

文章编号: 1001-4322(2013)06-1504-05

时间延迟对偶极子光导天线空间功率合成影响分析^{*}

邓 琥¹, 尚丽平^{1,2}, 张 阳¹, 夏祖学¹

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 极端条件物质特性实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 对偶极子光导天线空间功率合成中时间延迟的影响进行了分析。利用太赫兹时域光谱技术分别获取了 34, 500, 1000 μm 偶极子光导天线的太赫兹时域光谱。采用数值模拟方法分析时间延迟对空间功率合成的影响。结果发现: 在满足空间功率合成相干度 60% 的条件下, 两个 34, 500, 1000 μm 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟分别为 350.7, 467.6, 450.9 fs; 三个 34, 500, 1000 μm 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟分别为 191.1, 250.5, 267.2 fs; 四个 34, 500, 1000 μm 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟分别为 167, 200.4, 217.1 fs。试验结果表明, 空间功率合成数值模拟仿真能为偶极子光导天线阵列的物理实验提供重要依据。

关键词: 时间延迟; 空间功率合成; 偶极子光导天线; 太赫兹

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20132506.1504

太赫兹波通常是指频率在 0.1~10.0 THz 范围内的电磁辐射^[1], 它的独特性能使其在生物医学^[2]、通信^[3-5]等领域有重要的应用前景。一般情况下, 太赫兹技术应用于这些领域要求太赫兹源具有高功率、超宽带等特性。太赫兹技术能否转化为现实生产力的重要环节就是如何产生大功率、高效率的太赫兹辐射源。到目前为止, 虽然依然缺少高功率、高效率的太赫兹辐射源, 但仍有不少的辐射源可能成为其潜在的候选者。科研人员经研究发现, 在同时满足高功率、超宽带条件下采用光导天线产生太赫兹辐射比其他方式得到的太赫兹波能量更高, 但难以满足高功率的要求^[6]。从光导天线产生太赫兹辐射机理的分析可知, 仅依靠光导天线结构的优化设计, 难以提升单个太赫兹光导天线的辐射输出。同时, 单个器件功率容量有限, 使得系统很难达到高功率要求。因此, 考虑到单个光导天线的功率辐射难以同时满足“超宽谱”和“高功率”要求, 需要进行超宽谱光导天线阵列空间功率合成来产生高功率超宽带的太赫兹辐射源。本文主要采用数值模拟方法仿真实际中飞秒激光不同时刻到达光导天线阵列时各光导天线太赫兹时域光谱空间功率合成^[7-10], 分析时间延迟对偶极子光导天线(孔径分别为 34, 500, 1000 μm)空间功率合成的影响。

1 超宽谱光导天线阵列空间功率合成原理

超宽谱光导天线阵列的空间功率合成是基于太赫兹脉冲时域波形的一致性, 在时域对各路辐射进行傅里叶变换分析, 通过满足各频率分量功率合成的相干条件, 从而完成超宽谱太赫兹辐射的空间功率合成。

假设两路超宽谱信号 $x(t)$ 和 $y(t)$, 两者的互相关函数为

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x][y(t + \tau) - \mu_y] dt}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

式中: μ_x 和 μ_y 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的均值; σ_x 和 σ_y 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的方差; T 为信号持续时间。假设二者的时域波形一致, 则 ρ_{xy} 可取值为 1。在满足狄里克利条件的前提下, $x(t)$ 和 $y(t)$ 可由傅里叶频率分解公式展开为

$$\begin{cases} x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp[j(k\omega t + \theta_k)] \\ y(t) = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \exp[j(k\omega t + \beta_k)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为频率。由时频等效变换的原理可知, $x(t)$ 和 $y(t)$ 时域的一致性决定了它们在频域的一致性。因而,

* 收稿日期: 2012-09-20; 修订日期: 2012-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11176032)

作者简介: 邓 琥(1980—), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要从事太赫兹技术研究; denghu@swust.edu.cn。

A_0 和 B_0 , A_k 和 B_k , θ_k 和 β_k 也应当一致。综上分析, $x(t)$ 和 $y(t)$ 在整个超宽信号频谱内的各谐波分量 $A_k \exp[j(kwt + \theta_k)]$ 和 $B_k \exp[j(kwt + \beta_k)]$ ($k=0, 1, \dots, \infty$) 也分别满足经典功率合成的相干条件。

时间延迟对超宽谱光导天线阵列空间功率合成的影响,采用时域相干度 ξ 进行评价。时域相干度是指 N 路延迟时,各路均不延迟时的时域光谱 THz 辐射峰值 Y_m (其对应时刻为 T_m) 与 N 路延迟后时域光谱在 T_m 处的 THz 辐射值 Y_n 比值的倒数。即

$$\xi = \frac{Y_n}{Y_m} \times 100\% \quad (3)$$

2 实验条件

2.1 数值模拟数据来源

采用太赫兹时域光谱测量系统分别对 $1000, 500, 34 \mu\text{m}$ 偶极子光导天线进行测量,测量系统见图 1。用自锁模钛宝石激光器作为飞秒脉冲激光光源,输出脉宽 92 fs ,中心波长 800 nm ,重复频率为 80 MHz 。飞秒脉冲经反射镜 $M_0, 1/2$ 波片 HWP 和分束镜 CBS 后分为两束,透射光作为探测光、反射光作为泵浦光。泵浦光通过反射镜 M_1, M_2 和 M_3 后聚焦到偶极子光导天线 PCA 上,在天线半导体材料的表面瞬间激发载流子,并通过加偏压电场使载流子加速,产生瞬变光电流,从而产生 THz 辐射脉冲,THz 脉冲经离轴抛面镜 (PM1, PM2) 进行准直,再由离轴抛面镜 (PM3, PM4) 后经硅片 Si 聚焦到探测晶体 ZnTe 上;探测光通过反射镜 (M4, M5, M6) 后经透镜、偏振片后,由硅片 Si 反射到 ZnTe 晶体的同一位置上,携带 THz 信息的探测光经 $1/4$ 波片 QWP、透镜和渥拉斯顿棱镜后聚焦到双眼光电探头,光电探头输出信号接锁相放大器。锁相放大器输出一个一定频率的 TTL 电平,通过放大器放大后作为偏置电压加到偶极子光导天线两级,该交流电压信号可代替斩波器调制信号,在锁相放大器采集信号时作为参考信号进行锁相积分计算,然后由计算机采集显示信号。测量中,为了减少空气中水分对太赫兹波的吸收,在光路图中虚线框部分加密封罩,并向罩内充入氮气,系统所处的实验室环境温度为 22°C ,湿度小于 5%。图 2 为 $34, 500, 1000 \mu\text{m}$ 偶极子光导天线太赫兹时域光谱。

2.2 数值模拟平台

采用 MATLAB(美国 mathworks 公司,7.0 版本)的图形用户界面(GUI)建立超宽谱太赫兹空间功率合成数字模拟平台。

基于时间延迟的光导天线空间功率合成原理:当导入多路数据后,超宽谱太赫兹空间功率合成数字模拟平台将自动计算数据个数及时间采样时间,通过任意输入的延迟数据,获得每一路具体延迟时间,由公式(3)计算

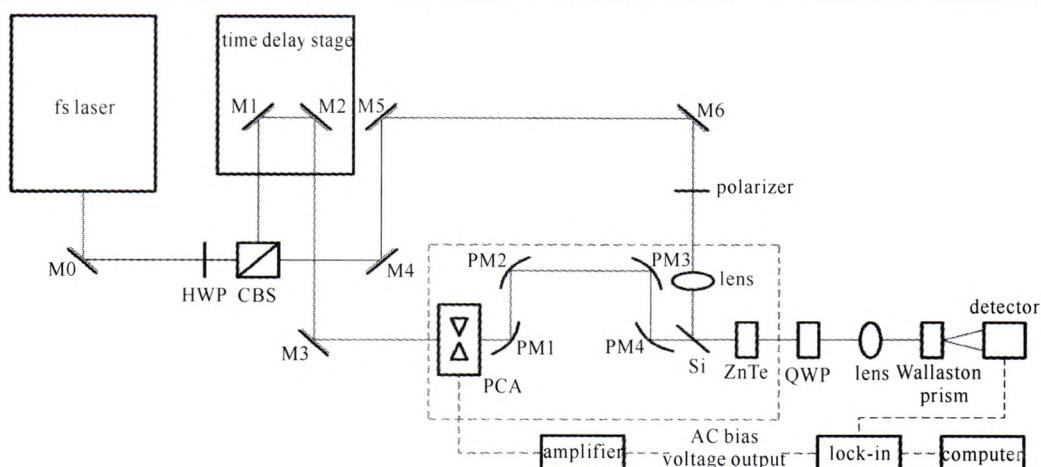


Fig. 1 Terahertz time domain spectrum measurement system

图 1 太赫兹时域光谱测量系统

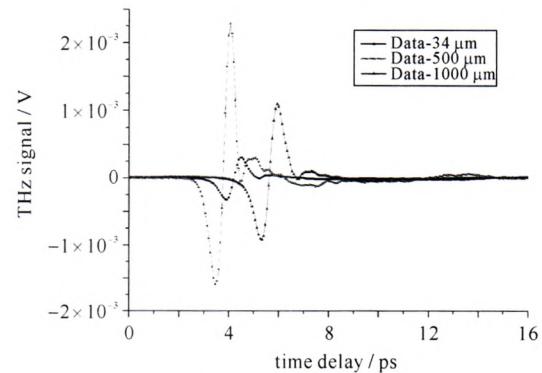


Fig. 2 Terahertz time domain spectrogram of $34, 500$ and $1000 \mu\text{m}$ optical dipole antenna

图 2 $34, 500, 1000 \mu\text{m}$ 偶极子光导天线太赫兹时域光谱

时域相干度。

3 实验结果

3.1 基于时间延迟的 34 μm 偶极子光导天线空间功率合成实验

基于时间延迟的 34 μm 偶极子光导天线空间功率合成实验以四路输入为例,数据为 34 μm 偶极子光导天线太赫兹时域光谱数据(即 Data-34 μm),其四路延迟规则见表 1,基于四路时间延迟的 34 μm 偶极子光导天线时域光谱如图 3 所示,其时域相干度见表 1。实验结果表明:在满足空间功率合成时域相干度 60% 的条件下:两个 34 μm 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 350.7 fs;三个 34 μm 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 191.1 fs;四个 34 μm 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 167 fs。

表 1 基于四路时间延迟的 34 μm 偶极子光导天线延迟规则及时域相干度

Table 1 Four-array delay regulation and delay time domain coherence degree of 34 μm optical dipole antenna

time-domain spectroscopy data	delay time/fs				degree of coherence/%
	first array	second array	third array	fourth array	
Data0	0	0	0	0	100.0
Data1	0	0	0	21×16.7	61.7
Data2	0	0	12×16.7	13×16.7	61.8
Data3	0	10×16.7	10×16.7	10×16.7	59.6

3.2 基于时间延迟的 500 μm 偶极子光导天线空间功率合成实验

基于时间延迟的 500 μm 偶极子光导天线空间功率合成实验以四路输入为例,数据为 500 μm 偶极子光导天线太赫兹时域光谱数据(即 Data-500 μm),其四路延迟规则见表 2,基于四路时间延迟的 500 μm 偶极子光导天线时域光谱如图 4 所示,其时域相干度见表 2。实验结果表明,在满足空间功率合成时域相干度 60% 的条件

表 2 基于四路时间延迟的 500 μm 偶极子光导天线延迟规则及时域相干度

Table 2 Four-array delay regulation and delay time domain coherence degree of 500 μm optical dipole antenna

time-domain spectroscopy data	delay time/fs				degree of coherence/%
	first array	second array	third array	fourth array	
Data0	0	0	0	0	100.0
Data1	0	0	0	28×16.7	60.0
Data2	0	0	14×16.7	15×16.7	61.3
Data3	0	11×16.7	11×16.7	12×16.7	60.3

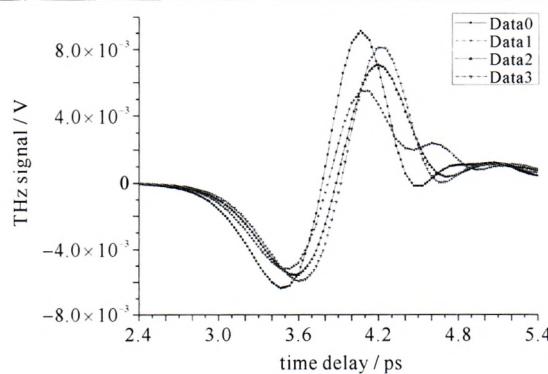


Fig. 4 四路时间延迟的 500 μm 偶极子光导天线时域光谱

图 4 基于四路时间延迟的 500 μm 偶极子光导天线时域光谱

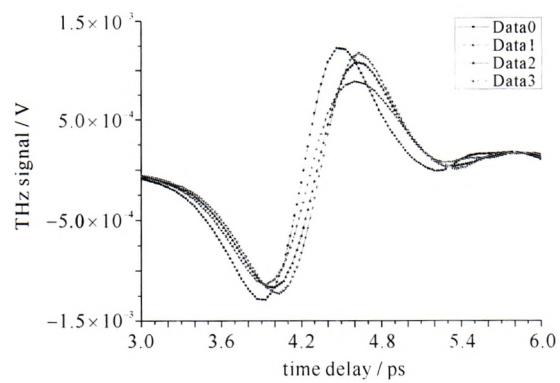


Fig. 3 四路时间延迟的 34 μm 偶极子光导天线时域光谱

图 3 基于四路时间延迟的 34 μm 偶极子光导天线时域光谱

表 2 基于四路时间延迟的 500 μm 偶极子光导天线延迟规则及时域相干度

Table 2 Four-array delay regulation and delay time domain coherence degree of 500 μm optical dipole antenna

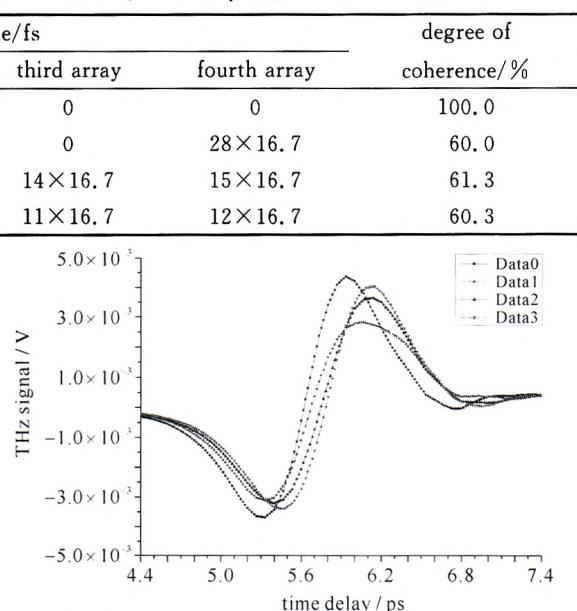


Fig. 5 四路时间延迟的 1000 μm 偶极子光导天线时域光谱

图 5 基于四路时间延迟的 1000 μm 偶极子光导天线时域光谱

下:两个 $500\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 467.6 fs ;三个 $500\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟分别为 250.5 fs ;四个 $500\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 200.4 fs 。

3.3 基于时间延迟的 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线空间功率合成实验

基于时间延迟的 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线空间功率合成实验以四路输入为例,数据为 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线太赫兹时域光谱数据(即 Data- $1000\mu\text{m}$),其四路延迟规则见表 3,基于四路时间延迟的 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线时域光谱如图 5 所示,其时域相干度见表 3。实验结果表明,在满足空间功率合成时域相干度 60% 的条件下:两个 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 450.9 fs ;三个 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 267.2 fs ;四个 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线阵列的相对最大时间延迟为 217.1 fs 。

表 3 基于四路时间延迟的 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 偶极子光导天线延迟规则及时域相干度

Table 3 Four-array delay regulation and delay time domain coherence degree of $1000\text{ }\mu\text{m}$ optical dipole antenna

time-domain spectroscopy data	delay time/fs				degree of coherence/%
	first array	second array	third array	fourth array	
Data0	0	0	0	0	100.0
Data1	0	0	0	27×16.7	60.3
Data2	0	0	16×16.7	16×16.7	61.2
Data3	0	12×16.7	13×16.7	13×16.7	61.6

4 结 论

实验结果表明,时间延迟对偶极子光导天线空间功率合成时域相干度有很大影响。在满足空间功率合成时域相干度 60% 的条件下:两个间隙大于 $34\text{ }\mu\text{m}$ 的偶极子光导天线阵列空间功率合成物理实验的相对延迟时间应小于 350.7 fs ;三个间隙大于 $34\text{ }\mu\text{m}$ 的偶极子光导天线阵列空间功率合成物理实验的相对延迟时间应小于 191.1 fs ;四个间隙大于 $34\text{ }\mu\text{m}$ 的偶极子光导天线阵列空间功率合成物理实验的相对延迟时间应小于 167 fs 。

参 考 文 献:

- [1] 刘盛纲,钟任斌.太赫兹科学技术及其应用的新发展[J].电子科技大学学报,2009,38(5):481-486.(Liu Shenggang, Zhong Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(5):481-486)
- [2] Han P Y, Cho G C, Zhang X C. Time-domain transillumination of biological tissues with terahertz pulses[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(4):242-244.
- [3] 姚建铨,迟楠,杨鹏飞,等.太赫兹通信技术的研究与展望[J].中国激光,2009,36(9):2213-2233.(Yao Jianquan, Chi Nan, Yang Pengfei, et al. Study and outlook of terahertz communication technology. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9):2213-2233)
- [4] 邓贤进,王成,林长星,等.0.14 THz 超高速无线通信系统实验研究[J].强激光与粒子束,2011,23(6):1430-1432.(Deng Xianjin, Wang Cheng, Lin Changxing, et al. Experimental research on 0.14 THz super high speed wireless communication system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(6):1430-1432)
- [5] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(9):1581-1592.
- [6] Sanz-Fernandez J J, Cheung R, Goussetis G, et al. Power stored and quality factors in frequency selective surfaces at THz frequencies[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2011, 59(6):2205-2216.
- [7] Shimizu N, Nagatsuma T. Photodiode-integrated microstrip antenna array for subterahertz radiation[J]. *IEEE Photonics Technology Lett*, 2006, 18(6):743-745.
- [8] Kirawanich P, Yakura S J, Islam N E. Study of high-power wideband terahertz-pulse generation using integrated high-speed photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2009, 37(1):219-228.
- [9] Tiedje H F, Saeedkia D, Nagel M, et al. Optical scanning techniques for characterization of terahertz photoconductive antenna arrays[J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(7):2040-2045.
- [10] Nguyen D T, Simoens F, Ouvrier-Buffet J, et al. Broadband THz uncooled antenna-coupled microbolometer array-electromagnetic design, simulations and measurements[J]. *IEEE Trans on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(3):299-305.

Analysis of time delay effect on space power synthesis of optical dipole antenna

Deng Hu¹, Shang Liping^{1,2}, Zhang Yang¹, Xia Zuxue¹

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Time delay effect on optical dipole antenna's space power synthesis is analyzed. Utilizing terahertz time-domain spectroscopy, we obtain terahertz time-domain spectrogram of 34, 500 and 1000 μm optical dipole antenna separately. The time delay effect on space power synthesis is studied in numerical simulation. The result shows that, in the condition of 60% space power synthesis efficiency, the relatively biggest time delay of two arrays of 34, 500 and 1000 μm optical dipole antenna is 350.7, 467.6, 450.9 fs, respectively, that for three arrays is 191.1, 250.5, 267.2 fs, respectively, and that for four arrays is 167, 200.4, 217.1 fs, respectively. The numerical simulation of space power synthesis can provide important basis for physical experiment of optical dipole antenna arrays.

Key words: time delay; space power synthesis; optical dipole antenna; terahertz

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>