自跟踪天线相似。

采用六单元馈源形式, 设计了一个 1GHz~12GHz 超宽频带双圆极化单通道单脉冲抛物面天线系统。该天线具有良好的性能指标, 在整个工作频段内, 效率高, 交调小, 实现了全频段内自跟踪工作。

本课题是一个复杂的天馈系统, 参加研制的主要人员还有丁晓磊、刘昊、刘玉杰、陈剑、张媛、李连辉、董伟伟、张斌等, 对他们的艰苦努力, 团结攻关, 深表感谢!

#### 参考文献

- 1、张凤林, S 频段 5m 遥测自跟踪天线, 航天国防科学技术报告, HT-19980791
- 2、丁晓磊, 超宽带单极对数周期天线的研制, 遥测遥控, 2005, No.6
- 3、赵海松, 微带电路中的电桥技术, 《'92 遥测论文集》, 1992, p119-126
- 4、孙向珍, 张凤林, 开槽径向线开路型带状线移相器的研究, 遥测遥控, 2005, No.6

## 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>