

文章编号 1005-0388(2005)04-0413-05

矩形微带天线对电磁干扰接收特性的研究*

周怀安 杜正伟 龚 克

(清华大学 微波与数字通信技术国家重点实验室 zhouha@stu.ee.tsinghua.edu.cn 北京 100084)

摘要 针对微带天线在复杂电磁环境中受干扰程度的评估问题,运用腔模理论计算微带天线的辐射特性,再利用互易定理得到了接收特性。在此基础之上,引入耦合长度随来波方向的分布概率,进而提出了超过一定概率的耦合长度 L_{th} 来评估微带天线在宽频谱内的受扰特性。以一种普通矩形微带天线结构为例进行了定量分析,分析表明,矩形微带天线在较高的谐振接收频带虽然具有较大的最大耦合长度,但 L_{th} 却较小,而低接收频带则容易得到较大的 L_{th} ,最大的 L_{th} 出现在最低阶谐振频率处。

关键词 电磁干扰, 宽频谱, 天线方向性, 受扰概率

中图分类号 TN82, TN97 文献标识码 A

Study on receive characteristic of a rectangular microstrip antenna interfered by electromagnetic waves

HUAI-an Zhou, Zheng-wei Du Ke GONG

(State Key Labon Microwave and Digital Communications,
zhouha@stu.ee.tsinghua.edu.cn, Beijing 100084, China)

Abstract To evaluate the degree that a microstrip antenna would be interfered in a complicated electromagnetic circumstance, the radiation characteristic using the cavity theory is presented and then the receive characteristic according to the reciprocal theorem is obtained. Based on the analysis, the probability distribution of the coupling length with the direction of the incident wave is used to describe the characteristic of being interfered. To make the evaluation easy to perform in wide frequency range, the coupling length L_{th} that can be obtained in a certain probability is also proposed. A rectangular microstrip antenna with a normal structure is analyzed as an example in this paper. The results show that the L_{th} is relative small in high frequency bands while relative large in lower frequency bands. The max L_{th} occurs at the first resonate frequency.

Key words electromagnetic interference, wide frequency range, direction characteristic, probability of interference.

1 引言

随着无线电技术应用的日益广泛,空间电磁环境的日益复杂,电子设备的电磁兼容问题也变得日益突出。对于各种无线设备来说,天线是干扰耦合进入电子设备的一个重要途径^{[1][2]}。微带天线由于简小易集成的优点得到越来越广泛的应用,因此,对外来电磁波

与微带天线的耦合特性进行研究具有重要的理论意义与实用价值。

干扰电磁波的强度、频率以及方向都是不可预测的,要想了解天线的受扰特性,就需要在考虑以上各个因素的基础上建立起一套方法来进行评估分析。微带天线由于其结构的特点而具有多个谐振模式,从而在很宽的频谱内会有多个谐振频带存在,也就是有多个

较强的接收频带存在,而各个频率上都可能有较强的干扰电磁波通过天线而进入电子设备内部,从而有可能影响电子设备的正常工作,因而对其接收特性研究应该在宽频谱内进行,而不像一般天线设计那样局限于“工作频带”及其邻频范围。尤其是在某些电子对抗的场合,来自带外的强大干扰即使被普通滤波器所衰减,仍可影响电子系统的正常工作。同时,由于干扰来源可能是各个方向的,而微带天线在不同频率下各个方向的接收特性又是不同的,因此,需要综合考虑频率与来波方向。

关于微带天线对电磁干扰的接收特性文献^[3]已进行了解析研究,但其研究的是低于工作频带的较低频率的电磁干扰,而且关于外来电磁波入射方向变化对于接收特性的影响只能给出非常简单的描述,不能满足对微带天线受扰特性进行较为全面评估的需求。

为了得到形式简单而且便于分析的解析结果,在研究微带天线对空间电磁波的耦合特性时,从微带天线的辐射场入手,利用成熟的解析分析方法求得其远区辐射场,再利用天线的互易定理来得出微带天线的接收场。微带天线的辐射特性有不少较为成熟的方法^[4~9],但考虑到多模腔模理论^[10]不仅能够较为准确地计算矩形微带天线的各个模式,同时又具有较为简单的解析形式,能够很好地满足对微带天线宽频域辐射特性计算分析的要求,因此,采用腔模理论对微带天线的辐射场进行计算。

2 微带天线的辐射性能

为了具有普遍性,选用了一般的中心同轴馈电矩形微带贴片天线进行分析,如图1所示,长a,宽b,介质厚h,介质相对介电常数为 ϵ_r ,地板和介质都假设为无限大。在后面的计算中,选择a=38.15mm,b=31.4mm,h=1.57mm, $\epsilon_r=2.34$,馈电点位置在(19,15.7)处,同轴馈电端口输入阻抗等于同轴线特性阻抗50Ω。

如果把微带天线看作一个有损谐振腔的话,那么损耗中包括辐射损耗、导体损耗、介质损耗、表面波损耗,其中辐射损耗功率就是其辐射功率,可以如下式求得其品质因数^[9]

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (1)$$

式中 Q_r 、 Q_c 、 Q_d 、 Q_{sw} 分别为计入辐射损耗、导体损耗、介质损耗和表面波损耗的相应品质因数,品质因数与损耗功率成反比,因此可以用 Q/Q_r 来表示辐射损耗

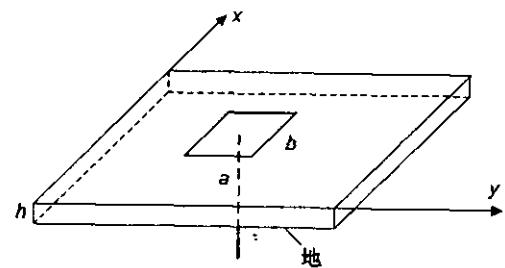


图1 矩形微带天线示意图

在总损耗中所占的比例,这也就是辐射效率。

为了一般性地评价一个天线的受扰特性,相应的也就是评价它的辐射能力,需要知道在同样端口输入功率下辐射功率的大小。在宽频谱内,由于天线的端口输入阻抗变化很大,需要考虑天线的宽频谱反射系数,从而能够得到在一定端口输入功率下天线的总消耗功率。另外还需要考虑辐射功率在天线总消耗功率中所占的比例(即通常所称之辐射效率),综合考虑辐射效率和失配反射,将两者结合起来,这里用天线总效率 n_A 来表征天线的辐射能力,它表示天线的辐射功率和端口输入功率之比。

$$\eta_A = (1 - \Gamma^2) \frac{Q}{Q_r} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \Gamma = \frac{Z_{in} - Z_c}{Z_{in} + Z_c} \quad (3)$$

$$Z_{in} = jk_0 \eta_0 h \sum_{m,n} \frac{\psi_{mn}^2(x_0, y_0)}{k_{mn}^2 - k_{eff}^2} \frac{\sin^2(m\pi d_0/2a)}{(m\pi d_0/2a)^2} \quad (4)$$

$$k_{eff} = k_0 \sqrt{\epsilon_r (1 - j\tan \frac{1}{Q})} \quad (5)$$

$$\psi_{mn} = \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \quad k_{mn} = \sqrt{(\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2} \quad (6)$$

式中 Γ 为端口的反射系数, Z_{in} 为端口的输入阻抗, Z_c 为端口特性阻抗, $\eta_0 = 120\pi$ 为真空中的波阻抗, d_0 为馈源电流等效宽度, $m, n = 0, 1, 2, \dots$ 。式(4)是由腔体模型得到的^[12],可以看到,由于馈电点在矩形贴片中心, ψ_{mn} 只有在 m, n 为0或偶数的情况下才不为零,也就是说只有偶次模式可以辐射。

通过天线总效率,就可以较好地描述出一个微带天线在宽频谱内的辐射能力,图2所示的就是此微带天线在宽频域内的天线总效率分布图。可以看出,由于多个谐振模式的存在,该微带天线在10GHz内存在多个很强的辐射频带,相应的,也就是存在多个很强的接收频带。

3 微带天线的接收特性

微带天线的辐射功率在各个方向上的分布是不均匀的,而且随着频率的变化,微带天线的方向图也在变化。要描述微带天线的宽频谱辐射特性,对其方向性在整个频谱中的变化的描述也是不可缺少的。利用多模空腔模型,将微带贴片与接地板之间的空间看成是四周为磁壁、上下为电壁的谐振空腔,由空腔四周的等效磁流可得出天线的远区辐射场^[11~13] $E_\theta(\theta, \phi), E_\phi(\theta, \phi)$ 。

下面计算微带天线的接收特性,微带天线的接收功率

$$P_r = S_{in} A(\theta, \phi) \eta_A \quad (7)$$

式中 S_{in} 为入射电磁波的能量密度,可以表示为 $\frac{E_0^2}{2\eta_0}$, 引

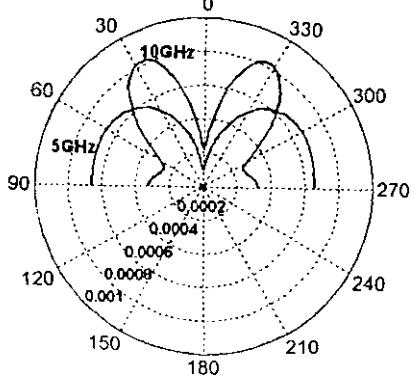
入等效耦合长度 L_{eff} , P_r 可以表示为 $\frac{(E_0 L_{eff})^2}{2Z_{in}}$, Z_{in} 为端口的输入阻抗, E_0 为入射电磁场强度,由互易定理可以得到 $A(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} D(\theta, \phi)$ 为有效接收截面,而方向

系数 $D(\theta, \phi)$ 可以表示为 $\frac{(E_\theta^2 + E_\phi^2)}{2\eta_0 P_o}$, 其中 P_o 为微带天线辐射总功率。综合以上可以得到等效耦合长度表达式为

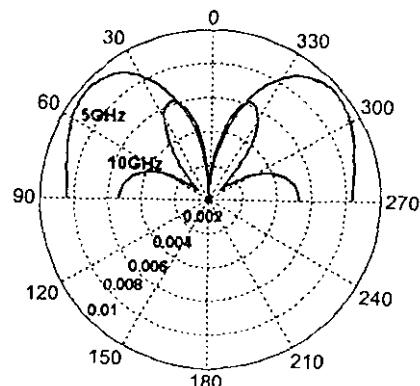
$$L_{eff}(\theta, \phi) = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{D(\theta, \phi) \eta_A Z_{in}}{30}} \quad (8)$$

鉴于讨论的天线效率是包含了“工作频带”之外的一定频带范围内接收干扰信号的效率,所以(8)式定义的 L_{eff} 与在默认工作频带内阻抗匹配条件下一般天线接收理论使用的效果有所区别。

作为举例,利用(8)式计算得到的外来电磁波频率分别为 5GHz 和 10GHz 时等效耦合长度随来波方向的分布如图2所示,这里只考虑了上半空间的



(a) E 面入射



(b) H 面入射

图 2 等效耦合长度随外来电磁波入射方向的分布

分布,其中假设了收发极化匹配的最劣情况。可以看到,在不同频率下其分布的差别是相当大的,即使在同样天线总效率的情况下,在外来电磁波以不同方向入射时可能得到的等效耦合长度差异也很大。因此,在对微带天线的接收特性进行评估时,需要综合考虑宽频域内方向性变化的影响。

4 对微带天线受扰特性的评估

对于研究外来源电磁波对天线的干扰,一般来说天线所能受到的最大干扰是首先受关注的,根据它可以看出来天线后面的电子系统遭到干扰破坏的最劣情况,这里用最大等效耦合长度 L_{em} 来描述微带天线的受干扰特性,通过它可以得到一定强度干扰电磁波入射时能够通过微带天线的最大干扰,对于具有一定干扰门限的系统来说就可以据此来判断确保正常工作所能承受的最大干扰电磁波。图3所示的就是该微带天线在宽频域内的最大等效耦合长度分布,可以看出,在各个天线总效率高的频点都会有较大的 L_{em} , 其中在 5GHz 即最低阶辐射模 TM_{20} 模附近

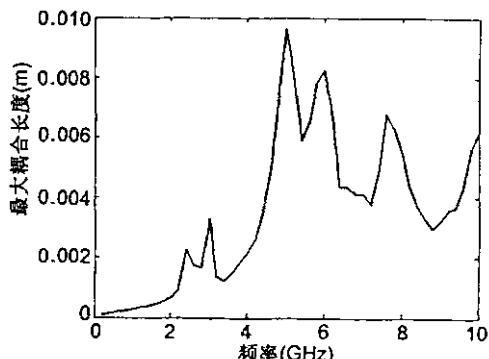


图 3 最大等效耦合长度在宽频域内的分布

近会出现最强的耦合强度。

干扰电波进入天线的方向是任意的,一般来说恰好沿着最大等效耦合长度的方向入射从而造成最大干扰的概率未必很大,如果只是用最大等效耦合长度这个最劣情况来评估天线的受扰特性则很有可能会在一定程度上造成误估,因此,考虑到很多情况下研究具有较高概率得到的干扰会更有意义,建议利用耦合长度的分布概率 $p(L_{eff})$ 来更好地评估天线的受扰特性。

$$p(L_{eff}) = \iint_{\theta, \phi} \alpha(\theta, \phi, L_{eff}) \omega(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (9)$$

式中

$$\alpha(\theta, \phi, L_{eff}) = \begin{cases} 1 & (\theta, \phi) \text{ 方向的耦合长度大于 } L_{eff} \\ 0 & (\theta, \phi) \text{ 方向的耦合长度小于 } L_{eff} \end{cases}$$

$\omega(\theta, \phi)$ 为干扰电波从 (θ, ϕ) 方向入射的概率,实际计算时这个积分是以离散的方式得到的。 $p(L_{eff})$ 能够较好地描述出天线在一定频率下得到的电磁干扰超过各干扰值的概率,从而有助于对整个接收系统在不同频率下受扰概率的评估。

图4所示的分别为1GHz、5GHz和10GHz频率的外来电磁波入射时得到的概率分布,其中假设来波方向为等概率分布的,为了便于比较,横坐标用最大耦合长度做了归一化,可见,随着频率的升高,微带天线工作于更高阶模式,而得到较强干扰的概率也越来越小,也就是说,在总接收强度相同的情况下,该微带天线在高频电磁波作用下受到较强干扰的概率较小。

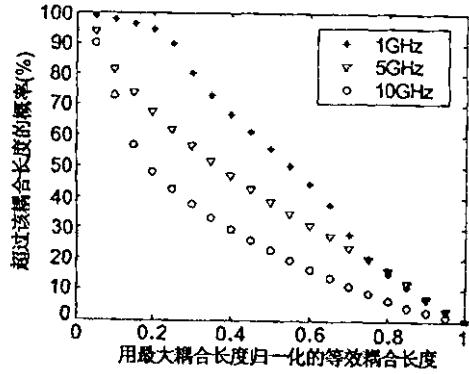


图4 耦合长度的分布概率

用耦合长度分布概率虽然能够较好地描述微带天线在各频点上的受扰特性,但如果需要对宽频域内每个频点都进行描述则不够方便直观。因此,为了更方便地描述微带天线在宽频域内的受扰特性,进一步建议用耦合长度 L_{th} 来进行评估,它表示微带天线在外来电磁波从不同方向入射时的耦合长度超过 L_{th} 的概率

为 P_{th} ,该值可以用分布概率的反函数 $p^{-1}(P_{th})$ 来得到。概率门限 P_{th} 可以根据实际需要来选取,这里采用 50% 来进行分析,用查表法利用 $p(L_{eff})$ 得到 L_{th} 。 L_{th} 较大,就说明在同样强度的外来电磁波入射的情况下,微带天线得到较大耦合长度的概率较高,以 $P_{th}=50\%$ 为例,如果在微带天线具有 L_{th} 为 1×10^{-3} m 的情况下,强度为 E_0 的外来电磁波会有 50% 以上的概率达到干扰阈值而使电子设备受到干扰,那么如果某频率下 L_{th} 为 2×10^{-3} m,在这一频率下外来电磁波只需要强度为 $E_0/2$ 就同样可以有 50% 以上的概率达到干扰阈值,也就是说 L_{th} 越大则该微带天线更容易受扰。文中矩形微带天线的 L_{th} 值在宽频域内的分布如图5所示,与图3的最大等效耦合长度分布进行比较,可以看出,最大的 L_{th} 出现在最低阶谐振辐射频率的 5GHz 附近 8GHz 和 10GHz 附近虽然有较高的 L_{em} ,但由于在方向上分布的特点,受到较强干扰的概率并不高,而 3GHz 附近虽然最大耦合长度不大,由于在方向上分布比较均匀,却较为容易受到干扰。可见如果仅用最大耦合长度确实有可能使微带天线的受扰特性得到不太合理的评估,只有综合考虑微带天线在宽频域内的辐射特性和方向特性才能更好地描述其受扰特性。 L_{th} 参数的提出可以很好地满足这个需求。

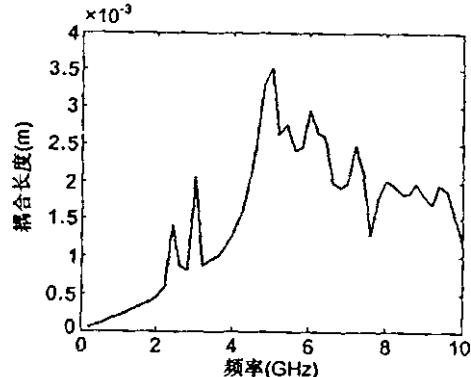


图5 L_{th} 在宽频域内的分布 ($P_{th}=50\%$)

5 结论

利用腔体模型和互易定理解析地得到了微带天线的接收特性,在此基础上,为了评估微带天线在宽频域内的受扰特性,利用天线总效率来对微带天线宽频域内的接收性能进行描述,用最大等效耦合长度对可能受到的最大干扰进行描述,考虑到来波方向的不确定性,用耦合长度随来波方向的分布概率对微带天线的受扰特性进行了更好的描述,为了更方便地在宽频域内进行可量化评估,还提出了超过一定概率的耦合长

度 L_{th} , 该值能够更好地对微带天线的受扰特性进行简单直观的评估。从分析比较中可以看到, 矩形微带天线在较高的接收频带虽然具有较大的最大耦合长度, 但 L_{th} 却比较小, 而低接收频带则较为容易得到较大的 L_{th} , 因此, 仅用最大干扰确实有可能对微带天线的受扰特性带来不合理评估。在进行以上评估时, 假设的都是外来的电磁波在各方向上等概率入射的情况, 具体应用中应该根据实际情况采用合适的来波方向概率分布。需要说明的是, 提出的这套评估分析方法并不仅限于矩形微带天线, 对于其它类型的天线也可以适用。

参考文献

- [1] Gupta H K, Jha K K, Arora C L. EMI/EMC Considerations in Antenna Design and Usage for a Communication System [C]. International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 1995. 489~492.
- [2] Singh K. Model Based Estimation of Spectral Components of EMI from Antenna, Transmitter and Susceptibility of Receiver [C]. International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 1999. 97~100.
- [3] Jean-Paul Seaux et al.. Transient analysis of a space-born microstrip patch antenna illuminated by an electromagnetic pulse [J]. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 1991, 33(3):224~233.
- [4] 陈雅娟, 龙云亮. 宽带微带贴片天线的研究进展 [J]. 电波科学学报, 1999, 14(3):357~361.
Y J Chen, Y L Long. The development of the wideband microstrip antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(3):357~361.
- [5] 许峰, 洪伟, 冯祖伟. 同轴馈电耦合微带贴片天线的时域有限差分法分析 [J]. 电波科学学报, 2001, 16(1): 34~38.
F Xu, W Hong, Z W Feng. The analysis of a coaxial probe-fed coupled patch antenna using the FDTD method [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(1): 34~38.
- [6] 龙毅, 方大纲, 等. 微带印刷天线辐射与散射的全波分析方法 [J]. 电波科学学报, 1995, 10(12):91~96.
- [7] 余春, 钟顺时, 朱德钊. 改进的计算贴片天线谐振频率的变分方法 [J]. 电波科学学报, 1995, 10(12):97~101.
C Yu, S S Zhong, D Z Zhu. A modified variational method for the computation of resonant frequency of patch antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1995, 10(12):97~101.
- [8] P Perlmutter et al.. Electric surface current model for the analysis of microstrip antennas with application to rectangular elements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, 33(3):301~311.
- [9] L Vigni et al.. Spectral dyadic Green's function formulation for planar integrated structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(8):1057~1065.
- [10] Y T Lo, D Solomon and W F Richards. Theory and experiment on microstrip antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, 27(2):137~145.
- [11] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [12] W F Richards, Y T Lo and D D Harrison. An improved theory for microstrip antennas and applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(1): 38~46.
- [13] I J Bahl and P Bhartia. Microstrip antennas [M]. Artech House, 1980.



周怀安 (1977-) ,男, 河北人, 现在清华大学电子工程系电磁场与微波技术专业攻读博士学位, 主要从事计算电磁学和电磁兼容方面的研究。



杜正伟 (1971-) ,男, 四川人, 博士后, 清华大学电子工程系副教授, 对超宽带/短脉冲电磁学、电波传播、微波传输线等感兴趣。Email: zwdu@mail.tsinghua.edu.cn。

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>