

文章编号:1000-4939(2008)01-0084-05

大口径天线电性能风振响应的时域分析*

张巨勇^{1,2} 施浒立² 陈志平¹ 张洪波²

(杭州电子科技大学 310018 杭州)¹ (中国科学院国家天文台 100012 北京)²

摘要:建立天线风荷动力的计算方法,运用谐波合成技术,对天线受风空间的脉动风进行时程数值模拟,结合平均风速,获得天线反射面各结点的风速时程值,进而计算各结点的风荷动力;利用有限元法进行天线结构的风振响应计算,求得反射面各结点的位移响应;依据位移响应,进行电性能响应的计算;以40m口径天线为例进行了数值模拟,获得了该天线电性能风振响应的特性,结果表明脉动风的脉动对电性能的影响较为突出,其中,天线处于低仰角时更为严重。算例说明本文的时域分析思路与计算方法对大天线电性能风振响应的掌握是可行和有效的。

关键词:大口径天线;电性能;风振响应;时域分析

中图分类号:TN82 文献标识码: A

1 引言

露天工作的天线受风荷后,其实际反射面与理论反射面之间存在偏差,将引起天线电性能的改变,造成天线效率和指向精度的下降。由于风荷的随机性、复杂性及我国研制大口径天线的数目不多,目前国内大口径天线设计基本上还只是采用风荷静力分析方法,极少部分进行频域内的风振分析,更未见有时域内的风振分析例子。然而大口径天线,由于结构刚度的内在限制,已成为风荷动力的敏感系统。对它进行时域的风振变形分析,可克服频域分析中风荷线性化假设等带来的一些不足^[1-2],同时,时域法分析的直观性,有利于工程师了解结构系统的电性能特性。因此,进行大天线电性能风振响应的时域分析与研究,对大天线结构设计有着十分重要的指导作用与现实意义。

本文主要从时域角度分析大口径天线在顺风向风荷动力作用下的电性能响应。首先合理建立随机

风荷动力的计算方法,运用谐波合成方法,对天线受风空间进行脉动风的数值模拟,结合平均风速,获得结点风速时程值,根据结点的压差系数,计算结点风荷动力;其次利用有限元法进行天线结构的风振响应计算,求得天线结点的位移响应;再次依据位移响应,进行电性能响应的数值计算;最后,以40m口径天线为例,进行了电性能风振响应的数值模拟分析。

2 大天线风荷动力计算方法

2.1 风荷的简化

由于大口径天线结构本身的复杂性及随机脉动风作用的不确定性,实际分析作如下简化。

- ① 只考虑天线反射面所受的风荷^[3]。
- ② 将风荷动力等效为集中动力作用在与天线面板连接的背架结点上^[4]。
- ③ 脉动风作为零均值的平稳高斯随机过程处理^[5]。
- ④ 只考虑顺风向的随机脉动,且作用在反射面上

* 基金项目:中国科学院知识创新工程项目 来稿日期:2005-12-03 修回日期:2006-06-15

第一作者简介:张巨勇,男,1974年生,中国科学院研究生院,国家天文台,博士生;研究方向——天文仪器,光机电一体化。E-mail: zjy@bao.ac.cn

的压差系数为风洞实验获得的准静态值^[4]。

2.2 风荷动力计算

1) 风荷动力计算式

风由平均风和脉动风两部分组成。若单独考虑平均风(静力)时,第n个与天线面板连接的背架结点的静力关系式为^[4]

$$F_{ns} = \frac{-C_{np} A_{nl} \rho \bar{U}^2}{2} \quad (1)$$

式中: C_{np} 为该结点所在反射面上的压差系数,如图1所示; A_{nl} 为该结点所对应反射面风压面积;ρ为空气密度; \bar{U} 为该结点垂直高度的平均风速。

参照式(1),可构造含随机脉动的结点风荷动力式为

$$F_n(t) = \frac{-C_{np} A_{nl} \rho U(t)^2}{2} \quad (2)$$

式中: C_{np} 、 A_{nl} 、 ρ 与式(1)相同; $U(t)$ 为含随机脉动的风速。

2) C_{np} 和 A_{nl} 的计算

压差系数 C_{np} 与天线本身的焦距比有较大的关系,且风向角α不同,其值也不同,由风洞实验取得。若结点坐标与风洞实验的测点坐标不相重合,则依据实验各测点的压差系数进行插值求得。对网状面板的压差系数,可通过下式对实体面板进行修正。

$$C_{\Delta np} = \frac{C_{Dmesh}}{C_{Dsolid}} \cdot C_{\Delta solid} \quad (3)$$

其中: $C_{\Delta np}$ 是抛物面天线网面板的压差系数; $C_{\Delta solid}$ 是抛物面天线实面板的压差系数; C_{Dmesh} 和 C_{Dsolid} 分别是网面板和实面板的压差系数,可由相关文献查算求得。

结点风压面积 A_{nl} 为垂直于该结点法线的微小平面。为便于计算,先求面积 A_{nl} 投影到天线口面上的面积 A_{n2} ,再根据该结点的余弦关系求得 A_{nl} ,如图1。

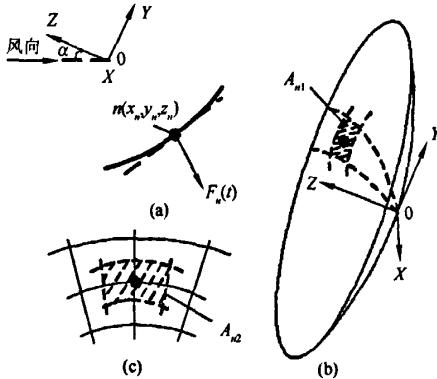


图1 天线结构结点力的风荷矢量

3) $U(t)$ 的计算

$U(t)$ 值的获得,最理想的方法是实测,但实际中对设计指标最大风速的实测困难很大,因而本文借助计算机的模拟,对 $U(t)$ 进行取值。

若不考虑风的横向脉动,则风的顺风向时程曲线中,某高度处的顺方向风速 $U(t)$ 、平均风速 \bar{U} 和脉动风速 $v(t)$ 的关系为

$$U(t) = \bar{U} + v(t) \quad (4)$$

高度为Z处的平均风速为

$$\bar{U} = (Z/Z_0)^\alpha \cdot \bar{U}_0 \quad (5)$$

式中: \bar{U}_0 为标准高度 Z_0 处设计指标的平均风速;我国规范^[8]的标准高度为10m; α 为地面粗糙度系数,由安装天线的当地实验确定,没有实验的情况下,可依据规范^[6]选取。

目前,脉动风自功率谱在风工程中得到广泛采用的有Davenport谱、Davenport修正谱、Kaimal谱等。

由于大口径天线空间范围大,还应当考虑脉动风空间相关的特性。根据Davenport的建议,频域的相关函数可取为频率和两点间距的函数。对三维问题,一般有如下形式

$$Coh_{ij}(f) = \exp\left(-\frac{2f\sqrt{C_x^2\Delta x_{ij}^2 + C_y^2\Delta y_{ij}^2 + C_z^2\Delta z_{ij}^2}}{\bar{U}_i + \bar{U}_j}\right)$$

式中: C_x 、 C_y 、 C_z 为衰减系数; \bar{U}_i 、 \bar{U}_j 分别为两点的平均风速。一维和二维问题,可由上式进行相应的简化。

两点间的互谱密度函数则为

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_i(f)S_j(f)} \sqrt{Coh_{ij}(f)} \exp[i\phi_{ij}(f)]$$

式中: $S_i(f)$ 、 $S_j(f)$ 为两点的自功率谱; $\phi_{ij}(f)$ 为两点间的相位谱。

空间M个点的谱密度函数矩阵可写为

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1M}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2M}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{M1}(\omega) & S_{M2}(\omega) & \cdots & S_{MM}(\omega) \end{bmatrix}$$

式中 ω 为圆频率。该矩阵具有Hermitian性质,是非负定的。进行Cholesky分解得

$$S(\omega) = G(\omega) \cdot G^*(\omega)^\top$$

其中 $G(\omega)$ 为下三角矩阵

$$G(\omega) = \begin{bmatrix} G_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ G_{21}(\omega) & G_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{M1}(\omega) & G_{M2}(\omega) & \cdots & G_{MM}(\omega) \end{bmatrix}$$

对M个零均值的平稳高斯随机过程的脉动风,其时程曲线数值可以采用谐波合成法进行模拟。模拟式为^[2,7]

$$v_m(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^N |G_{mk}\{\omega_n\}| \sqrt{2\Delta\omega} \cos(\omega_n t + \theta_{mk}\{\omega_n\} + \varphi_m) \quad (6)$$

式中: ω_n 为圆频率; $\Delta\omega$ 为频率步长; $\theta_{mk}\{\omega_n\}$ 为两个不同作用点之间的相位差角; φ_m 为在 $\pm 2\pi$ 间的随机相位。可见只要模拟的频率步长和时间步长取足够小, 其时程曲线所得的功率谱就能越逼近原始功率谱。

根据式(4), 式(5) 和式(6) 可对天线任何承力结点的风速 $U(t)$ 进行模拟取值。

3 天线结构系统电性能风振响应分析

3.1 天线结构有限元时域风振响应求解

根据 Hamilton 原理, 天线结构风振动力响应方程为

$$M \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + B \frac{du(t)}{dt} + Ku(t) = F(t) \quad (7)$$

式中: M, K, B 分别为有限元模型的质量、刚度、阻尼矩阵; $u(t), F(t)$ 分别为结点位移、风荷向量。

对大口径的天线结构, 式(7) 的求解适于采用振型叠加法。经过将结点位移向量 u 从物理坐标转换到模态坐标 ξ 后, 将方程解耦, 再采用模态阻尼, 则各阶模态的运动方程为

$$m_i \frac{d^2 \xi_i(t)}{dt^2} + b_i \frac{d\xi_i(t)}{dt} + k_i \xi_i(t) = p_i(t), \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中: $m_i, b_i, k_i, \xi_i(t), p_i(t)$ 分别为第 i 阶模态下的模态质量、模态阻尼、模态刚度、模态位移、模态力。这是一个单自由度的运动方程, 根据 Duhamel 积分原理, 在初始条件为零的条件下, 其数值解为

$$\xi_i(t) = \frac{1}{m_i \omega_{di}} \sum_{\tau=0}^t p_i(\tau) \exp[-\zeta \omega_{ni}(t-\tau)] \cdot \sin[\omega_{di}(t-\tau)] \Delta\tau, \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中: $\omega_{ni} = (k_i/m_i)^{1/2}$ 为无阻尼固有频率; $\zeta_i = b_i/(2m_i \omega_{ni})$ 为模态阻尼比; $\omega_{di} = \omega_{ni}(1 - \zeta^2)^{1/2}$ 为结构的有阻尼振动频率; $\Delta\tau$ 为积分时间步长。

将各阶模态下的模态位移转化为物理位移, 并进行叠加可得各结点风振响应位移

$$u(t) = \varphi \xi(t) \quad (8)$$

3.2 天线反射面电性能风振响应分析

求解天线结构风振动力方程后, 可得天线反射面各结点的位移响应, 设第 n 个结点位移响应 $u_n(t)$ 的三个分量为 $[u_x(t), u_y(t), u_z(t)]$ 结点的法向

单位矢量为 $[\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z]$, 则该结点对电磁信号的半光程差响应式为^[4]

$$\rho_n(t) = ad$$

其中: $a = [\gamma_x \gamma_x \quad \gamma_y \gamma_x \quad \gamma_z \gamma_x]; d = u_n(t)^T$ 。则整个天线反射面结点半光程差响应式用矩阵 A 和 D 可表示为

$$\rho(t) = AD \quad (9)$$

考虑各结点对电磁信号效应的差异, 引进加权因子 w 及其矩阵 W , 则天线反射面形均方根偏差响应 $\sigma(t)$ 为

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{(\rho(t))^T W \rho(t)}{\sum w_n}}, \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

根据 Ruze 公式, 主反射面形偏差响应造成天线增益下降响应的关系式为

$$\begin{aligned} dB(t) &= 10 \log_{10} \exp\left(-\frac{4\pi\sigma(t)}{\lambda}\right)^2 \\ &= -4.3429 \left(\frac{4\pi\sigma(t)}{\lambda}\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 λ 为天线的工作波长。

同样, 天线主反射面的风振响应还会引起天线的指向偏差响应。对圆抛物面天线而言, 其相对变形后的最佳吻合抛物面的指向偏差响应式为^[4]

$$\begin{cases} \phi_x(t) = -\Delta Y(t)(k/f) + \Delta \phi_x(t)(1+k) \\ \phi_y(t) = \Delta X(t)(k/f) + \Delta \phi_y(t)(1+k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\phi_x(t)$ 和 $\phi_y(t)$ 分别为在如图 1 所示的直角坐标系下 YZ 平面和 XZ 平面上的指向偏差响应; $\Delta X(t), \Delta Y(t), \Delta \phi_x(t), \Delta \phi_y(t)$ 分别对应为风振位移响应后所作最佳吻合抛物面坐标顶点平移和绕轴旋转响应值; k 为天线波束偏移因子; f 为天线抛物面的焦距。

4 算例——40m 天线电性能的风振响应

4.1 40m 天线结构电性能风振响应计算

40m 口径天线为一圆抛物面天线, 焦距比 0.33, 波束偏移因子 0.725, 天线结构主要由天线背架、中心体、主反射面板、副反射面体、副反射面支撑结构、馈源、俯仰驱动装置、平衡重及各附属装置等组成。反射面内环 26m 为实面板, 外环 26m ~ 40m 为网面板。天线结构的有限元模型^[8] 共有杆、梁、壳、弹簧、质量单元 6230 个, 见图 2 所示。

C_{sp} 取值: 依据 Jet Propulsion Laboratory 所做

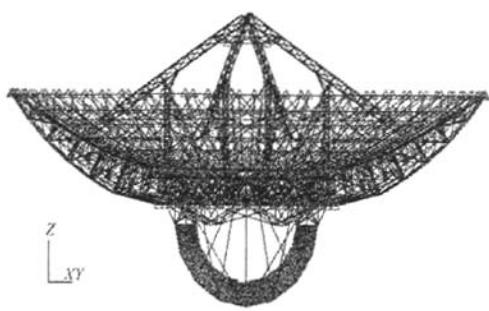


图 2 40m 天线有限元模型

压差系数的实验值,进行二元拉格朗日的二次插值;外环网面板的压差系数由式(3)进行修正。

$U(t)$ 取值:按式(4)进行计算。其中,标准高度平均风速取设计指标最大风速 17.1m/s ,各结点平均风速由式(5)计算,地面粗糙度系数由规范[6]选取为 0.16。各结点脉动风速由式(6)模拟所得,风速自功率谱采用沿高度变化的 Kaimal 风速谱,谱频上限取 3Hz ,分段数为 100;相干函数式简化为二维,衰减系数 C_y 和 C_x 分别选用 Davenport 建议的 10 和 16;不同结点间相位差角由文献[5]的经验式计算;时间步长取 0.02s ,总时距取 60s 。

图 3~图 4 为其中 3 个结点的模拟结果:图 3 为脉动风 Kaimal 自功率风速谱曲线和由模拟所得脉动风的自功率谱曲线;图 4 为脉动风时间历程曲线,图中湍流度为模拟计算所得;可见模拟结果较为理想。

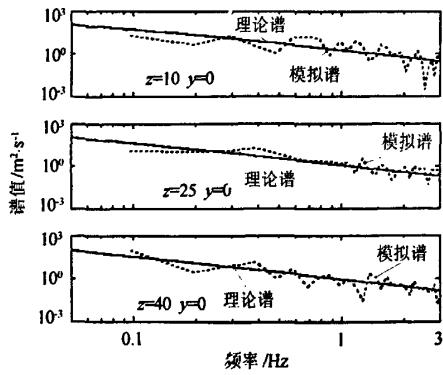


图 3 风速谱曲线

有限元风振响应计算中:风荷动力步长为 0.02s ;各模态阻尼均为 0.02;积分时间步长 Δt 取为 0.005s ;位移输出时间步长取为 0.05s 。经试算,在模态法求解中,模态频率取前 20 阶可满足计算精度;天线工作波长取为 35mm ,对应的天线增益下降和指向偏差响应,依据结点风振位移响应结果,分别按式(11)和式(12)进行计算。

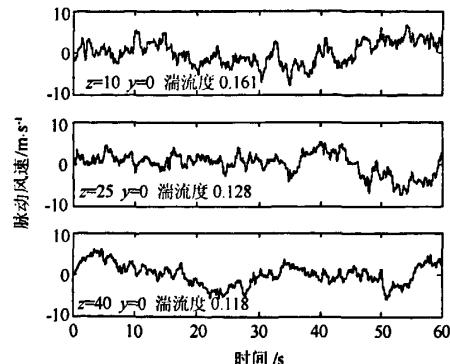


图 4 脉动时程风速

为得到天线结构电性能风振响应的特性,共进行了风向角 α 为 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 四个工况的数值模拟。

4.2 计算结果

模拟结果表明,影响反射面形精度的振动模态主要为天线背架体的前 4 低阶模态(图 5)。

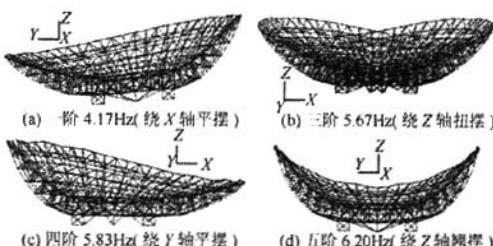


图 5 天线背架结构的低阶振动模态

风向角 $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 四个工况的天线增益下降响应曲线见图 6 所示;合成指向偏差响应曲线见图 7 所示;天线反射面电性能响应在各工况下的最大值和均值见表 1。

表 1 电性能响应的最大值和均值

风向角	0°	60°	90°	180°	
增益下	最大值	2.12	1.05	$4.81e-5$	1.67
降($-db$)	平均值	0.61	0.43	$1.97e-5$	0.48
指向偏	最大值	2.75	1.60	$1.12e-2$	2.44
差($''$)	平均值	1.47	0.99	$7.02e-3$	1.31

从图 6、图 7、表 1 所见:随着风向角的不同,风振对天线结构的电性能影响是不同的。风正吹(风向角 0°)时,影响最大,风侧吹(风向角 90°)时,影响最小,两者之间,天线增益相差 5 个数量级,指向偏差相差 2 个数量级。综合来看,风荷对天线电性能的影响随仰角的升高而减小,当天线处于高仰角工作时,电性能的影响甚至可以忽略不计,但天线处于低仰角工作时,影响较大。同一风向角,随脉动风的脉动,电性能的影响比较突出。因此,天线设计分析时,要认真考察脉动风对电性能的影响;天线设计与工作时,应主要

关注低仰角工况时,风荷对电性能的影响。

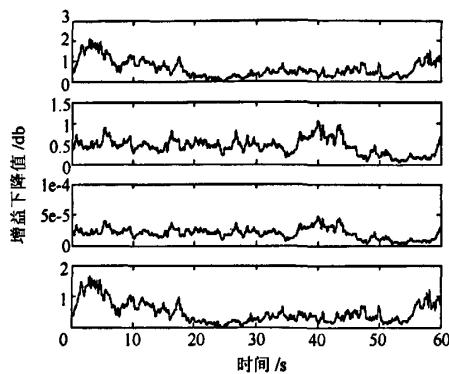


图 6 天线增益下降响应结果

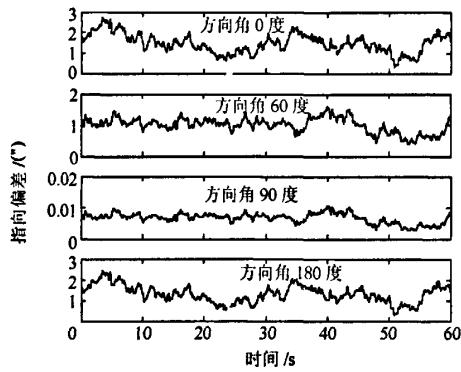


图 7 天线指向偏差合成响应结果

5 结束语

本文提出了大口径天线电性能顺风向风振时域分析的思路与计算方法。

以某 40m 圆抛物面天线结构为例,进行了模拟计算,计算结果表明:脉动风的脉动对天线电性能的影响较为突出,其中,天线处于低仰角时的工况影响较大,值得设计与工作时予以认真关注。

算例表明,本文的分析思路与计算方法对大天线电性能风振响应的掌握是可行和有效的;同时,对大天线结构设计的安全性与可靠性也有一定的参考作用。

参 考 文 献

- [1] Gawronski W, Bienkiewicz B, Hill R. Wind induced dynamics of a deep space network antenna [J]. Sound Vibration, 1994, 178(1): 66-77.
- [2] Aas-Jakobsen K, Strommen E. Time domain buffeting response calculations of slender structures [J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 89(5): 341-364.
- [3] Aas-Jakobsen K, Strommen E. Time domain calculations of buffeting response for wind-sensitive structures [J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74-76(1): 687-695.
- [4] Roy. Structure engineering of microwave antennas [M]. America: IEEE Press, 1996.
- [5] Shinozuka M, Jan C. Digital simulation of random process and its applications [J]. Sound Vibration, 1972, 25(1): 111-128.
- [6] 中华人民共和国建设部. 高耸结构设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [7] Rice S. Mathematical Analysis of Random Noise[C]// Papers of Noise and Stochastic Process. New York: Dover, 1964: 180-181.
- [8] 陈志平, 杨世模, 胡企千, 等. 空间太阳望远镜主构架的力学分析与优化[J]. 计算力学学报, 2005, 22(1): 89-94.

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>