

星间链路天线扫描捕获方法

黎孝纯 于瑞霞 闫剑虹

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

摘要 文章提出一种适合中继星星间链路天线的恒线速度螺旋扫描捕获方法。推导出了扫描轨迹方程、天线方位转角及俯仰转角的数学表达式, 论证了此方法的天线方位角速度幅值及俯仰角速度幅值变化很小, 且近似等于扫描轨迹线速度, 叙述了扫描参数选择等。该方法的优点是: 轨迹方程简单, 螺距相等, 易于实现全覆盖扫描; 扫描螺旋线平滑且线速度恒定, 这既对卫星姿态冲击影响小, 又有利于对目标信号的发现与捕获。

主题词 中继卫星 用户星 天线 螺旋扫描

0 概述

中继星星间链路 Ka 天线对用户星的扫描捕获跟踪是中继卫星系统的一项关键技术, 它是建立星间测控通信链路的首要条件。中继星 Ka 天线波束窄($\leq 0.26^\circ$), 要求指向精度高($\leq 0.05^\circ$), 由于卫星轨道预报误差和中继星姿态误差, 中继星 Ka 天线程控指向用户星精度约为 $\pm 0.4^\circ$ 。因此采取 Ka 天线程控指向用户星, 用户星落入 $\pm 0.4^\circ$ 的区内, 接着, 天线扫描搜索 $\pm 0.4^\circ$ 的不定区域, 使天线波束中心与目标方向偏差小于 $\frac{1}{2}$ 波束宽度, 再牵引转入自动跟踪, 跟踪指向精度优于 0.05° 。很多学者对这一问题进行了研究^[1-6]。文章提出一种适合中继星 Ka 天线的恒线速度螺线扫描捕获方法, 推导出了扫描轨迹方程、天线方位轴转动及俯仰轴转动的数学表达式和扫描参数选择等。该方法的优点是: 曲线方程简单, 螺距相等, 易于实现全覆盖扫描; 扫描螺旋线平滑且线速恒定, 这既对卫星姿态冲击影响小, 又有利于对目标信号的发现与捕获。

1 中继星天线程控指向用户星的方位角 α 和俯仰角 β 的计算^[6]

在中继星天线坐标系内, 用户星 Su 的位置如图 1 所示。假设中继星天线坐标系的 X_a 、 Y_a 、 Z_a 轴处于零位时, 分别与星体坐标系 3 个轴 X_b 、 Y_b 、 Z_b 重合, X_a 与 X_b 轴在机械设计时是固定地连接, 并始终保持一致。当天线 X_a 轴(方位轴)和 Y_a 轴(俯仰轴)处于零位时, Z_a 轴(天线电轴)指向地心。

图 1 中的方位角 $\alpha = 0$, 俯仰角 $\beta = 0$ 。当 X_a 轴从零位开始转动 α 角时, α 角的正、负按右手法

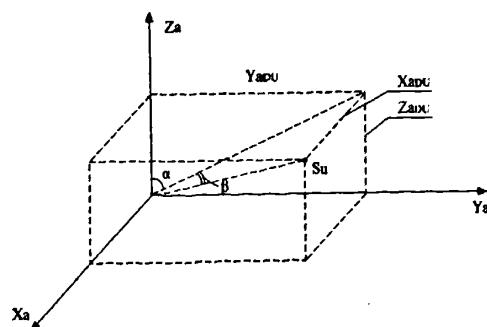


图 1 中继星天线指向用户星的方位角 α 和俯仰角 β

则确定,即右手握住 X_a 轴,姆指指向 X_a 轴箭头方向, α 角转动方向与4个手指方向一致为正,否则为负;同理,对 Y_a 轴转动,确定 β 角的正、负。

中继星天线指向用户星方位角 α 和俯仰角 β 的计算式如下:

$$\alpha = \arctan \frac{Y_{aDU}}{Z_{aDU}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \arctan \frac{X_{aDU}}{\sqrt{Y_{aDU}^2 + Z_{aDU}^2}} \\ &= \arcsin \frac{X_{aDU}}{\sqrt{X_{aDU}^2 + Y_{aDU}^2 + Z_{aDU}^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

2 阿基米德螺线方程

极坐标阿基米德螺线方程为:

$$\rho = a\theta \quad (3)$$

式中, ρ 为极径, θ 为极角, a 为正数。 θ 由零开始增加,则 ρ 随 θ 成比例(比例系数为 a)增加,曲线如图2所示。方程 $\rho = a\theta$ 所确定的螺旋线称为阿基米德螺线。可见螺线绕极坐标系原点一周,则 θ 增加 2π , ρ 增加 $2\pi a$, $2\pi a$ 称为一个螺距长,令螺距为 d :

$$d = 2\pi a \quad (4)$$

相应地,直角坐标系中的阿基米德螺线方程为:

$$\begin{aligned} x &= a\theta \cos \theta \\ y &= a\theta \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

螺线长 L 的表示式为:

$$L = \frac{a}{2} [\theta \sqrt{1 + \theta^2} + \ln(\theta + \sqrt{1 + \theta^2})] \quad (6)$$

该文就是应用阿基米德螺旋线的这些基本特性来构造中继星星间链路Ka天线电轴恒线速螺旋扫描捕获用户星的方法。

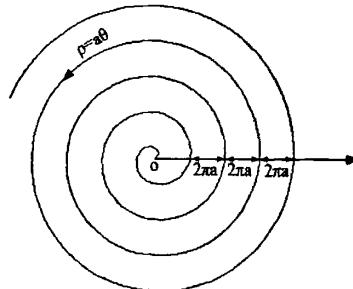
3 中继星天线恒角速度螺旋扫描捕获方法

图2 极坐标系阿基米德螺旋线

中继星天线扫描搜索方法首先要决定两个问题:一个是选定扫描轨迹,是行扫描还是螺旋扫描;另一个是天线方位轴及俯仰轴的运转方式,是扫描轨迹恒定角速度扫描还是扫描轨迹恒定线速度扫描。对于第一个问题,几乎都选定阿基米德螺线扫描轨迹。因为它方程简单,曲线平滑,螺距相等,易于实现对扫描范围的全覆盖扫描。对于第二个问题,天线运转方式取决于天线及驱动机构性能、卫星姿态要求和迟滞时间等因素。这一节讨论阿基米德螺线扫描,天线运转为恒角速度扫描捕获方法^[4,5]。天线方位轴转角 α 和俯仰轴转角 β 如(7)式, α 和 β 随时间的变化如图3所示,扫描轨迹如图4所示,图中, $d = 0.15^\circ$, $W_a = 0.18^\circ/\text{s}$

$$\begin{aligned} \alpha &= a\theta \cos \theta \\ &= aW_a t \cos W_a t \\ &= \frac{d}{2\pi} W_a t \cos W_a t \end{aligned} \quad (7)$$

$$\beta = a\theta \sin \theta$$



$$= a W_a t \sin W_a t \\ = \frac{d}{2\pi} W_a t \sin W_a t$$

其中: $\frac{d}{2\pi} W_a$ 代表极径增长速度; W_a 代表天线扫描轨迹角速度。

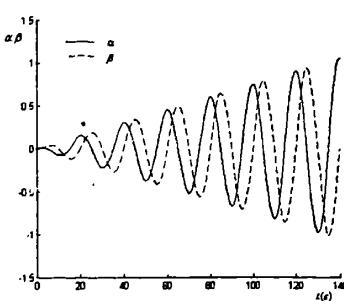


图3 搜索角度相对于搜索中心的变化规律

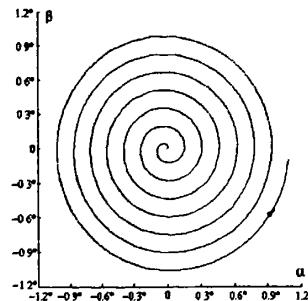


图4 天线搜索规律图

从(7)式和图3可以看出, W_a 一定, 不管扫描轨迹是第1圈还是第5圈, 扫过每一圈的时间相等。对(7)式求导, 可得到天线方位轴角速度 α' 和俯仰轴转角速度 β' 的表达式:

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \frac{dW_a}{2\pi} \sqrt{1 + (W_a t)^2} \cos(W_a t + \phi) \\ \beta' &= \frac{dW_a}{2\pi} \sqrt{1 + (W_a t)^2} \sin(W_a t + \phi) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由(8)式可以看出, 天线方位角速度和俯仰角速度的幅值随着扫描圈数的增加而增大, 同样, 角加速度也随扫描圈数的增加而增大。这增加了对卫星姿态的冲击影响, 也不利于对目标信号的发现和捕获。因为发现和捕获目标需要一定的迟滞时间, 而随着扫描圈数的增加, 扫描轨迹运动越快, 则目标穿过波束的时间越短。

4 中继星天线恒线速度螺旋扫描捕获方法

天线扫描轨迹仍是阿基米德螺线, 而天线方位轴和俯仰轴的合成运动具有恒定线速度的运转方式。恒线速度螺旋扫描捕获方法最显著的优点是扫过用户星的时间不因扫描圈数增加而改变, 有利于目标信号的发现和捕获, 同时, 天线方位角速度和俯仰角速度的幅值不因扫描圈数增加而增大, 因此, 等线速度扫描对卫星姿态冲击影响小。

4.1 螺线长 L 的近似表达式

从(6)式的数值计算可知, 对于中继星天线螺旋扫描, 一般需要扫 $0 \sim 5$ 圈, 即 θ 角从 0 变到 10π 。当 θ 取值 1π 以上, $\ln(\theta + \sqrt{1 + \theta^2})$ 相对于 $\theta \sqrt{1 + \theta^2}$ 是小量, 而且 $\theta \sqrt{1 + \theta^2} \approx \theta^2$, 所以, 对于中继星天线螺旋扫描, 螺线长 L 可近似为:

$$L \approx \frac{a}{2} \theta^2 \\ \frac{d}{4\pi} \theta^2 \quad (9)$$

4.2 等线速螺线的极角 θ 的表达式

由(9)式可得

$$\begin{aligned}\theta &= \sqrt{\frac{4\pi L}{d}} \\ &= \sqrt{\frac{4\pi}{d}} \sqrt{Vt}\end{aligned}\quad (10)$$

其中, V 为螺线的线速度, 单位为度/秒; t 为时间, 单位为秒。

4.3 天线方位轴转角 α 和俯仰轴转角 β 的数学表达式

将(10)式代入(5)式得

$$\left. \begin{aligned}\alpha &= \frac{d}{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi}{d}} \sqrt{Vt} \cos \sqrt{\frac{4\pi}{d}} \sqrt{Vt} \\ \beta &= \frac{d}{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi}{d}} \sqrt{Vt} \sin \sqrt{\frac{4\pi}{d}} \sqrt{Vt}\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

注意(10)~(12)式中各量的单位。 θ 的单位为弧度; L 的单位与 d 的单位相同, 此处为度; V 的单位为度/秒; t 的单位为秒; α 和 β 的单位为度。

扫描轨迹如图 6 所示, α 、 β 随时间的变化如图 7 所示。从图 6 可见, 与图 3 不同, 扫一圈的时间随扫描圈数增加而增加, 保证每 1 秒钟扫过相等的螺线长。

4.4 扫描轨迹恒线速度 V 与天线方位角俯仰角的角速度(α' , β')的关系

令

$$A = \sqrt{\frac{4\pi V}{d}} \quad (13)$$

则(12)式可写为:

$$\left. \begin{aligned}\alpha &= \frac{d}{2\pi} A \sqrt{t} \cos A \sqrt{t} \\ \beta &= \frac{d}{2\pi} A \sqrt{t} \sin A \sqrt{t}\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

对 α 、 β 分别求导, 得到 α' 、 β' :

$$\begin{aligned}\alpha' &= \frac{dA}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} \cos A \sqrt{t} - A \sin A \sqrt{t} \right] \\ &= \frac{dA}{4\pi} \sqrt{A^2 + \frac{1}{t}} \cos(A \sqrt{t} + \phi) \\ \beta' &= \frac{dA}{4\pi} \sqrt{A^2 + \frac{1}{t}} \sin(A \sqrt{t} + \phi)\end{aligned}\quad (15)$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (16)$$

当 $d = 0.13^\circ$, $V = 0.04^\circ/\text{s}$ 时, $A^2 = 3.86658$ 。

t 从 2 ~ 135 秒, $\frac{1}{t} \leq \frac{1}{2}$,

$$\sqrt{A^2 + \frac{1}{t}} \approx A \quad (t \geq 2 \text{ 秒})$$

则

$$\alpha' \approx \frac{dA^2}{4\pi} \cos(A \sqrt{t} + \phi) \approx V \cos(A \sqrt{t} + \phi)$$

$$\beta' \approx V \sin(A \sqrt{t} + \phi) \quad (17)$$

由此得出结论: ① 天线方位轴俯仰轴角速度变化是正弦形的; ② 角速度正弦形变化的振幅变化很小, 约为 12%; ③ 角速度正弦形变化的振幅近似等于扫描轨迹线速度 V 。

4.5 计入用户星运动参数的恒线速度螺旋扫描天线转角表达式

假设在中继星天线坐标内,用户星的运动由(1)和(2)式求得,并令螺旋扫描开始($t=0$)时刻方位角为 α_0 ,俯仰角为 β_0 ,扫描时间 t 从零开始后(1)和(2)式求得方位角为 α_{op} ,俯仰为 β_{op} ,则计人用户星运动参数的天线转角表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_{op} + \frac{d}{2\pi\sqrt{\frac{4\pi}{d}}}\sqrt{Vt}\cos\sqrt{\frac{4\pi}{d}}\sqrt{Vt} \\ \beta &= \beta_{op} + \frac{d}{2\pi\sqrt{\frac{4\pi}{d}}}\sqrt{Vt}\sin\sqrt{\frac{4\pi}{d}}\sqrt{Vt} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

文献[1]通过试验研究表明:对已知运动状态的目标,天线扫描过程中按(18)式计人目标运动参数 α_{op}, β_{op} ,其扫描捕获时间与相应不运动目标的扫描捕获时间相当。

4.6 扫描参数选择

4.6.1 扫描参数及单位

(1) 天线 3dB 波束宽度。用 r 表示天线 3dB 波束横截面的圆的半径,单位为度。

(2) 扫描范围。中继星天线根据中继星和用户星轨道预报计算出的方位角和俯仰角,程控指向用户星。由于轨道预报误差和中继星姿态误差,使程控指向误差($\pm 0.41^\circ$)大于天线 3dB 波束宽度。所谓扫描,就是用天线 3dB 波束横截面圆扫过的面积完全覆盖指向误差范围,例如 $\pm 0.41^\circ$ 的不定区,搜索用户星。

(3) 迟滞时间 τ 。主要是指天线接收到用户星信号作积分处理、进行判决所花的时间和天线驱动迟滞时间。迟滞时间单位为秒, $\tau=0.64s$ 。

(4) 螺距 d 。在垂直于天线扫描起始位置的电轴的横截面内,电轴扫描轨迹为阿基米德螺线。该螺线的一个特点是螺距相等,用 d 表示。此处,单位为度。

(5) 螺线长 L 。扫描起始时 $L=0$, L 随 θ 的增加而增长。 L 的单位与 d 的单位相同,此处, L 的单位为度。 L 与 d 的关系类似于圆的周长与圆半径的关系。

(6) 扫描时间 T 。完成一次扫描所需的时间,单位为秒。

(7) 扫描线速度 V 。天线扫描速度有两种:一种是扫描轨迹具有恒定角速度,另一种是扫描轨迹具有恒定线速度。文中提出的方法是具有恒定扫描线速度,即每秒钟内天线电轴走过相等的螺线长度。

4.6.2 扫描参数选择

天线 3dB 波束宽度、扫描范围和迟滞时间是捕获跟踪系统设计和分机研制已经明确的指标。例如:天线直径 3m、工作频率 Ka 频段,3dB 波束宽度为 0.26° ;中继星和用户星的轨道预报误差、中继星姿态误差等是大系统的指标,已有定数,例如为 $\pm 0.41^\circ$;迟滞时间假设为 $0.64s$ 。在这里如何选择螺距 d ,使天线 3dB 波束横截面扫过面积完全覆盖扫描范围;选择天线扫描线速度 V 的大小, V 既是在中继星姿态控制允许的范围内,又使扫描过程中用户星通过 3dB 波束内的时间 N ($N=2 \sim 3$)倍于迟滞时间,并使扫描时间 T 缩短。

(1) 螺距选择

天线 3dB 波束宽度为 $2r=0.26^\circ$,扫描范围为 0.41° ,迟滞时间为 $0.64s$ 。选择螺距 $d=r=0.13^\circ$ 。图 5 为扫描螺线第 2 圈 3dB 波束截面与第 3 圈 3dB 波束截面相交示意图。 $A_1A_2=d=r$,相交弦长 $b_1b_2=2rsin60^\circ=0.225^\circ$ 。

(2) 扫描线速度 V 的选择

在 4.4 节证明的此方法中,天线方位角速度幅值及俯仰角速度幅值随扫描圈数增加变化很小,幅

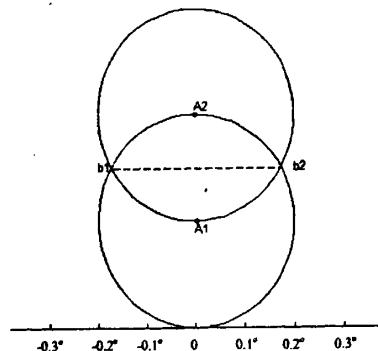


图 5 螺距选择为天线半波束宽度示意图

值近似等于扫描轨迹的线速度 V , 所以, 这里 V 的选择也就等于天线方位角速度及俯仰角速度的选择。这里的 V 包括两部分线速度: 一种是不计入用户星运动参数时纯螺旋线的线速度, 例如选为 $0.04^\circ/\text{s}$; 另一种是由于用户星运动引入的线速度, 根据分析计算, 其速度在 $0 \sim 0.018^\circ/\text{s}$ 之间; 所以, 总的线速度选为 $0.06^\circ/\text{s}$, 则扫过 $b_1 b_2$ 的时间为 3.75s , 为迟滞时间 0.64s 的 5.8 倍。这就能保证图 6 中第 2 圈时, 用户星在 $b_1 b_2$ 线内能可靠捕获; 用户星在 $b_1 b_2$ 以上的, 打第 3 圈时就能可靠捕获。从迟滞时间看, 总的线速度还可以适当提高, 这就要看卫星姿态控制是否允许提高, 还要看天线驱动能力是否能提高。

4.7 信号判决门限设置^[1]

在扫描过程中, 信号门限设置应综合考虑虚警概率、检测概率、捕获时间、旁瓣错锁等因素。信号出现判决可在天线扫描整个不定区域后, 找出和信号强度最大(或再加上差信号最小条件)点, 即为目标出现坐标。也可根据先验知识, 设置双门限: 当扫描过程中信号强度超过门限 1 时, 判断为目标出现, 停止螺旋扫描, 改为小范围找极值; 当信号强度超出门限 2 时, 天线转入自动跟踪。为防止旁瓣错锁, 门限设置应使天线第一旁瓣造成误检测概率最小。

4.8 计算例

例 1: 扫描轨迹和天线转角的计算

假设天线 3dB 波束宽度为 0.26° , 螺距 $d = 0.13^\circ$ (半波束宽度), 恒线速螺旋扫描。扫描线速度为 $0.04^\circ/\text{s}$ 、扫描范围 0.41° 时计算得到的扫描轨迹图如图 6 所示。可见: 螺距 $d = 0.13^\circ$, 图中小圆圈 2 和小圆圈 3 分别是扫描第 2 圈和第 3 圈时的 3dB 波束截面, 还能看到扫 3.625 圈(θ 从 0 变到 7.25π)就能完全覆盖 $\pm 0.41^\circ$ 范围。计算(12)式得到天线方位转角 α 、俯仰转角 β 随时间变化规律, 如图 7 所示。可见与图 3 不同, 随着扫描圈数增加, 每扫 1 圈花的时间也随之增长, 以保证线速度相等, 即每 1 秒钟扫过相等的螺线长。

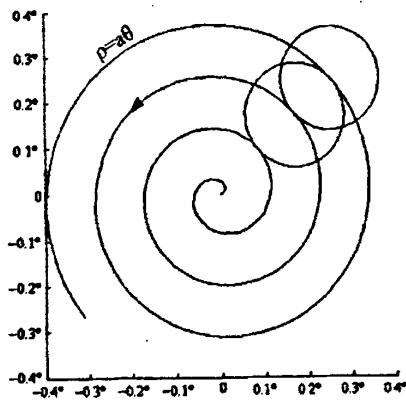


图 6 扫描轨迹图

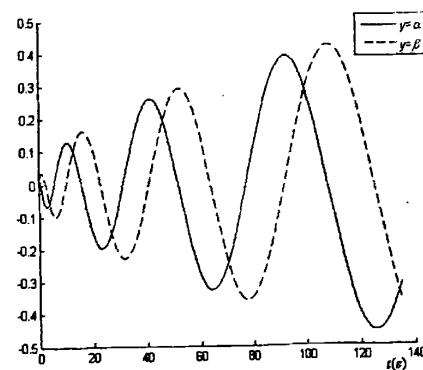


图 7 天线方位俯仰转角变化曲线

例 2: 捕获时间 T 的计算

假设天线 3dB 波束宽度为 0.26° , 螺距 $d = 0.13^\circ$ (半波束宽度), 等线速扫描, 扫描线速度为 $0.04^\circ/\text{s}$, 扫描范围 $\pm 0.41^\circ$, 迟滞时间 0.64s 。

从数字计算结果和图 6 中的扫描轨迹看, 要扫 3.625 圈(θ 从 0° 增到 7.25π)就能可靠全覆盖 $\pm 0.41^\circ$ 的范围。

此时扫过用户星的时间是迟滞时间的 5.8 倍, 这对目标信号的发现和捕获是足够的。

如果在扫描时间 134 秒内没有发现目标, 控制系统应有重新捕获方案。

(下转第 55 页)

高频仿真软件的仿真,获得了带外共具有4个衰减极点的4阶椭圆函数滤波器特性,电性能优良,基本达到设计仿真的目的。接着在介质基片一样、中心频率也基本一样的情况下,与两个4阶四分之一波长微带谐振器椭圆函数滤波器作了简要的比较,其比较结果表明:利用0阶谐振器设计的4阶椭圆函数滤波器具有体积小、工作频带宽等特点,因此,拥有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] Eleftheriades G V, Balmain K G. Negative-refraction metamaterials. IEEE Press, Published by John Wiley Sons, Inc., 2005
- [2] Lai A and Itoh T. Composite right/left-handed transmission line metamaterials. IEEE Microwave Magazine, 34~50, Sep. 2004
- [3] 吴须大.复合左右手微带传输线滤波器的探讨仿真.卫星有效载荷技术学术会论文集.2007
- [4] Lin Y S, Wang C H, Wu C H and Chen C H. Novel compact parallel-coupled microstrip bandpass filters with lumped-element K-inverters. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., 2005, 53(7): 2324~2328
- [5] 吴须大.结构紧凑的微带滤波器的仿真.卫星有效载荷技术学术会论文集.2007

作者简介

吴须大 1940年生,1966年毕业于中国科学技术大学,研究员,已发表论文数十篇。主要研究方向为电磁场的数值计算、毫米波器件的分析与优化、卫星有效载荷技术的研究等。

(上接第10页)

5 结论

文章提出并论证了中继星星间链路Ka天线(中继星天线或用户星天线)对目标的扫描捕获方法,采用阿基米德螺线扫描轨迹,且采用恒线速度比采用恒角速度的螺旋扫描捕获方法更好。因为其螺距相等,易于实现全覆盖扫描范围;它的曲线平滑且线速恒定,有利于对目标信号的发现和捕获;天线方位角速度幅值及俯仰角速度幅值不因扫描圈数的增加而增大,这对卫星姿态冲击影响小。

文中导出了扫描轨迹方程和天线方位俯仰转角表达式,论述了此方法的性能和扫描参数的选择,分析计算证明了设计的扫描捕获方法的有效性。

参考文献

- [1] 于瑞霞,黎孝纯.中继星星间链路天线扫描捕获方法的研究[A].空间链路技术研讨会论文集.2004
- [2] 王晰,经姚翔.窄波束天线捕获运动目标方法[A].空间电子学学术年会论文集.2004
- [3] 经姚翔,窄波束天线扫描搜索参数分析[A].空间电子学学术年会论文集.2004
- [4] 孙小松,杨涤等.中继卫星天线指向控制策略研究[J].宇航学报.2004(4)
- [5] 李子衡,刘宁宁.在轨跟踪与数据中继卫星测控关键技术[J].上海航天.2006(4)
- [6] 黎孝纯,王珊珊,余小川.中继星天线程控指向用户星的方位角和俯仰角计算[J].空间电子技术.2007(4)

作者简介

黎孝纯 1938年生,1962年毕业于成都电讯工程学院(现电子科大)雷达专业,研究员。长期从事卫星跟踪测量、卫星通信技术的研究。

于瑞霞 1973年生,1997年硕士研究生毕业,高级工程师。现从事卫星测控通信技术研究。

同剑虹 1972年生,1998年硕士研究生毕业,高级工程师。现从事卫星测控通信技术研究。

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)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)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)，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>