

A New Method of Matching the Antenna Array Base on Coupling Impedance

WANG Yongguang, LEI Zhenya, XIE Yongjun*, LIU Xiuxiang, XU Yinfang

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Relying on the introduction of mutual coupling S_{mnqp} (the coupling coefficient between the m n array unit and the qp passive patch unit) between passive patch and array elements, a novel method for antenna array design is proposed. By analysing the relationship of mutual coupling S_{mnqp} and return wave loss S_{mn} ($m = n$), gain, coupling coefficient S_{mn} ($m \neq n$) between array elements, it find out that proper S_{mnqp} will lead to the decrease of S_{mn} ($m = n$). And assuming the gain keeps constant, the S_{mn} ($m \neq n$) should increase according to theory. We can change the S_{mnqp} by changing size of passive patch. If used properly, it can improve the performance of antenna array. Based on this conclusion, a 3×3 rectangular array is designed. According to the analysis of the simulation results, we can see that the proper size of passive patch can reduce the S_{mn} ($m = n$) with the antenna gain reduce.

Key words: parasitic patch array of Passive radiation; Mutual impedance; S parameter; antenna efficiency

EEACC: 5270D doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2010.05.021

一种利用耦合阻抗改善天线阵列匹配的方法

王永光,雷振亚,谢拥军*,刘秀祥,徐银芳

(西安电子科技大学天线与微波国家重点实验室,西安 710071)

摘要:提出一种利用无源辐射贴片寄生阵与阵列单元之间互耦效应 S_{mnqp} (第 m n 个天线单元与第 qp 个无源贴片之间的耦合系数),改善天线阵驻波特性的方法。分析 S_{mnqp} 与天线阵单元之间耦合系数 S_{mn} ($m \neq n$),增益,回波损耗 S_{mn} ($m = n$) 的关系,可以得出适当的 S_{mnqp} 可以降低天线驻波,而根据文献(10)的描述,在天线增益不变的情况下, S_{mn} ($m \neq n$) 应该增大。实际应用中,可以通过修改贴片尺寸改变 S_{mnqp} 。如果合理应用,可以优化天线性能。基于上述理论,设计 3×3 矩阵并对 HFSS 仿真结果进行分析,得出 S_{mnqp} 对天线回波损耗,增益,等各种性能的影响。

关键词:无源辐射贴片寄生阵;互耦阻抗;S参数;天线效率

中图分类号:TN821

文献标识码:A

文章编号:1005-9490(2010)05-0608-05

设计天线阵,都会不可避免的碰上天线互耦效应的影响。互耦效应即是一天线单元辐射的能量被其他天线单元吸收,二次辐射。从而造成天线阵的阵单元阻抗特性与自由空间不同,且随天线阵扫角度变化而变化,难以实现阻抗匹配网络设计。由于天线辐射能量的相互吸收再辐射,使天线阵的辐射方向图发生畸变,严重的将会产生扫描盲点并使极化天线阵的极化特性变坏^[1-4]。因而传统设计天线阵时,一般考虑如何去除耦合,如何在馈源处实现相位幅度加权从而消除耦合对天线阵的影响。例如增大天线单元间距减小耦合,改变阵单元形状,设计 $L-C$ 匹配网络等方法。去耦合的方法取得了很大的

成就,并为大多数人所接受。但是耦合作为一种物理现象,是不会完全消除的。因而转换思考角度利用耦合来设计天线阵是有必要的。

在利用耦合设计天线阵方面,已经有一部分学者提出了相应的理论,并给出了切实可行的解决方法。如利用介质板覆盖加强阵单元之间的耦合,通过在阵天线上加载与阵单元具有相同辐射场的无源辐射阵^[5]等技术均有效的解决了一部分阵列天线的设计问题。

在阵列天线上加载二次无源辐射片,将天线阵列与无源辐射贴片均看为 N 端口网络,无源辐射片作为无输入端口考虑^[6-7]。保持天线增益不变,考虑各个

阵列单元之间的相互耦合,进而探讨出无源辐射贴片加入对天线驻波特性,天线阵辐射方向图等方面的影响。HFSS 仿真结果最终表明:无源辐射贴片的加入,起到了二次辐射及其耦合的作用,适当调整贴片的大小及其与阵单元的间距,可以有效的降低阵天线驻波特性,天线谐振点会发生偏移,辐射方向图变化则取决于贴片的大小,并会对阵单元之间的耦合系数产生影响。 3×3 矩形贴片阵列天线设计也可以为实现大型阵列天线提供一些参考经验帮助。

1 理论分析

分析互耦的方法可以分为两种,(1)基于等效电路或者网络概念的阻抗法,就是电压,电流和阻抗之间的关系。可以从中推导出阻抗 Z 矩阵。(2)基于波概念的散射法,也就是入射波反射波(或散射波)之间的关系。可以从中推导出与耦合系数有关的 S 矩阵。这两种方法均可获得耦合对阵元阻抗,波瓣的影响。

首先由简单的2单元天线讨论出二次辐射贴片对阵天线的各种特性的理论影响,再由具体天线阵验证其正否,并对理论做出补充。见图1。

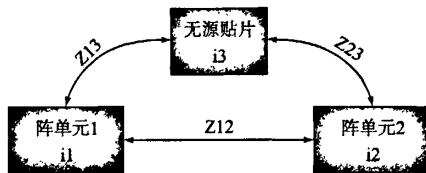


图 1

其中阵单元1,2 为有源激励,二次辐射片为无源激励。两阵单元在无源片上激励电流,由于空间相位的关系,阵单元1,2 与无源激励片的互阻抗取值相反^[9]。

无源贴片由于无功率输入,电压值为0。

1.1 阻抗矩阵推导结论

由阻抗矩阵方法可以得到:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & -Z_{23} \\ Z_{31} & -Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

利用 V_3 为0将电流 I_3 用阻抗表示并代入矩阵(1),从而将三维矩阵化为二维矩阵。即将二次无源辐射贴片的影响等效在阵单元的自阻抗互阻抗变化中。采用单元互易天线,则等效阻抗矩阵可以推导得到:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} + \frac{Z_{13}^2}{Z_{33}} & Z_{12} - \frac{Z_{13}^2}{Z_{33}} \\ Z_{12} - \frac{Z_{13}^2}{Z_{33}} & Z_{11} + \frac{Z_{13}^2}{Z_{33}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

可见二次辐射贴片对阵单元的自阻抗及其互阻抗均存在影响。

天线的等效自阻抗与互阻抗分别有了 $\frac{Z_{13}^2}{Z_{33}}$ 的变化。如天线不互易,则变化量需重新计算。

由于阻抗互易, $Z_{12} = Z_{21} = Z_a$, $Z_{13} = Z_{31} = Z_b$, $Z_{32} = Z_{23} = -Z_b$,其中 Z_{33} 为无源贴片自阻抗 $Z_{11} = Z_{22} = Z_c$ 为阵单元自阻抗。

天线反射系数:

$$\Gamma = \frac{Z_L}{Z_{oi}} = \frac{Z_s + \frac{Z_b^2}{Z_{33}} + \left(Z_a - \frac{Z_b^2}{Z_{33}} \right) \left(\frac{I_2}{I_1} \right)}{Z_{oi}} \quad (3)$$

其中 Z_{oi} 为馈电端口的特性阻抗。 Z_L 为阵单元辐射阻抗,

$$Z_L = \frac{V_1}{I_1} = Z_s + \left(Z_a - \frac{Z_b^2}{Z_{33}} \right) \left(\frac{I_2}{I_1} \right) + \frac{Z_b^2}{Z_{33}} \quad (4)$$

对于反射系数其中可以明显的将其分为前后两部分。

自阻抗与特性阻抗比值

$$\frac{Z_s + \frac{Z_b^2}{Z_{33}}}{Z_{oi}} \quad (5)$$

耦合阻抗与特性阻抗的比值。

$$\frac{\left(Z_a - \frac{Z_b^2}{Z_{33}} \right) \left(\frac{I_2}{I_1} \right)}{Z_{oi}} \quad (6)$$

1.2 散射矩阵推导结论

无源贴片无激励,入射波幅值应为 $a_3 = 0$ 。利用恒定入射波 a ,得出 S 矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

消去 a_3 推导下去

$$\begin{cases} b_1 = s_{11} \times a_1 + s_{12} \times a_2 \\ b_2 = s_{21} \times a_1 + s_{22} \times a_2 \\ b_3 = s_{31} \times a_1 + s_{32} \times a_2 \end{cases} \quad (8)$$

如此推导可以看出 b_1, b_2 并不受二次辐射源的影响。这与利用矩阵法推导出的结论相矛盾,为验证两种方法的正否,假设阻抗矩阵得出的结论正确,对上述公式代入简单加权系数等效其二次辐射单元的影响。

$$\begin{cases} b_1 = A \times s_{11} \times a_1 + B \times s_{12} \times a_2 \\ b_2 = C \times s_{21} \times a_1 + D \times s_{22} \times a_2 \end{cases} \quad (9)$$

则阵单元1 的反射系数为

$$\Gamma_{11} = \frac{b_1}{a_1} = A \times s_{11} + B \times s_{12} \frac{a_2}{a_1} \quad (10)$$

$$A \times s_{11} \quad (11)$$

为加入二次辐射贴片后的等效自反射系数。

与耦合有关的等效耦合系数

$$B \times s_{12} \frac{a_2}{a_1} \quad (12)$$

1.3 联立阻抗与散射结论

由两种不同方法得出的自反射系数(5), (11)相对应。

$$A \times S_{11} = \frac{Z_s + \frac{Z_b^2}{Z_{33}}}{Z_{oi}} \quad (13)$$

结合 S_{11} 基本定义 $S_{11} = \frac{Z_s}{Z_{oi}}$ 可以看出:

$$A = \left(\frac{Z_b^2}{Z_{33} Z_s} + 1 \right) \quad (14)$$

可以看出假设可以使 $A < 1$, 则可以降低天线阵单元的等效自反射系数 $A \times S_{11}$ 。

对于 N 端口网络, 传入系统的功率应为 $\sum_{i=1}^N |a_i|^2$, 由系统反射的功率则为 $\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} |b_i|^2$ 。由于天线为有耗网络, 其向自由空间辐射的能量 P 即为这两种功率的差值^[10-11]。

$$P = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (|a_i|^2 - |b_i|^2) \quad (15)$$

用矩阵形式表示

$$\mathbf{p} = [\mathbf{a}]^t [\mathbf{a}]^* - [\mathbf{b}]^t [\mathbf{b}]^* \quad (16)$$

由于 $\mathbf{b} = \mathbf{S}$

$$\mathbf{p} = [\mathbf{a}]^t \{[\mathbf{U}] - [\mathbf{S}]^t [\mathbf{S}]^* [\mathbf{a}]^*\} \quad (17)$$

其中 $[\mathbf{U}]$ 为单位矩阵。

保持天线增益不变的情况下, 即 P 为常数。由于 a 恒定, $[\mathbf{U}] - [\mathbf{S}]^t [\mathbf{S}]^*$ 应为一常数, 则 $\sum_{i=1}^N |S_{ii}|^2, \sum_{i=1}^N |S_{12}|^2 \dots \sum_{i=1}^N |S_{NN}|^2$ 均为定值。应此可以得知, 在保持天线增益不变的情况下, 阵单元之间的互耦系数 S_{mn} ($m \neq n$) 与其自反射系数 S_{mm} ($m = n$) 成反比。则联系 A 系数对等效自反射系数的影响可以得到一下结论:

结论 1 当调整贴片尺寸大小改变 S_{mn} 使 $A < 1$ 时, 阵单元相互等效阻抗 $Z_{12} - \frac{Z_{13}^2}{Z_{33}}$ 会变大。即其等效耦合系数 S_{mn} ($m \neq n$) 会增强。

结论 2 若调整 $A < 1$ 则在增益不变的情况下, $S_{mn} D$ ($m \neq n$) 增强, 可以降低阵列天线的回波损耗波 $S_{mn} D$ ($m = n$)。

2 二次无源辐射片对增益理论影响

关于阵列天线的增益已经有十分成熟的理论公

式。天线阵总增益为:

$$G = N \times K \cos \theta \times \eta \quad (18)$$

其中 $K \cos \theta$ 为单元的波瓣函数。 η 为其单元效率。

当阵单元输入功率为 1 计算时

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi |R(\psi_x, \psi_y)|^2 d\psi_x d\psi_y, \quad (19)$$

其中 R 为其反射系数。反射功率等于反射系数的平方, 而且可以表示为反射系数与其共轭的乘积。天线结构对称馈电的情况下,

$$\frac{1}{\pi^2} \int_0^\pi \int_0^\pi |R(\psi_x, \psi_y)|^2 d\psi_x d\psi_y = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} |C_{pq}|^2 \quad (20)$$

上式左边表示的是所有的单元都辐射时(每个单元的辐射功率为 1), 反射至一个单元的功率对相位的积分。右边表示的是只有一个单元辐射时耦合到其他单元的功率之和。利用这个等式可以把耦合能量(即损耗能量)的计算归到积分计算。当在阵列天线中添加无源辐射片时, C_{pq} 则应把无源片的耦合系数也考虑进去。公式右边应表示为:

$$\sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} |C_{pq}|^2 + \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} |D_{pq}|^2 \quad (21)$$

其中 D_{pq} 为无源与阵单元之间的耦合系数。因此此引入耦合系数 S_{mn} 会导致公式右边值的增大, 从而最终导致 η 的减少。

结论 3 二次无源辐射片的引入可能会导致增益的降低。

3 应用实例

为了验证上述结论, 设计一 3×3 的矩形单元阵^[12-14], 为了二次无源辐射单元大小调整时不会受到阵单元间距的影响, 在阵单元的表面上覆盖了一层介质^[9]。介质上刻画二次辐射片(图 2), (为消除覆盖介质影响, 原比较阵列天线上面也覆盖一层同样介质, 但并不加二次辐射片) 观察各种影响得出结论。

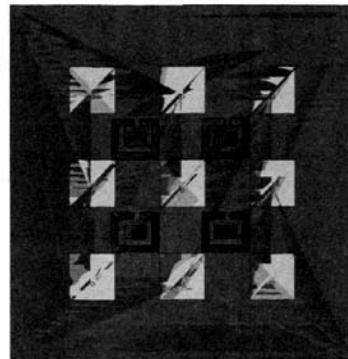


图 2

阵单元采用 $10.5 \text{ mm} \times 10.5 \text{ mm}$ 矩形贴片, 单元间距 9 mm 小于 0.5λ 。二次辐射贴片采用谐振环, 内加矩形贴片置于阵单元中间。通过改变二次辐射片的大小调整其与阵单元的互阻抗。采用 HFSS 软件进行仿真。

图 3, 图 4, 图 5 分别给出了谐振环边长 $8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, $10 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$, $10 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 变化时的回波损耗 S_{mn} ($m=n$), 耦合系数 S_{mn} ($m \neq n$), 及其和差增益的变化。可见 S_{mn} ($m=n$) 的变化并不是一直降低, 这可以看为由于互阻抗变化对加权系数 A 的影响并不全是小于 1, 当贴片边长 $10 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 时回波损耗降低。而当贴片边长过大或过小时, 回波损耗反而增大。互耦合系数增大。并在 S_{mn} ($m=n$) 降低处增大, 可见其与其成反比。天线增益在贴片尺寸 $8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, $10 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 时, 增益变化不大。但副瓣增高。而在边长为 $10 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 时, 由于互耦系数的明显增大, 会导致阵单元电流分布产生变化, 从而导致增益降低, 方向图一定程度的畸变, 差方向图零点变浅。

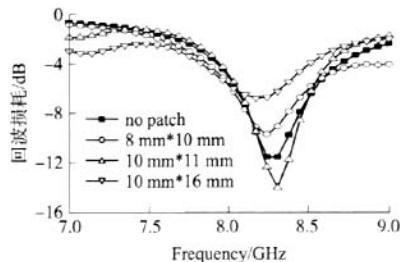


图 3 回波损耗

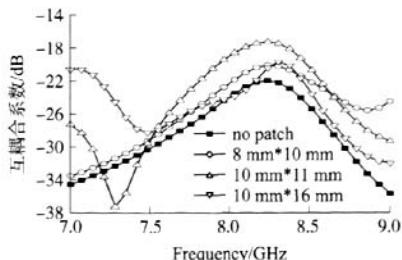


图 4 耦合系数

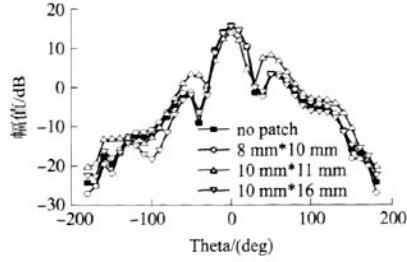


图 5 和增益(dB)

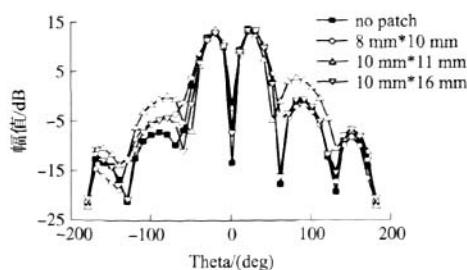


图 6 差增益

以上分析可以看出对贴片尺寸的大小进行适当调整, 改变无源贴片与阵单元之间的耦合系数的大小, 确实可以优化天线性能。

4 结论

阵列天线之间由于互耦的存在, 使其性能变化。但互耦作为一种无法消除的物理现象, 不可能完全消除。在阵列天线中加入无源二次辐射阵, 通过分析无源贴片与阵单元的互耦效应对其天线阵的影响, 可以看出在无源贴片取适当大小时, 可以有效的降低天线的回波损耗, 并对增益影响较小。但当贴片天线尺寸过大时也会使增益降低。因此在实际设计天线阵时, 如何考虑阵单元间距与贴片尺寸的大小取值, 使回波损耗与增益都合理取值, 是需要不断探索研究的。

参考文献:

- [1] 郭燕昌, 钱继曾, 黄富雄, 等. 相控阵和频率扫描天线原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1978: 20~28.
- [2] 束咸荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1978: 185~199.
- [3] 汪茂光, 吕善伟, 刘瑞祥. 阵列天线分析与综合 [M]. 西安: 电子科技大学出版社, 1989: 186~191.
- [4] Stark L I. Microwave Theory of Phased-Array Antennas A review [J]. Proc IEEE, 1974, 62(4): 16~661~1701.
- [5] Munk B A, Kornband T W, Fulton R D. Scan Independent Phased Arrays [J]. Radio Sci, 1979, 14(4): 979~990.
- [6] Ng K T, Munk B A. Scan-Independent Slot Arrays with Parasitic Wire Arrays in a Stratified Medium [J]. IEEE TRANS, 1988, 36(4): 483~495.
- [7] Masa-Campos J L, Fernandez J M, Sierra-Castaner M, et al. Characterization and Compensation Model for Antenna Arrays [J]. Microwaves and Optoelectronics, 2005, 4(2): 95110.
- [8] Lee Kuan Min, Chu Rusey-Shi. Analysis of Mutual Coupling Between a Finite Phased Array of Dipoles and Its Feed Net-Work [J]. IEEE Trans Antenna Propagation, 1988, 36(12): 1681~1698.
- [9] Solbach K, Famdie C T. Mutual Coupling and Chassis-Mode Coupling in Small Phased Array on a Small Ground Plane [C]// EuCAP2007, November 2007, Edinburgh, UK.

- [10] Zhu Y Z, Y J Xie, Z Y Lie, et al. A novel Method of Mutual Coupling Matching for Array Antenna Design [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2007, 21 (8): 1013 – 1014.
- [11] Durran S, M E Bialkowski. Effect of Mutual Coupling on the Interference Rejection Capabilities of Linear and Circular Arrays in Cdma Systems [J]. IEEE Trans Antenna Propagation, 2004, 52(4): 1130 – 1134.



王永光(1984 –)男,西安电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为电磁场微波技术,lanyu841021@126.com;



雷振亚(1960 –)男,西安电子科技大学电子工程学院教授,硕士研究生导师. 主要研究方向为微波无源电路与微波有源电路、微波天线及微波系统等;



谢拥军(1968 –)男,教授,博士生导师,研究方向为计算微波与计算电磁学、微波通信、电磁兼容及电波传播特性等。

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>