

基于自适应算法的带罩阵列天线方向图综合^{*}

蒋里芳, 万国宾, 郑莲玉
(西北工业大学电子信息学院 西安 710129)

摘 要:提出一种基于自适应天线理论的带罩阵列天线方向图综合方法。先用射线追踪法计算到达罩内阵列天线的入射信号,通过自适应算法进行波束赋形,再用表面积分法得到带罩自适应天线的远区辐射场。用权函数的迭代来减小带罩方向图和无罩方向图的差别,实现天线与罩的一体化优化。数值仿真结果表明,该方法能实现对带罩阵列天线主瓣指向、零陷位置和副瓣电平的控制,同时减小了天线罩对系统辐射特性方面的影响。

关键词:方向图综合; 天线罩; 自适应算法; 一体化设计

中图分类号:TN821.9

文献标识码:A

文章编号:CN11-1780(2013)03-0063-05

引 言

自适应波束形成算法作为自适应阵列天线的核心,在雷达、通信、地震探测系统等领域中得到广泛应用。自适应波束形成可以根据信号环境实时调整各个阵元的加权幅值和相位,使得主波束方向对准期望的方向,并抑制其他方向到达的干扰和噪声^[1]。对噪声和干扰的抑制能力的一个直观表征就是波束的旁瓣电平指标,低旁瓣天线可以有效抑制来自旁瓣区域的噪声和干扰。低旁瓣方向图综合与副瓣控制是阵列天线设计中的重要问题。

在以往的带罩天线设计中通常将天线与天线罩各自进行独立设计,较少考虑二者的相互影响,特别是天线罩对天线设计过程的影响。常见的天线方向图综合方法有 Dolph-Chebyshev 综合法、Taylor 综合法以及自适应算法^[2,3]和各种并行优化算法^[4,5]。而天线罩的设计方法则包括解析法^[6]、梯度法^[7]、模拟退火法^[8]和遗传算法^[9]等。常规设计方法的不足在于,当天线与罩的性能各自达到最优的情况下,带罩天线的性能却无法达到最优状态。

本文考虑天线罩对天线辐射性能的影响因素,提出一种基于自适应算法的带罩阵列天线方向图综合方法。利用自适应理论对天线各阵元信号的幅度和相位进行控制,使天线-罩系统能满足对辐射主瓣指向、零陷位置和副瓣电平控制的要求,减小天线罩在系统辐射特性方面的影响,使自适应优化后的辐射方向图更接近不带天线罩时的辐射方向图,从而实现天线-罩系统整体性能的最优化。

1 理论分析

带罩自适应天线模型结构及坐标系如图1所示。天线阵列由 N 元半波阵子天线组成。电流方向为 y 方向,阵元沿 x 轴均匀排布,且关于坐标原点对称。天线罩为单层实心介质罩,罩壁介质厚度为 d ,相对介电常数为 ϵ_r ,损耗角正切为 $\tan\delta$ 。

1.1 自适应波束形成原理

设一窄带信号沿 xoz 面以角度 θ 入射到天线阵列上, $s_n(k)$ ($n = 1, 2, \dots, N$)为第 n 个阵元 k 时刻接收

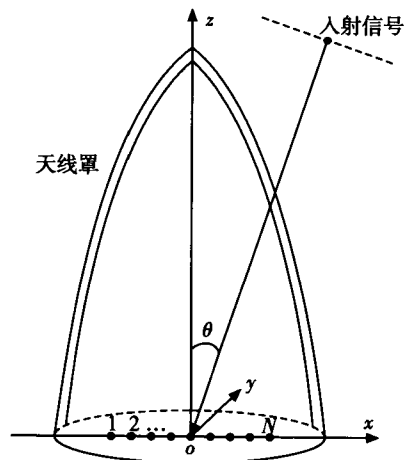


图1 自适应阵列天线与天线罩

^{*} 基金项目:航空科学基金(20101853019)

收稿日期:2012-12-24 收修改稿日期:2013-01-11

到的信号, 天线阵元接收信号矢量为

$$\mathbf{S}(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T \quad (1)$$

定义加权方向图为

$$P(\theta) = |\mathbf{W}^T \mathbf{V}| \quad (2)$$

其中, 复权向量 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$, 表示各个天线阵元上激励电流的幅度和相位, $\mathbf{V} = [g_1(\theta), g_2(\theta)e^{-j\phi_2(\theta)}, \dots, g_N(\theta)e^{-j\phi_N(\theta)}]^T$ 为包含各阵元相移的方向函数向量, $\phi_n(\theta)$ 是传播相位, $g_n(\theta)$ 为第 n 个阵元的方向性函数。

给定天线的期望方向图 P_d , 加权方向图 P 与 P_d 的均方误差定义为

$$e = \sum_{i=1}^M f(\theta_i) |P(\theta_i) - P_d(\theta_i)|^2 \quad (3)$$

其中, $f(\theta_i)$ 为权函数, 表示 θ_i 方向的干扰功率; M 为采样点个数。

根据最小均方误差准则^[2], 使误差 e 达到最小的最优权向量为

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_s^{-1} \mathbf{R}_d \quad (4)$$

其中, \mathbf{R}_s 是信号的协方差矩阵, \mathbf{R}_d 是互相关向量。在实际计算中, 初始 $\mathbf{R}_s(1)$ 和 $\mathbf{R}_d(1)$ 由 K 次采样数据估计^[10] 得到。

1.2 带罩天线单元接收信号的修正

为考虑天线罩对罩内阵列天线接收信号的影响, 可根据射线追踪法^[11] 在罩外建立一个垂直于入射波传播方向的等相面, 如图 1 所示。若等相面上各点的信号为 s , $L_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 表示各阵元到等相面的距离, 入射线与罩壁法线夹角为 α_n , 则罩内天线阵列上的接收信号可表示为

$$s_n = \{[(\mathbf{b} \cdot \mathbf{s})\mathbf{b}]T_{\perp} + [(\mathbf{t} \cdot \mathbf{s})\mathbf{t}]T_{\parallel}\} e^{-jk(L_n - d \cos \alpha_n)} \quad (5)$$

其中, T_{\parallel} 和 T_{\perp} 分别为罩壁的平行极化和垂直极化传输系数^[12], 二者决定于罩壁的结构; \mathbf{b} 和 \mathbf{t} 分别为与入射面垂直和平行的罩壁的单位切向矢量; k 为传播常数。

当天线阵元接收信号确定以后, 即可在忽略天线罩对辐射过程影响的条件下, 根据前文公式求得各阵元的激励幅度和相位, 从而根据带罩天线的分析方法^[13] 可计算出带罩阵列天线未优化的综合方向图 $P(\theta)$ 。

1.3 天线方向图综合优化过程

为考虑天线罩对天线辐射过程的影响, 对天线权值做进一步优化。可将 $P(\theta)$ 作为初始方向图 $P_1(\theta)$, 并根据它与期望方向图 $P_d(\theta)$ 的误差对权函数 $f(\theta)$ 进行迭代修正。

$$f_{k+1}(\theta_i) = \begin{cases} \text{主瓣: } \begin{cases} 0, & |P_k(\theta_i) - P_d(\theta_i)| \leq \varepsilon \\ K_m |P_k(\theta_i) - P_d(\theta_i)|, & \text{其它} \end{cases} \\ \text{旁瓣: } \max\{0, K_p [P_k(\theta_i) - P_d(\theta_i)]\} \end{cases} \quad (6)$$

其中, k 和 i 分别表示迭代次数和角度采样点; $P_k(\theta)$ 是第 $k-1$ 次迭代后的带罩天线方向图; ε 是合成方向图与期望方向图在主瓣区域的误差限度; K_m 和 K_p 是迭代增益, 根据误差限度和旁瓣电平大小进行适当选择。

本文中对旁瓣区域的干扰只加在旁瓣峰值上, 这样能很好地控制旁瓣电平, 并且大大减少了所添加的干扰个数, 加速迭代收敛。由于每一次的迭代计算都会导致加权方向图改变, 所以在计算下一次权函数时都要对主瓣宽度和旁瓣峰值的位置进行搜索, 确定旁瓣区的干扰个数和位置。

可得新的权值矢量为

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{R}_s(k+1)^{-1} \mathbf{R}_d(k+1) = [\mathbf{R}_s(k) + \tilde{\mathbf{R}}_s(k)]^{-1} [\mathbf{R}_d(k) + \tilde{\mathbf{R}}_d(k)] \quad (7a)$$

其中, $\tilde{\mathbf{R}}_s(k)$ 为残余协方差矩阵, $\tilde{\mathbf{R}}_d(k)$ 为残余互相关向量。

$$\tilde{\mathbf{R}}_s(k) = \sum_{i=1}^M f_{k+1}(\theta_i) \mathbf{V}(\theta_i) \mathbf{V}'(\theta_i) \quad (7b)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_d(k) = \sum_{i=N_L}^{N_R} f_{k+1}(\theta_i) P_d(\theta_i) \mathbf{V}'(\theta_i) \quad (7c)$$

式中, θ_{N_L} 和 θ_{N_R} 分别表示主瓣区域的左端点和右端点。

由式(7)可计算出第 k 次迭代的阵列单元激励电流值,再根据带罩天线的表面积分分析方法^[13]得到加权方向图 $P_{k+1}(\theta)$,当 $P_{k+1}(\theta)$ 与 $P_d(\theta)$ 在旁瓣区域满足零陷和电平要求时,优化完成。

2 加罩阵列天线方向图综合实例

2.1 模型参数

天线阵列单元间距为 $\lambda/2$ (λ 为波长),工作频率为 10GHz。天线罩外形为正切卵圆形,罩底圆直径 20λ ,高度 40λ ,罩壁介质 $\varepsilon_r = 4$, $\tan\delta = 0.015$ 。

期望信号入射方向为 0° ,信噪比 $SNR = 10\text{dB}$;干扰信号入射方向为 -35° ,干噪比 $INR = 20\text{dB}$;两信号不相关。阵列天线为线极化。要求综合方向图的旁瓣电平低于主波束峰值 40dB。信号采样次数 $K = 80$,主瓣区迭代系数 $K_m = 200$,旁瓣区迭代系数 $K_p = 30$ 。

2.2 计算结果

图 2 给出了罩壁厚度为 0.275λ ^[14] 时带罩阵列天线优化前、后与自适应阵列天线远区电场的对比结果图;相应的归一化阵元权值和阵元补偿相位分别见图 3 和图 4。可以看出,由于天线罩与天线工作频率相近,带罩阵列天线的方向图在主轴和近轴方向上与天线方向图吻合较好。相较于无罩情况,优化前的综合方向图远轴方向上副瓣电平与期望方向图有较大的差异。优化后的综合方向图在保证主瓣方向指向期望信号方向、干扰信号方向形成零陷的基础上,更接近无罩情况下的自适应天线方向图。

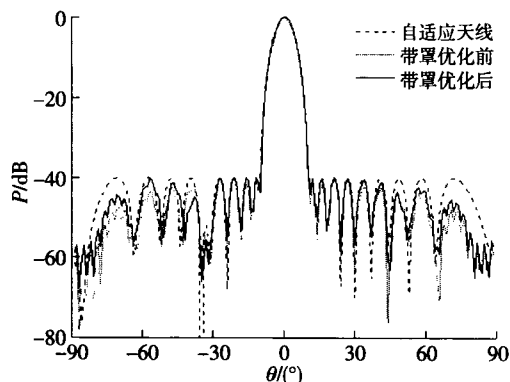


图 2 罩壁厚度为 0.275λ 时的方向图

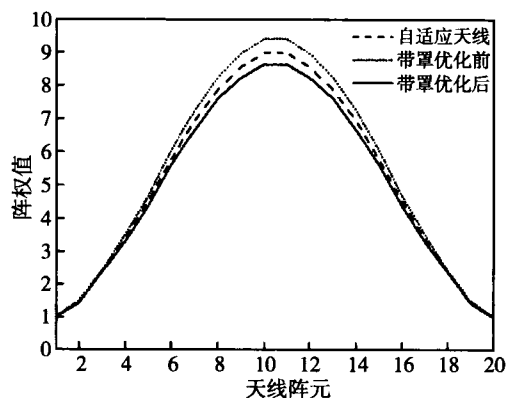


图3 归一化的阵元权值对比(罩壁厚度 0.275λ)

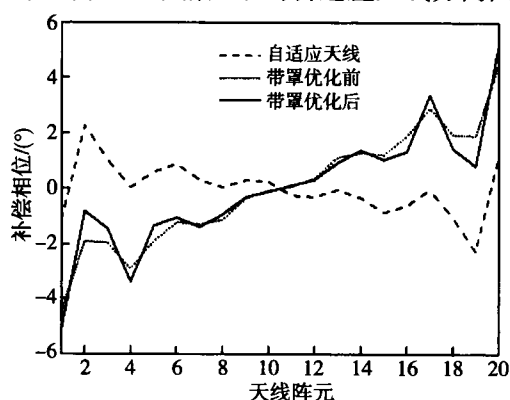


图4 阵列各单元的补偿相位(罩壁厚度 0.275λ)

图 5 给出了在系统其它参数条件不变的情况下,罩壁厚度为 0.43λ (工作频率为 6.4GHz) 时的带罩阵列天线优化前、后与自适应阵列天线的远区电场对比结果图;相应的归一化阵元权值和阵元补偿相位分别见图 6 和图 7。从图中看出,由于天线与罩的工作频率不匹配,带罩优化前的方向图主瓣和旁瓣幅度相较于无罩情况都有明显的降低,零陷亦有偏移;优化后的方向图在 $-35^\circ \sim 35^\circ$ 的空间范围内与无罩的方向图能很好的吻合,确保了在干扰信号方向形成深零陷,并控制副瓣电平值在 -40dB ,副瓣电平整体幅度更加接近无罩方向图。结合图 2 ~ 图 7 表明,通过自适应优化后的天线-罩系统能够减小天线罩对系统辐射特性方面的影响。

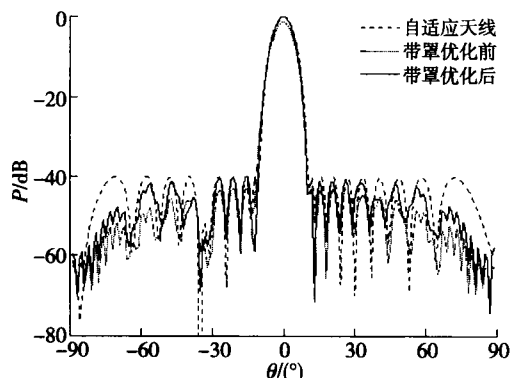
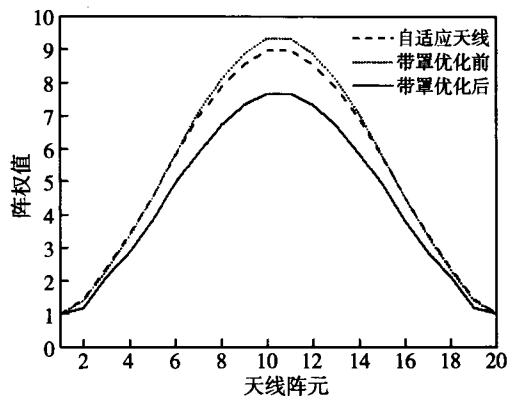
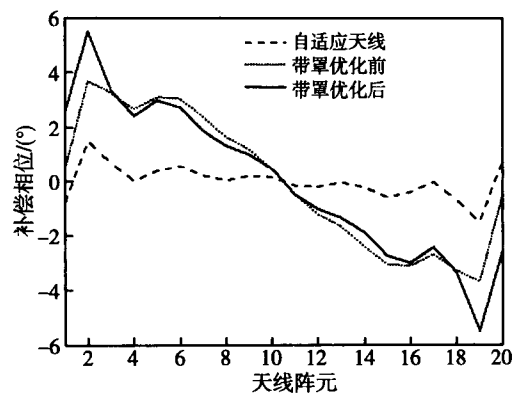


图 5 罩壁厚度为 0.43λ 时的方向图

图6 归一化的阵元权值对比(罩壁厚度 0.43λ)图7 阵列各单元的补偿相位(罩壁厚度 0.43λ)

3 结束语

本文给出一种基于自适应算法的带罩阵列天线方向图综合方法,分别采用射线法和表面积分法分析天线罩外的入射信号和带罩阵列天线的辐射特性,经过自适应迭代得出一组最优权向量,使给定的带罩阵列天线满足特定的方向图要求。通过算例可以看出,该算法能有效控制辐射方向图的主瓣指向、零陷位置和副瓣电平值,减小天线罩对系统辐射特性方面的影响,实现了天线-罩系统整体性能的最优化。

参考文献

- [1] Applebaum S, Chapman D. Adaptive Arrays with Main Beam Constraints[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1976, 24(5):650~662.
- [2] Zhou P Y, Ingram M A. Pattern Synthesis for Arbitrary Arrays Using an Adaptive Array Method[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1999, 47(5):862~869.
- [3] Guo Q, Liao G, Wu Y, Li J. Pattern Synthesis Method for Arbitrary Arrays Based on LCMV Criterion[J]. Elec. Lett., 2003, 39(23):1628~1630.
- [4] Pena F J A, Gonzalez J A R, Lopez E V, Rengarajan S R. Genetic Algorithms in the Design and Optimization of Antenna Array Patterns[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1999, 47(3):506~510.
- [5] Bevelacqua P J, Balanis C A. Geometry and Weight Optimization for Minimizing Sidelobes in Wideband Planar Arrays[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2009, 57(4):1285~1289.
- [6] Rulf B. Problems of Radome Design for Modern Airborne Radar, Part 1&2[J]. Microwave J, 1985, 28.
- [7] Kaplun V A, Zelenkevich V M. Parametric Synthesis of Radome Walls for Microwave Antennas[J]. Radiotekhnika, 1989, 44(6):57~59.
- [8] Hsu F, Chan K K, Chao S H. Optimal Boresight Error Design of Radomes of Revolving Symmetry[J]. Elec. Lett., 1994, 30(19):1561~1562.
- [9] 万国宾. 带罩天线和有限阵列结构的研究[D]. 西安交通大学, 2000.
- [10] Veen B D V, Buckley K M. Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering[J]. IEEE ASSP Magazine, 1988, 5(2):4~24.
- [11] Burks D, Graf E, Fahey M. A High Frequency Analysis of Radome-Induced Radar Pointing Error[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1982, 30(5):947~955.
- [12] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京:国防工业出版社, 1993.
- [13] Paris D. Computer-Aided Radome Analysis[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1970, 18(1):7~15.
- [14] Kozakoff D J. Analysis of Radome-Enclosed Antennas[M]. Boston and London: Artech House, 1997, 136~140.

A Pattern Synthesis Method for Radome-enclosed Adaptive Array Antenna

Jiang Lifang, Wan Guobin, Zheng Lianyu

Abstract: This paper presents a pattern synthesis method for the radome-enclosed antenna based on the adaptive array theory. The incident signal of the antenna-radome system is calculated with the ray tracing technique first. Then the synthesis pattern is

formed by an adaptive algorithm. The surface-integration method is employed to the far-field radiation formulation for the radome-enclosed adaptive array antenna. The values of the weighting function are iterated to minimize the absolute difference between the synthesized and desired patterns, which can optimize the antenna-radome system. Numerical examples show that the algorithm can steer the main beam and null in given directions and yield the sidelobe meeting a specified level. The method can minimize the effect of the radome on the system radiation characteristics.

Key words: Pattern synthesis; Radome; Adaptive algorithm; Integrated design

[作者简介]

蒋里芳 1988 年生, 硕士。主要研究方向为自适应天线和天线罩分析与设计等。

万国宾 1967 年生, 博士生导师。主要研究方向为天线罩分析与设计、天线理论及电磁散射数值分析等。

郑莲玉 1988 年生, 硕士。主要研究方向为天线理论、阵列天线设计及优化。

(上接第 57 页)

[9] 戚林, 郝士琦, 王磊. 一种对 CCSDS 删除卷积码的盲解码方法[J]. 微型机与应用, 2010, 29(19): 55 ~ 58.

[10] 王新梅, 肖国镇. 纠错码——原理与方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.

[11] Steven M Kay 著, 罗鹏飞等译. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

Fast Recognition Algorithm for CCSDS Convolutional Codes

Zhang Guoyu, Shen Yongjian, Wang Ganggang

Abstract: This paper presents and implements a fast recognition algorithm for CCSDS convolutional codes based on the CCSDS convolutional code specification. The algorithm traverses the five code-rate-unknown convolutional codes in CCSDS specification by its parity matrix so that it can complete the identification of punctured modes and start position. This algorithm has low complication and good fault tolerance, it is easy to carry out, and it overcomes the problem of start position ambiguity of the captured sequence. The simulation results show that this algorithm can reach 95% or higher right recognition rate when the captured sequence has enough length and the bit error rate is lower than 10^{-2} .

Key words: CCSDS; Punctured convolutional codes; Fast recognition algorithm

[作者简介]

张国玉 1987 年生, 硕士。主要研究方向为航天信息对抗技术。

沈永健 1985 年生, 工程师。主要研究方向为信息对抗。

王岗罡 1974 年生, 工程师。主要从事质量监督工作。

(上接第 62 页)

performances can be achieved: the error of various output power ratio of each port is less than $\pm 0.5\text{dB}$, the return loss of each port is better than -15dB , the isolation between two ports is better than 18dB , and the relative bandwidth is more than 11% . The feeding network has compact structure and high design agility, and it is adapted for the medium gain low side-lobe microstrip antenna array.

Key words: Microstrip antenna array; Parallel-series feeding; Three-way power divider; Low side-lobe

[作者简介]

丁轲佳 1979 年生, 工程师。主要研究领域为多波束天线、机载天线、微波电路、电磁兼容。

熊小军 1978 年生, 工程师。主要研究领域为通信电路、无人机测控系统。

贺斐 1986 年生, 硕士研究生。主要研究领域为多波束天线、波束成形网络。

吕善伟 1937 年生, 教授, 博士生导师, 政府特殊津贴专家。研究领域为天线、通信系统。

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>