

相控阵天线系统散射分析

张鹏飞 龚书喜 刘英 徐云学

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文采用 S 参数分析了有源相控阵天线单元馈电系统模型的接收机负载反射系数。将该反射系数代入阵列天线散射场基础理论公式分析了有源相控阵天线的散射场,将有源相控阵天线的天线模式项散射场分为天线模式反射散射场和天线模式相控散射场进行分析。最后通过一维线阵验证了理论分析结果。该分析方法和分析结果为相控阵天线 RCS 计算和控制提供了理论指导。

关键词: 有源相控阵天线; 结构模式项散射; 天线模式项散射

中图分类号: TN821+.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0628-04

Scattering Analysis of Active Phased-Array Antenna System

Zhang Peng-fei Gong Shu-xi Liu Ying Xu Yun-xue

(State Key Lab of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The reflection coefficient of the receiver load of the feed system model for the cells in the active phased-array antenna is analyzed by S parameters. The scattering field of the active phased-array antenna is analyzed by submitting the reflection coefficient to the basic theoretical formula of the scattering fields of array antenna. The antenna model scattering of the active phased-array antenna is analyzed by dividing it into antenna model reflective scattering and antenna model phased scattering, and the analyzing results is testified by a one dimension array antenna, which plays a guidance role in the computation of the scattering fields of the phased array and its RCS control.

Key words: Active phased-array antenna; Structural mode scattering; Antenna mode scattering

1 引言

有源相控阵天线因具有良好的波束控制特性已经成为现代先进雷达系统的必要组成部分^[1,2]。而相控阵列天线系统由于结构复杂、尺寸庞大成为隐身飞行器和隐身舰艇的一个重要的散射源。综合考虑馈电系统以及单元互耦的有源相控阵天线系统散射特性的分析已经成为目前天线隐身技术的一个研究重点。受计算机内存和计算速度的限制,常规的仿真计算软件无法对大型阵列结构的散射特性进行全面的仿真计算分析。而有源相控阵天线的设计制造和测试成本很高、周期较长。所以对于有源相控阵系统散射特性的理论研究和预估具有很高的工程价值^[2-4]。

相对具有很多成熟的计算方法的阵列天线辐射特性分析^[5-9],目前国内外对于阵列天线尤其是有源相控阵天线的散射特性的分析研究相对较少。文献[6]对于阵列天线的馈电系统和散射理论进行了探索性的研究。

本文首先将球面波函数展开和散射矩阵推广到阵列天线的散射分析,得到阵列天线散射的基础理论公式,然后对相控阵天线单元的馈电系统进行模块化和 S 参数分析,得到了天线单元的接收机负载反射系数的计算表达式。将反射系

数表达式代入阵列天线散射基础理论公式,在进行适当的近似之后得到了有源相控阵天线的结构模式项散射场和天线模式项散射场的表达式。在对与馈电系统相关的天线模式项散射场进行分析之后,依据其特点,将天线模式项散射场分为天线模式反射散射场和天线模式相控散射场,对这两部分散射场的特点和峰值方向进行了预测。本文通过一维线阵验证了上述的理论分析结果。最后对所提出的分析方法和分析结果在相控阵天线 RCS 控制中的应用进行了简单的讨论。

2 阵列天线散射

阵列天线的辐射与散射是阵列中所有单元共同贡献的结果,阵列的复杂性包含了两方面的原因:其一在于馈电网络,从天线通过馈电网络一直延伸到收发系统所有的不连续性均造成了复杂的双向反射;另一方面的原因为阵列单元之间的互相耦合。

如图1所示,设天线有 r 个辐射单元,取各个单元馈电系统的单模传输区的某个截面为天线参考面,就得到 r 个馈电端口。假设第 $i(i=1,2,\dots,r)$ 个端口的入射模复振幅为 a_i ,出射模的复振幅为 b_i 。在天线的辐射空间,选取包含天线的一个球面 s ,将天线在 s 外空间的辐射和散射场采用球面波函数展开:

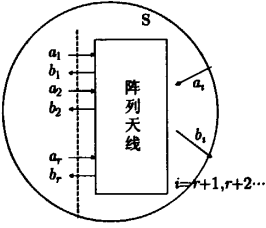


图1 阵列天线辐射散射分析模型

$$\mathbf{E} = \sum_i (a_i \mathbf{e}_i^{\text{in}} + b_i \mathbf{e}_i^{\text{out}}) \quad (1)$$

$(a_i, b_i), i = r+1, r+2, \dots$ 为场的球面波展开式中的第 i 个入射波 \mathbf{e}_i^{in} 和出射波 $\mathbf{e}_i^{\text{out}}$ 的复振幅。则阵列天线的特性可用散射矩阵的分块形式完整地加以表征^[7]:

$$\begin{bmatrix} [b]_r \\ [b]_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [s]_{rr} & [s]_{rs} \\ [s]_{sr} & [s]_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [a]_r \\ [a]_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{即} \quad \begin{cases} [b]_r = [s]_{rr} [a]_r + [s]_{rs} [a]_s \\ [b]_s = [s]_{sr} [a]_r + [s]_{ss} [a]_s \end{cases} \quad (3)$$

令 $[\Gamma]_{rr}^i = \text{diag}[\Gamma_1^i, \Gamma_2^i, \dots, \Gamma_r^i]$, $\Gamma_i^i (i = 1, 2, \dots, r)$ 表示第 i 个端口由天线向馈电系统方向的反射系数, 即接收机负载反射系数, 则有

$$[a]_r = [\Gamma]_{rr}^i [b]_r \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)和式(3), 整理后得到

$$[b]_r = \{[I]_{rr} - [s]_{rr} [\Gamma]_{rr}^i\}^{-1} [s]_{rs} [a]_s \quad (5)$$

$$[b]_s = [s]_{sr} [\Gamma]_{rr}^i [b]_r + [s]_{ss} [a]_s \quad (6)$$

若各单元理想匹配, $\Gamma_i^i = 0, (i = 1, 2, \dots, r)$, 代入式(5), 式(6)可得:

匹配接收幅度向量:

$$[b]_r|_{\Gamma_i^i=0, (i=1,2,\dots,r)} = [s]_{rs} [a]_s = [b]_r^m \quad (7)$$

和匹配散射幅度向量:

$$[b]_s|_{\Gamma_i^i=0, (i=1,2,\dots,r)} = [s]_{ss} [a]_s = [b]_s^m \quad (8)$$

将式(7), 式(8)代入式(5)有

$$[b]_s = [s]_{sr} [\Gamma]_{rr}^i \{[I]_{rr} - [s]_{rr} [\Gamma]_{rr}^i\}^{-1} [b]_r^m + [b]_s^m \quad (9)$$

令

$$[C] = \{[I]_{rr} - [s]_{rr} [\Gamma]_{rr}^i\}^{-1} \quad (10)$$

式(9)的元素可写为

$$b_i = b_i^m + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r s_{ij} \Gamma_j^i C_{jk} b_k^m \quad (11)$$

将式(11)两端乘以第 i 个外向矢量球面波函数 $\mathbf{e}_i^{\text{out}}$, 并对 i 从 $r+1$ 到 ∞ 求和就可得到:

$$\sum_{i=r+1}^{\infty} b_i \mathbf{e}_i^{\text{out}} = \sum_{i=r+1}^{\infty} b_i^m \mathbf{e}_i^{\text{out}} + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r \left(\sum_{i=r+1}^{\infty} \mathbf{e}_i^{\text{out}} s_{ij} \right) \Gamma_j^i C_{jk} b_k^m \quad (12)$$

令 $\mathbf{E}^* = \sum_{i=r+1}^{\infty} b_i \mathbf{e}_i^{\text{out}}$, 由式(1)可知该部分散射场表示所有散射外行波的叠加构成的空间散射总场; 令 $\mathbf{E}_0^* =$

$\sum_{i=r+1}^{\infty} b_i^m \mathbf{e}_i^{\text{out}}$, 由式(8)可知该部分散射场表示所有单元匹配,

即 $\Gamma_k^i = 0, (k = 1, 2, \dots, r)$ 时由匹配散射幅度向量激励的外行散射波构成的空间散射场, 称为阵列天线的结构模式项散射; 令 $\mathbf{E}_a^* = \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r \left(\sum_{i=r+1}^{\infty} \mathbf{e}_i^{\text{out}} s_{ij} \right) \Gamma_j^i C_{jk} b_k^m$, 表示阵列天线的天线模式项散射。

由文献[6]可知 $\sum_{i=r+1}^{\infty} \mathbf{e}_i^{\text{out}} s_{ij} = \mathbf{E}_j = \sqrt{Z} A_j(k_2) \frac{e^{-jk_2 r}}{r}$ 表示

编号为 j 的单元受激励, 其它单元接匹配负载时的辐射场。计及分别以阵列中心为相位参考点和以 j 单元中心作为相位参考点得到的阵列中 j 单元远区辐射场 \mathbf{E}_j^0 和 \mathbf{E}_j 的相位差别, 有 $\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_j^0 \exp(jk \cdot \rho_j)$, ρ_j 为 j 单元中心位置。令 $V_j = \left(\sum_{k=1}^r C_{jk} b_k^m \right) \Gamma_j^i$, 则天线模式项散射式可以写为

$$\mathbf{E}_a^* = \sum_{j=1}^r V_j \exp(jk \cdot \rho_j) \mathbf{E}_j^0 \quad (13)$$

为天线模式项散射的叠加定理形式。若忽略单元之间辐射场的差别即认为 $\mathbf{E}_j^0 = \mathbf{E}_0^0$, 令 $S_a = \sum_{j=1}^r V_j \exp(jk \cdot \rho_j)$; 则式(13)变为 $\mathbf{E}_a^* = \mathbf{E}_0^0 \times S_a$ 为阵列天线的天线模式项散射的叠加定理表达形式。

综上所述, 阵列天线的空间散射总场由结构模式项散射和天线模式项散射构成:

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{E}_0^* + \mathbf{E}_a^* \quad (14)$$

3 有源相控阵馈电系统分析

如图2所示: 有源相控阵单元系统主要由几个部分构成: 辐射单元天线、移相器、收发模块, 以及与收发模块相连的馈源与接收系统。对收发参考面左侧的 T/R 模块、馈源、接收机以及连接它们的环形器可表示成一个单端口有源模块。由于此模块当中包含有低噪声放大器、高功率放大器等有源器件, 对其可采用电路仿真结合网络图论等工具进行分析。对于散射问题而言可以认为, 与此模块相关的参数仅为与其与移相器相连的端口处的反射系数 Γ_M 。需要注意的是对具有收发共用模块的 T/R 组件, 由低噪声放大器、公用模块和高功率放大器构成的环路在某些特殊情况下甚至可以使反射系数 $|\Gamma_M| > 1$ 。

对于移相器采用 S 参数进行分析, 假设移相器的 S 参数

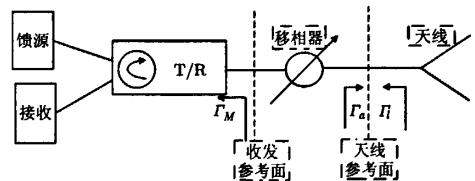


图2 相控阵天线单元系统示意图

为 $[S] = \begin{bmatrix} S_{11}^p & S_{12}^p \\ S_{21}^p & S_{22}^p \end{bmatrix}$, S 参数对参考面上的特性阻抗 Z_0 归一。

其中

$$S_{12}^p = |T_p'| e^{j\psi_j}, S_{21}^p = |T_p| e^{j\psi_j} \quad (15)$$

$|T_p|$ 表示损耗, ψ_j 表示该单元移相器的相移, S_{11}^p 和 S_{22}^p 表示移相器两端的反射参数。则天线参考面上的反射系数:

$$\Gamma_l = S_{11}^p + \frac{S_{12}^p S_{21}^p \Gamma_M}{1 - S_{22}^p \Gamma_M} \quad (16)$$

4 有源相控阵天线模式项散射分析

为分析有源相控阵天线的馈电系统对阵列散射的影响和散射场的主要特点, 进行如下的假设: (1)忽略单元之间的差异: $E_j^0 = E_0^0$, $\Gamma_j^a = \Gamma^a$; (2)忽略天线单元之间的互耦: $[S]_{rr} = \Gamma^a [I]$; (3)在受斜入射平面波照射的情况下, 考虑到阵列单元受到的入射波激励的相位差别, $b_j^m \approx b_0^m \cdot \exp[-jk^i \cdot \rho_j]$, b_0^m 为阵列中心单元的匹配接收幅度; (4)假设移相器的两个端口匹配良好, S_{11}^p , S_{22}^p 都很小, 此时高阶小量 $S_{22}^p \Gamma_M$ 可以忽略, 即 $\Gamma_l = S_{11}^p + \frac{S_{12}^p S_{21}^p \Gamma_M}{1 - S_{22}^p \Gamma_M} \approx S_{11}^p + S_{12}^p S_{21}^p \Gamma_M$; (5)若移相器呈线性工作状态, 可假设 $S_{12}^p = |T_p'| e^{j\psi_j} = |T_p| e^{j\psi_j}$ 。由于指数因子中包含 ψ_j , S_{21}^p 和 S_{12}^p 受相控阵馈相工作状态的控制, 其余参数均为常数。基于上面的假设有:

$$\begin{aligned} \Gamma_j^l &= S_{11}^p + S_{12}^p S_{21}^p \Gamma_M = \Gamma_{\text{const}}^l + \Gamma_{MP}^l e^{j(\psi_j + \psi_j')} \\ &= \Gamma_{\text{const}}^l + \Gamma_{MP}^l e^{j(1+t)\psi_j} \end{aligned}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{\text{const}}^l &= S_{11}^p \\ \Gamma_{MP}^l &= |T_p| |T_p'| \Gamma_M \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

则天线模式散射场变为

$$\begin{aligned} E_a^s &= E_0^0 b_0^m \Gamma_{\text{const}}^l \sum_{j=1}^r \exp[j(k - k^i) \cdot \rho_j] \\ &+ E_0^0 b_0^m \sum_{j=1}^r \Gamma_{MP}^l e^{j(1+t)\psi_j} \exp[j(k - k^i) \cdot \rho_j] \end{aligned} \quad (18)$$

令

$$E_a^{s'} = E_0^0 b_0^m \Gamma_{\text{const}}^l \sum_{j=1}^r \exp[j(k - k^i) \cdot \rho_j] \quad (19)$$

为天线模式反射散射场。由于表达式中不包含 ψ_j , 该部分散射场不受有源相控阵天线的馈电相位变化的影响, 最大值出现在 $k_z = k_z^i$, $k_y = k_y^i$, $k_x = -k_x^i$ 对应的方向。该方向正好位于以阵列平面为反射面, 以来波方向为入射方向的镜面反射方向上。由于该项散射与阵列因子相关, 所以在该反射方向上会形成一个强烈的散射峰值。

令

$$\begin{aligned} E_a^{pc} &= E_0^0 b_0^m \sum_{j=1}^r \Gamma_{MP}^l e^{j(1+t)\psi_j} \exp[j(k - k^i) \cdot \rho_j] \\ &= E_0^0 b_0^m \Gamma_{MP}^l \sum_{j=1}^r \exp\{j[(k - k^i) \cdot \rho_j + ((1+t)\psi_j)]\} \end{aligned} \quad (20)$$

为天线模式相控散射场。受表达式中 ψ_j 的影响, 该部分散射场随着天线系统馈电相位的变化而不断变化。其最大的叠加方向性出现在 $(k - k^i) \cdot \rho_j + ((1+t)\psi_j) = 0$ 所确定的 k 方向上。由于该项散射与阵列因子相关, 所以在该方向上也会形成一个强烈的散射峰值。

需要注意的, 若仅令 $\psi_j = 0$, 即同相馈电时, 天线模式相控散射场并不为 0。但是其最大指向与天线模式反射散射场重合, 所以此时天线模式相控散射场与天线模式反射散射场合并为天线模式反射散射场, 对应于普通阵列天线的天线模式散射场。

5 有源相控阵列天线结构模式项和天线模式项散射验证

本文采用由 9 个间距为半波长的线极化微带贴片天线单元构成的一维阵列来验证上述的散射理论分析结论。工作频率 3GHz, 微带介质介电常数 2.64, 厚度 2mm, 天线宽边 36.4mm, 窄边 26.66mm, 采用同轴线背馈, 馈电点位于宽边中心线上, 距离窄边中心 5.98mm。馈电采用的同轴线为 50Ω, 内导体半径为 0.5mm, 外导体半径为 1.51mm, 内外导体中间介质假设为空气, 天线参考面取距离接地板 10mm 处的同轴线截面。各个单元的馈电同轴线长度依次递增以得到馈电相位的依次递增。相位递增的大小 $\Delta\psi$ 由同轴线递增长度 ΔL 来控制, 当增量为 0 的时候变为均匀馈电。收发参考面取各馈电端口。本文主要研究阵列方向与单元法向构成的 E 面主极化辐射和散射场 E_θ 。采用 ansoft(HFSS)仿真软件计算。

当 $\Gamma_k^l = 0, (k = 1, 2, \dots, r)$ 时的散射场为天线结构模式散射场, 所以若令 $\Delta L = 0$, 并在天线参考面上接匹配负载, 此时计算所得的散射总场为天线结构模式散射场。任意状态下的散射总场减去该结构模式项散射可得到天线模式项散射场。图 3 给出了 $\Delta L = 0$, $\Delta\psi = 0$ 时沿垂直于阵列的方向照射的平面入射波激励的天线结构模式散射场, 同时给出对所有端口短路的情况下分离出来的天线模式反射散射场(天线模式相控散射场合并入天线模式反射散射场)。图 4 给出了天线在均匀激励时的辐射方向图。可以看出天线模式反射散射场与辐射方向图波形一致, 证明了该散射分离方法的正确性。

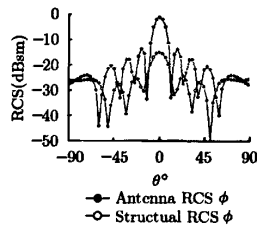


图3 阵列天线结构模式项散射和天线(0度平面照射)

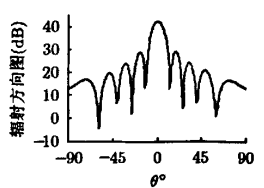


图4 阵列天线辐射方向图

为了观察阵列天线模式项反射散射场的峰值随入射角度变化, 令 $\Delta L = 0$ 即 $\Delta\psi = 0$ (天线模式相控散射场合并入天线模式反射散射场), 采用 45° 斜入射波激励阵列。图 5 给出了分离出来的天线模式反射散射场, 可以看出在 -45° 出现了预期的天线模式反射散射场峰值。

为了观察阵列的天线模式相控散射场, 令 $\Delta L = 0.15\lambda$, 即 $\psi_j = j \times k \times 0.15\lambda$ 。由于延时线具有和天线参考面相同的特性阻抗, $S_{11}^p = 0$, $\Gamma_{\text{const}}^i = 0$, 假设 $t=1$ 并代入式(19), 可以看出此时的天线模式反射散射场为零, 天线模式散射场仅剩天线模式相控散射场。采用垂直于阵列方向的平面波照射, 即 $k^i = 0$, 代入 $\rho_j = j \times 0.5\lambda$, $\psi_j = j \times k \times 0.15\lambda$, 由 $(k - k^i) \cdot \rho_j + (1+t)\psi_j = 0$ 可以得到 k 对应的天线模式相控散射场最大辐射方向应该在 -36.87° 的位置。图 6 给出分离计算得到的天线模式散射, 在 -36.87° 出现的天线模式项散射峰值验证了天线模式相控散射场的存在和前面分析方法的正确性。

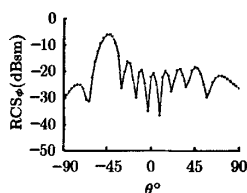


图5 天线模式反射散射场

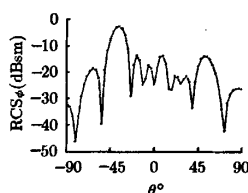


图6 天线模式相控散射场

6 结束语

采用模块化的有源相控阵天线馈电系统分析模型和S参数分析方法能简单而准确地分析天线单元与接收机负载之间的反射系数。采用阵列天线的散射分析方法可全面分析有源相控阵天线的散射场。将有源相控阵天线的天线模式项散射分为天线模式反射散射场和天线模式相控散射场符合有源相控阵天线系统的散射特点。本文采用的一维线阵散射场计算结果验证了天线模式反射散射场和天线模式相控散射场的峰值方向。所提出的有源相控阵散射场的分析理论对于

大型阵列的散射特性的预估具有重要的工程应用价值。

由于阵列天线的天线模式反射散射峰值出现在镜面反射方向, 所以对于可以控制波束的舰载相控阵天线而言, 考虑到探测雷达威胁主要来自于接近海平面的方向, 若采用倾斜安装的方式使入射方向偏离阵面垂线方向, 就可以使位于镜面反射方向的散射峰值避开来波方向从而大大减小阵列天线的单站 RCS。而由于天线的馈电相位不断变化, 如果能够设计质量较高的阵列天线辐射笔形波束, 则天线模式相控散射场随着天线的馈电扫描在空间快速移动可以避免给探测雷达以连续的回波, 从而有效减小阵列天线被探测到的概率。

参考文献

- [1] (美)George W. Stimson 著, 吴汉平等译. 机载雷达导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第1章.
- [2] 张光义. 相控阵雷达技术 [M]. 第2版, 国防工业出版社, 2006: 2-3.
- [3] [美]Robert J. Mailloux 著, 南京电子技术研究所译. 相控阵天线手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 第2章-第5章.
- [4] Amitay N, Galindo V, and Wu C P. Theory and Analysis of Phased Array Antennas. New York, Wiley-Interscience, [M] 1972.
- [5] Parfitt A J and Bird T S. Phased array antenna analysis using time delay beam steering and hybrid FDTD method[J]. *Electronics Letters*, 2006, 31(2): 108-120.
- [6] 刘英. 天线雷达散射截面预估与减缩[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2004.
- [7] 龚书喜. 天线隐身技术基础理论研究[C]. 中日微波会议报告, 西安, 2006: SessionB-1.

张鹏飞: 男, 1979年生, 讲师, 研究方向为电磁散射计算和阵列天线.

龚书喜: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为电磁理论和电磁散射.

刘英: 女, 1977年生, 副教授, 研究方向为天线电磁散射.

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>