

TN 821.8

直接优化量化综合法实现 超低副瓣相控阵天线多阶幅度量化

朱 桓 汪一心 徐晓文 李世智

(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

摘要 本文提出了直接优化量化综合法。该方法通过在相控阵天线优化模型中引入量化台阶宽度控制约束条件,实现了二维可分离超低副瓣相控阵天线多阶幅度量化和对天线阵单元间互耦的修正。该方法适用于各种形式相控阵天线的综合优化和幅度量化设计。文章最后给出一个二维可分离等间距平面相控阵的仿真计算结果。

关键词 超低副瓣, 相控阵, 优化算法, 多阶幅度量化, 互耦

1 引言

固态 T/R 组件是固态有源相控阵天线的关键部件,但其高昂的制作成本限制了固态有源相控阵天线发展。为了降低成本、简化幅相的统调,工程上要求最大限度减少所使用的固态 T/R 组件功率品种数,同时要求相控阵天线的辐射方向图有较低的副瓣电平,以便抑制背景杂波,对抗严重的电磁干扰。

如何采用较少功率品种数的 T/R 组件实现固态有源相控阵天线辐射方向图低副瓣是一个非常复杂的问题。对于该问题的研究,常规的方法是沿用连续口面天线的设计思路,通过精确渐削阵列口面幅度分布获得低副瓣。但受固态 T/R 组件功率品种数的限制,有源相控阵天线很难获得理想的口面渐削。J.J.Lee^[1]提出了全新的设计思路,他采用梯度搜索技术调整口面幅度量化台阶的幅度和宽度得到低副瓣。焦等^{[2][3]}吸收 D.K.Cheng^[5]关于天线阵优化综合的思想提出了适用于天线阵低副瓣优化综合的约束非线性最优化设计法,并将该方法扩展到二维不可分离椭圆连续平面天线阵的量化问题。此外,高等^[6]利用统计方法进行了有源相控阵天线的量化设计与分析。

对于超低副瓣相控阵天线的综合设计还需要解决天线阵单元间互耦影响的修正问题。本文中,作者提出了直接优化量化综合法,实现了对超低副瓣相控阵天线的准确量化综合。该方法利用约束非线性最优化技术直接对相控阵天线进行优化综合,通过在优化模型中引入量化台阶宽度控制约束条件实现了单元幅度激励

的准确量化,并在优化迭代过程中直接计入天线阵单元间互耦的影响,使超低副瓣天线阵综合量化与对天线阵单元间互耦的修正能够一次完成。

2 天线阵方向图和方向性系数

为了满足工程中对信号处理的实际需要,本文主要针对二维可分离平面相控阵进行讨论。

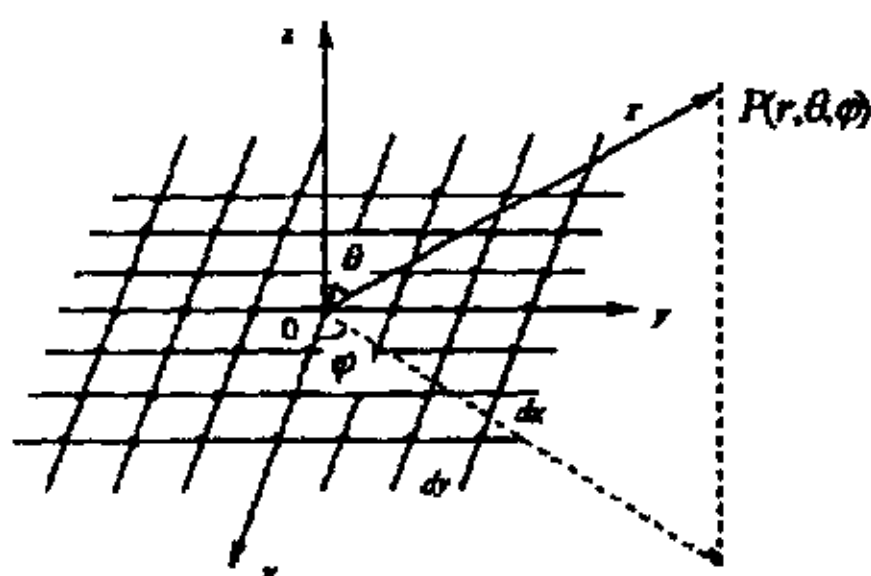


图 1 相控阵天线结构及坐标示意图

如图 1 所示,以单元(0,0)作为坐标的原点,设相控阵天线有 $M \times N$ 个单元沿轴向等间距排列,行间距为 dx ,列间距为 dy ,单元 (m, n) 的坐标为 $(m dx, n dy)$,幅度激励为 I_{mn} 。

对称半波振子天线阵制造简单,阵列带宽可以达到 10%,是常见的相控阵天线辐射单元。本文选取垂直极化对称半波振子天线作为天线阵辐射单元。

通过对天线阵单元采取适当的相位激励可以使相控阵天线的主波束在空间扫描。当天线阵的主波束向 (θ_0, ϕ_0) 方向扫描时,沿该方向天

线阵各单元辐射场路程差应相等, 如果以单元 (0,0) 为参考中心做一个与天线阵波束扫描方向垂直的等相位面, 那么各天线单元的相位激励应该与各单元到等相位面的路程差抵消, 从而可以得到各单元 (m, n) 的相位激励

$$\rho_{mn} = -k(\bar{r} \cdot \hat{R}_0) \quad (1)$$

这里, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, \bar{r} 是单元 (m, n) 的位置矢量, \hat{R}_0 表示波束扫描方向的单位矢量。根据场叠加原理, 天线阵的远场为

$$\bar{E}(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} \exp(j\rho_{mn}) \bar{f}_{mn}(\theta, \varphi) \exp(jk\bar{r} \cdot \hat{R}) \quad (2)$$

其中, $\bar{f}_{mn}(\theta, \varphi)$ 是天线单元 (m, n) 的辐射场, \hat{R} 表示场点方向的单位矢量。在扫描方向 (θ_0, φ_0) , $|\bar{E}(\theta, \varphi)|$ 有最大值, 天线阵的归一化方向图函数为

$$F(\theta, \varphi) = |\bar{E}(\theta, \varphi)| / |\bar{E}(\theta_0, \varphi_0)| \quad (3)$$

天线阵的方向性系数可以用下式来表示

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (4)$$

其它形式的天线阵可以采取相同的推导方式, 只要对单元位置矢量 \bar{r} 作适当修改即可。

3 超低副瓣天线阵直接优化量化综合法

将超低副瓣相控阵天线综合量化问题转化为一个约束非线性最优化问题: 对于固定单元的相控阵天线, 寻找合适的等幅激励区域划分和各区域幅度激励, 使天线阵辐射方向图在满足超低副瓣的前提下, 得到最大 (最优) 的方向性系数。通用数学模型可以用下面一系列公式来表示。

$$\min(-D) = \max D = \min \left[-\frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \right] \quad (5)$$

s.t.

$$20 \lg F(\theta, \varphi = \varphi_0) \leq SLL(\theta, \varphi = \varphi_0), \theta \text{ 在副瓣区} \quad (6)$$

$$20 \lg F(\varphi, \theta = \theta_0) \leq SLL(\varphi, \theta = \theta_0), \varphi \text{ 在副瓣区} \quad (7)$$

为了便于计算天线阵扫描情况, 我们对图 1 所示坐标系进行旋转变换, 使天线阵平面位于变换后直角坐标系 yz 平面, 当主波束指向 $(90^\circ, 0^\circ)$ 方向时为不扫描情况。式 (6) 和式 (7) 分别表示主波束扫描方向为 (θ_0, φ_0) 时, 在天线阵两个主方向图平面要达到的副瓣约束。式 (6) 和式 (7) 的数值实现对优化收敛影响很大, 通常可以采

用两种方法实现。一种方法是在整个副瓣区内搜索最大副瓣电平进行约束, 只要最大副瓣满足约束, 整个副瓣区必然满足约束。该方法实现比较简单, 但存有缺陷, 由于每次迭代搜索到的最大副瓣位置不固定, 易发生“振荡”, 造成优化计算很难收敛, 只能在给定的初值附近寻找最优。另外一种方法是对整个副瓣区进行约束, 首先选择适当的间距将辐射方向图离散化, 再对副瓣区内所有离散点的副瓣进行约束, 只要离散化间距选择的足够小, 就可以避免最大副瓣的“振荡”, 使优化计算很快收敛。

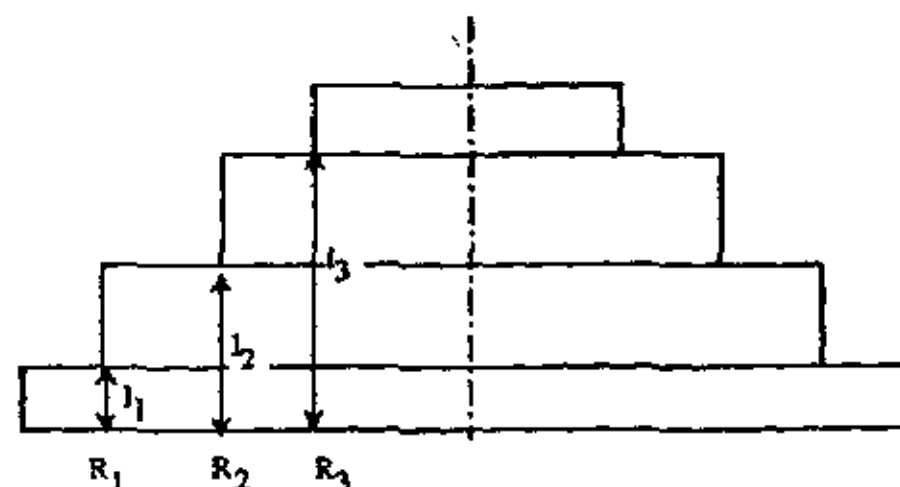


图2 激励幅度台阶分布

因为对于变量是整数的优化问题还没有有效的处理方法, 在 Lee 和焦的研究中, 他们首先采用连续的口面天线代替阵列天线进行优化综合和台阶宽度的量化选取, 再对量化台阶的边界进行离散, 从而避免了把量化台阶宽度作为优化变量时由于优化变量的不连续带来的优化计算困难。这种间接量化方法引入了量化误差, 可能会造成天线阵辐射方向图副瓣电平的严重恶化。此外, 该方法无法直接计入天线单元间的互耦和单元辐射特性, 很难一次准确完成对天线阵的综合设计。

作者在计算中发现: 对于给定量化台阶宽度的天线阵, 等台阶宽度量化 (例如 32 个单元分成 8 个台阶, 每个台阶相差 2 个单元) 比不等台阶宽度量化 (例如 32 个单元分为 7 个台阶, 台阶宽度可能相差 2 或为 3 个单元) 更容易达到较低的副瓣。对连续口面天线的量化计算也表明: 综合得到连续口面天线量化台阶的宽度与平均量化台阶宽度非常接近。据此, 我们提出了阵列天线直接优化量化综合方法: 将量化台阶的宽度作为连续的优化变量直接参与优化计算, 只在计算天线阵辐射方向图时进行取整量化; 为了抑制台阶宽度量化取整对优化计算的不利影响, 在优化模型中加入一个量化台阶宽度控制约束条件

$$(R_i - R_{i-1}) \geq \alpha \bar{R}, \quad 0 < \alpha < 1, i < N-1, N \text{ 为台阶数} \quad (8)$$

即要求各量化台阶的宽度差 $(R_i - R_{i-1})$ 不

能小于平均的量化台阶宽度差 \bar{R} 与压缩因子 α 的乘积, 其中 α 根据平均台阶宽度选取。该约束条件通过限定台阶宽度的变化范围抑制优化过程中优化变量取整量化造成的搜索方向的偏离, 保证了最优搜索, 实现了台阶宽度的自动调整。

本文采用数值稳定性比较好的乘子罚函数法进行天线阵的优化综合, 目前许多新优化方法已经开始应用在天线综合设计领域, 比如: 遗传算法等。

4 单元间互耦的直接优化修正

天线阵单元间存在着互耦影响, 而在扫描情况下, 等效单元间距变小, 互耦影响更为严重。因此, 在超低副瓣天线阵的设计中, 进行单元间互耦补偿与修正是十分关键的。

常规的互耦补偿方法不仅要调整单元的激励幅度, 还要对单元的相位激励进行修正, 这样就加大了工程中统一馈相的难度。作者采用互耦直接优化修正方法仅通过调整单元的幅度激励修正互耦的影响, 单元相位激励仍然按照式(1)给出。互耦直接优化修正法和直接优化量化法结合, 使天线阵的综合量化设计与单元间互耦修正可以同时进行。

互耦直接优化修正法的具体过程如下: 在优化迭代计算天线阵辐射场时, 首先根据各单元初始激励计算考虑互耦影响的各单元电流分布, 再由此得到天线阵的辐射场而参与优化计算, 最终的优化结果就是考虑了单元间互耦影响的修正结果。

对称半波振子天线的互耦问题, J.H. Richmond [7][8] 等人在 70 年代中期已经进行了全面的研究, 应用矩量法可以准确计算互耦的影响。详细情况请参见文献[9]。

5 计算结果与讨论

为了验证直接优化量化综合法和互耦直接优化修正方法的可行性, 作者对如下天线阵进行了仿真计算: 32×16 单元平面阵, 天线阵平面位于由图 1 变换坐标系的 yz 平面, y 方向单元间距 0.5λ , z 方向单元间距 0.7λ , 对称半波振子天线单元轴向为 z 方向, 在天线阵平面下方 0.25λ 处放置金属反射板。设计要求辐射方向图的副瓣电平在 θ 主平面达到 -35dB , 在 ϕ 主平面达到 -30dB 。

首先在天线阵不扫描情况下按照 7×6 的功率台阶分布对天线阵进行量化综合, 验证直

接优化量化法在台阶不等宽情况下的综合效果, 归一化幅度激励分布如表 1,

表 1

	y 方向	z 方向
I_1	1.00000	1.00000
I_2	1.00000	1.00000
I_3	1.00000	0.85112
I_4	1.00000	0.74381
I_5	0.82952	0.54658
I_6	0.82952	0.41154
I_7	0.68288	0.25788
I_8	0.68288	0.25788
I_9	0.51535	
I_{10}	0.51535	
I_{11}	0.36207	
I_{12}	0.36207	
I_{13}	0.22375	
I_{14}	0.22375	
I_{15}	0.12969	
I_{16}	0.12969	

天线阵的辐射方向图如图 3 和图 4。

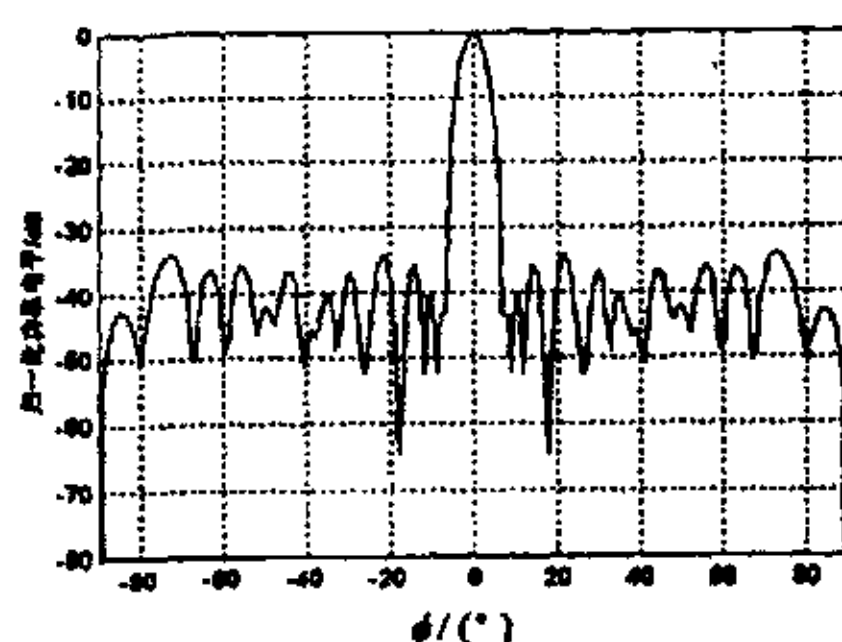


图 3 7×6 台阶分布, 不扫描时, $\theta=90^\circ$ 平面的辐射方向图

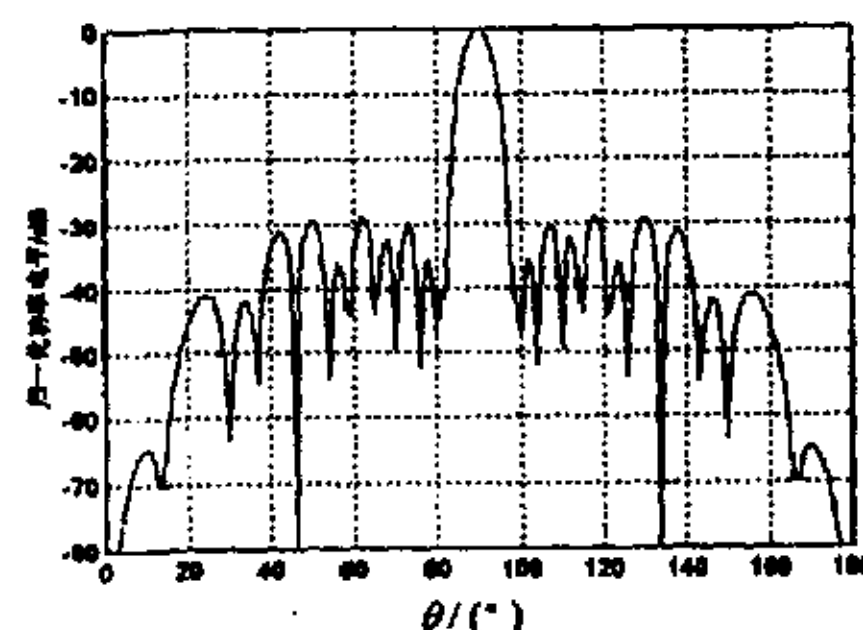


图 4 7×6 台阶分布, 不扫描时, $\phi=0^\circ$ 平面的辐射方向图

由图可见, 直接优化综合的结果达到了设计指标。 $\theta=90^\circ$ 平面互耦影响较为严重, 且主要影响辐射方向图的远区副瓣电平。 $\phi=0^\circ$ 平面互耦影响较小。

在天线阵沿 ϕ 方向扫描 30° 而 θ 方向不扫描情况下, 按照 7×6 的功率台阶分布对天线阵重

新进行优化综合, 归一化幅度激励分布如表 2,
表 2

	y 方向	z 方向
I_1	1.00000	1.0000
I_2	1.00000	1.0000
I_3	1.00000	0.8755
I_4	1.00000	0.7091
I_5	0.85230	0.4859
I_6	0.85230	0.3252
I_7	0.70930	0.1345
I_8	0.70930	0.1345
I_9	0.53567	
I_{10}	0.53567	
I_{11}	0.36172	
I_{12}	0.27275	
I_{13}	0.27275	
I_{14}	0.14668	
I_{15}	0.14668	
I_{16}		

天线阵的辐射方向图如图 5 和图 6。

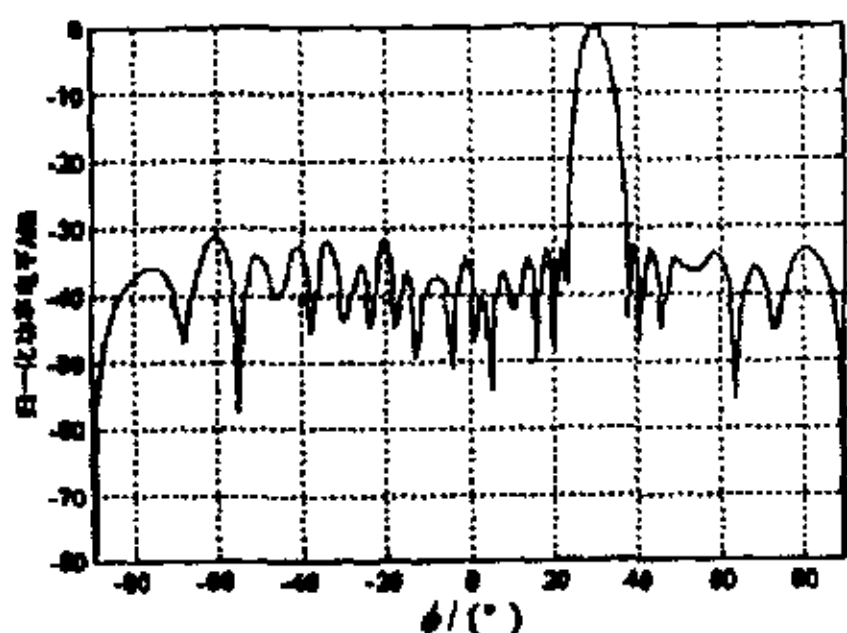


图 5 7×6 台阶分布, 扫描 $\phi = 30^\circ$ 时, $\theta = 90^\circ$ 平面的辐射方向图

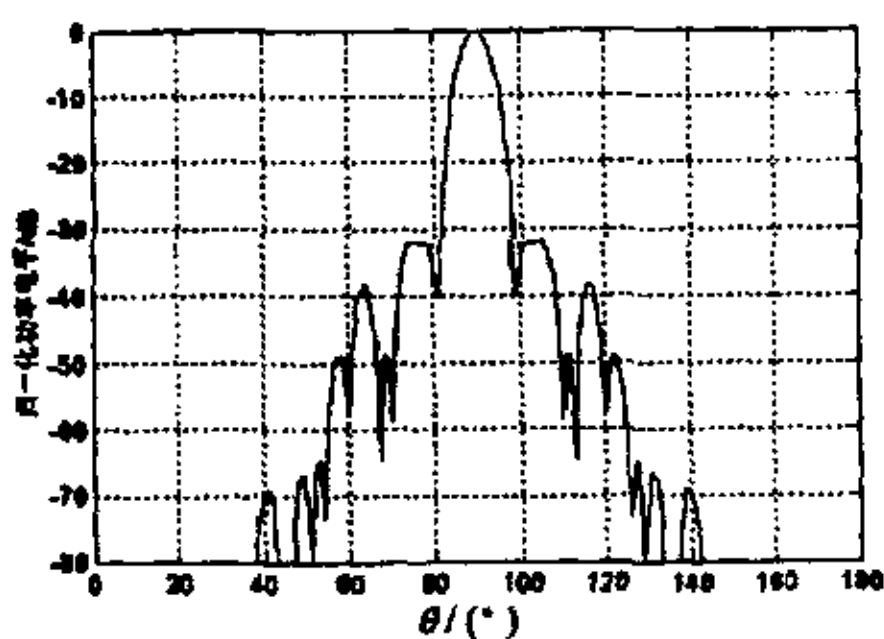


图 6 7×6 台阶分布, 扫描 $\phi = 30^\circ$ 时, $\phi = 30^\circ$ 平面的辐射方向图

由图可见, 在波束扫描情况下, 采用相同数量的功率台阶分布, 在 $\theta = 90^\circ$ 平面由于互耦的影响, 综合所能达到的最低副瓣电平要比不扫描情况下略高一些。

6 结论

直接优化量化综合法适用于不同类型相控阵天线的综合量化设计。仿真计算得到了比较理想的结果, 为了实用化还需进一步通过实验来验证。该综合方法属于大计算量数值计算方法, 由于综合优化时间过长可能会使应用范围受到一定的限制。随着新优化算法的研究和更快速计算设备的出现, 直接优化量化方法在工程中将有很好的应用前景。

参考文献

- 1 J.J.Lee. Sidelobe Control of Solid-state Array Antennas. IEEE Trans, 1988, AP-36(3):339-344
- 2 焦永昌, 吴鸿适. 一种新的低副瓣曲线阵数值综合方法. 电子学报, 1992, 20(6):7-14
- 3 焦永昌, 魏文元, 等. 有源椭圆型多阶平面阵的发射方向图的低副瓣优化综合. 机载预警雷达技术交流会论文集, 1993:41-51
- 4 Yong-Chang Jiao, Wen-Yuan Wei, et al. A New Low-side-lobe Pattern Synthesis Technique for Conformal Arrays. IEEE Trans, 1993, AP-41(6):824-831
- 5 David K.Cheng. Optimization Techniques for Antenna Arrays. Proceeding of the IEEE., 1971, 59(12):1664-1674
- 6 高铁, 李建新. 多阶振幅量化加权二维固态有源相控阵天线的设计与分析. 中国空间科学技术, 1993(3):11-19
- 7 Jack H.Richmond, N.Hugh Geary. Mutual Impedance Between Coplanar-Skew Sinusoidal Dipoles. IEEE Trans, 1970, AP-18(5):414-416
- 8 Jack H.Richmond, N.Hugh Geary. Mutual Impedance of Nonplanar-Skew Sinusoidal Dipoles. IEEE Trans, 1975, AP-23(5):412-414
- 9 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法. 北京: 电子工业出版社, 1985

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),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>