

隧道中泄漏同轴电缆和螺旋天线辐射场的比较

张 昕, 杨晓冬, 郭黎利, 赵子鑫

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 从漏缆和天线的辐射理论出发, 利用射线追踪法, 以隧道为例分析了其中由漏缆和螺旋天线产生的辐射场并讨论了不同材质的隧道壁对它们的影响。通过比较, 体现出了漏缆的场强在这种特定环境下具有分布均匀的优越性。该理论和结果可以扩展到其它场所, 对于进一步研究闭域空间中的无线通信问题具有较强的参考价值。

关键词: 泄漏同轴电缆; 螺旋天线; 辐射场; 射线追踪法

中图分类号: TM 835 **文献标志码:** A

Comparison of the radiated field between leaky coaxial cable and spiral antenna in the blind zone

ZHANG Xin, YANG Xiao-dong, GUO Li-li, ZHAO Zi-xin

(Information and Communication Engineering Coll., Harbin Engineering Univ., Harbin 150001, China)

Abstract: Beginning with the radiation theory of LCX and antenna, by the use of ray-tracing method, we take a tunnel for example to analyze its radiated field produced by both LCX and spiral antenna and discuss the effect of different materials of the tunnel on the radiated field. By comparison, LCX shows advantages in the coverage of the radiated field in such special area—the distribution of the radiated field is more uniform. The theories and results can be extended in other blind zones and have referenced values in further research on solving the problems of communication in the blind zone.

Keywords: leaky coaxial cable; spiral antenna; radiated field; ray-tracing method

0 引 言

随着信息时代的到来, 人们对无线通信的要求也越来越高, 希望能够在包括隧道、矿井、地铁等这些以往被视为通信盲区的任何地方使用无线电来进行高质量的通信。因而灵活方便、质量可靠, 并且能够适应复杂环境的无线通信系统成为今后的发展趋势。

在隧道等封闭空间, 电磁波用传统的天线进行传播时经过多次的反射、散射之后衰减十分严重, 很难达到要求的传播距离和场强覆盖。因此, 在这些特定环境下, 无线通信系统中最重要的技术之一就是有效的辐射和接收射频电磁波, 在有限功率下尽可能使电磁波传播更远、更均匀。目前我国隧道中常用的两种辐射源是漏缆和隧道天线。本文从漏缆和天线的辐射理论出发, 采用射线追踪法, 以隧道为例对以上两种辐射源在其中产生的辐射场分布进行了计算, 并讨论和比较了各自的特点, 突出了用漏缆在这种特定环境下进行无线通信所具有的优越性。

1 基本理论和计算方法

1.1 射线追踪法和镜像法

隧道中无线通信系统的工作频率一般比较高, 如我国列车无线调度通信所采用的 460 MHz 以及移动电话所采用的 900 MHz、1 800 MHz 等, 因而波长与隧道尺寸相比要小得多, 此时电磁波的传播可以用几何光学来近似, 即认为电磁波沿直线传播, 远场区的电磁波可视为局部平面波, 因而可以用射线追踪法来进行研究^[1]。

在分析中采用射线追踪法和镜像法, 因为经过二次或多次反射后的电磁波衰减很大而计算却很复杂, 所以从工程的角度可以只考虑隧道壁对电磁波的一次反射。在实际问题中: 由于火车的存在, 地面对电磁波的反射无法到达火车顶部的天线, 故不考虑地面的影响; 而车顶部对电磁波的反射可以看成是辐射源相对于金属板的镜像产生的——反射面的尺寸超过 $(2\sim 3)\lambda$ 时, 反射面的影响基本可以看成是镜像的作用^[2]。根据以上原理, 可以确定本文中需要考虑的共有 5 条电磁波传播路径, 如图 1 所示, 其中 o 点为辐射源。

收稿日期: 2007-04-16; 修回日期: 2007-07-30。

基金项目: 黑龙江省科技计划项目资助课题(GC05A119)

作者简介: 张昕(1965-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为电波传播与天线技术。E-mail: zhangxin@hrbeu.edu.cn

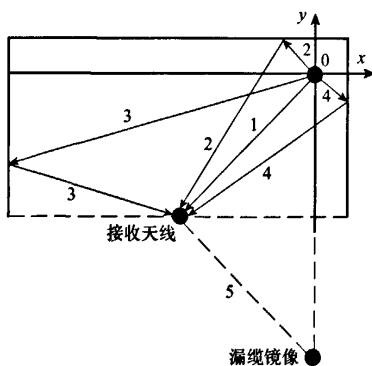


图1 隧道中电磁波传播路径

1.2 漏缆辐射场的计算

泄漏同轴电缆(简称漏缆),也称连续天线,它是遵循特定的电磁场理论,沿着同轴电缆的外部导体周期性或非周期性配置开槽口而形成的。电信号在该电缆中传输的同时,能把电磁能量的一部分按要求从特殊开槽口以电磁波的形式放射到周围的外部空间,既具有传输线的特性又具有无线电发射天线的性质。漏缆发展到今天,由于其信号覆盖均匀的优点,已经广泛应用于隧道、矿井、铁路、高速公路等领域的通信系统中,而且将进一步扩大到室内的移动通信领域。漏缆的应用使得人们在以往被认为是盲区的空间进行无线通信成为可能,极大的满足了交通、矿业等部门通信业务的需求,并且提高了个人移动通信的质量,在未来必将受到更大的关注。

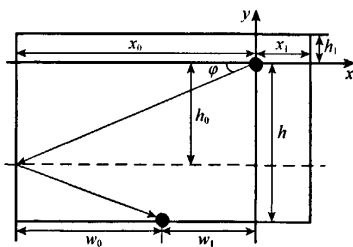
如图2(a)所示,漏缆外导体上开槽的电场分布为^[3]

$$\vec{E}_z(\varphi, z) = \frac{V}{w} \left[1 - \frac{\cos(k_0 b \varphi)}{\cos(k_0 b \alpha)} \right] \quad (1)$$

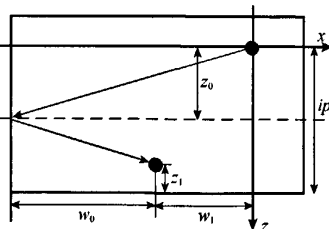
式中, $V = (-jV_0 \sqrt{\epsilon_r}) / [2k_0 b \ln(b/a)]$, a, b 分别为同轴电缆的内外导体半径, V_0 为激励电压, k_0 为自由空间的波数, α 为开缝角度, w 为缝隙宽度, 由于 w 很小, 故可以认为 E_z 沿 z 向是不变的。

如图2(b)所示, o 点为缝隙位置, 它和自由空间中某点距离为 r , r 在 xoy 面上投影为 r' , φ 为 r' 与 x 轴所成的角度, θ 为 r 与电缆轴向 z 所成的角度, 则自由空间中某点的周向辐射场为^[4]

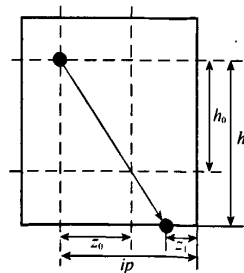
$$E_\varphi = -jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\pi r \epsilon_0} \sin \theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\varphi} j^{n+1} g_n(-k_0 \cos \theta) \quad (2)$$



(a) 正视图



(b) 俯视图



(c) 侧视图

图3 射线3的三视图

$$g_n(\omega) = \frac{\epsilon_0 \eta \omega \tilde{E}_z(n, \omega)}{b(k_0^2 - \omega^2)^{3/2} H_n^{(2)'}(b \sqrt{k_0^2 - \omega^2})} \quad (3)$$

式中, $H_n^{(2)'}(b \sqrt{k_0^2 - \omega^2})$ 为 n 阶第二类汉克尔函数的导数, \tilde{E}_z 为 E_z 的柱面傅里叶变换, 可表示如下。

$$\tilde{E}_z(n, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} dz E_z(\varphi, z) e^{-jn\varphi} e^{-j\omega z} \quad (4)$$

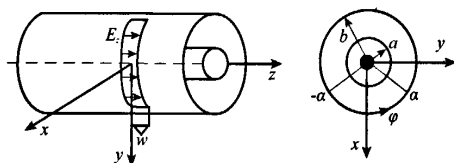
由以上各式可得

$$E_\varphi = V(\theta, \varphi) \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \sin \theta \quad (5)$$

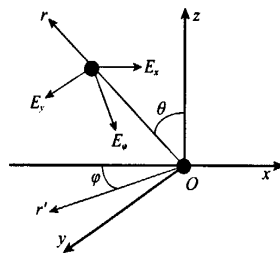
式中

$$V(\theta, \varphi) = \frac{jV \cos \theta}{\pi^2 k_0 \sin^3 \theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n e^{-jn\varphi} j^{n+1}}{H_n^{(2)'}(b k_0 \sin \theta)} \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{n} - \frac{m \sin \alpha \cos n\alpha - n \cos \alpha \sin n\alpha}{(m^2 - n^2) \cos m\alpha} \right) \quad (6)$$

式中, $m = k_0 b$, 由式(5)、(6)可以求出自由空间某点的周向极化电场。



(a) 漏缆的开缝结构



(b) 开缝的辐射场

图2 漏缆的开缝结构和辐射场

如图1所示,漏缆上的开缝 L 在矩形隧道中辐射的电磁波经直射路径1、5和一次反射路径2、3、4到达车顶的接收天线处,因为路径5是路径1的镜像,所以两者 E_z 等幅反相, E_φ 等幅同相。

下面以路径3为例,分析经过反射后某一缝隙的辐射场,则总的辐射场可由电缆上各缝隙叠加得到。射线3在三维直角坐标系中的投影如图3所示。

图3(b) ip 表示第 i 个缝隙在 z 轴上的坐标。下面分析 E_y 的垂直极化分量 E_y 。由射线追踪理论^[5], 结合图2(b)和式(5)有

$$E_y = V(\theta_i, \varphi_i) \frac{e^{-jk(r_i+r_{i1})-j\beta P}}{r_i+r_{i1}} \sin \theta_i \cos \varphi_i \Gamma_h \quad (7)$$

式中

$$r_i = \sqrt{x_0^2 + h_0^2 + z_0^2}, \quad r_{i1} = \sqrt{w_0^2 + (h-h_0)^2 + (iP-z_0)^2}$$

$$\varphi_i \approx \arccos \left(\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + h_0^2}} \right), \quad \theta_i = \arctan \left(\frac{\sqrt{x_0^2 + h_0^2}}{z_0} \right)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_r}, \quad \Gamma_h = \frac{\sin \gamma - \sqrt{(\epsilon_1 - j\epsilon'_1) - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{(\epsilon_1 - j\epsilon'_1) - \cos^2 \gamma}}$$

$$\gamma = \arctan \left(\frac{x_0}{\sqrt{z_0^2 + h_0^2}} \right)$$

以上各式中 x_0, h_0, z_0 和 w_0 的涵义都在图3中予以标明。 Γ_h 为相对于隧道墙面的水平极化波的反射系数, $\epsilon_1 - j\epsilon'_1$ 为墙面的复介电系数, 而垂直极化波的反射系数为

$$\Gamma_v = \frac{(\epsilon_1 - j\epsilon'_1) \sin \gamma - \sqrt{(\epsilon_1 - j\epsilon'_1) - \cos^2 \gamma}}{(\epsilon_1 - j\epsilon'_1) \sin \gamma + \sqrt{(\epsilon_1 - j\epsilon'_1) - \cos^2 \gamma}} \quad (8)$$

总的场强可由各缝隙作用的叠加得到

$$E_{y\Sigma} = \sum_{i=1}^N V(\theta_i, \varphi_i) \frac{e^{-jk(r_i+r_{i1})-j\beta P}}{r_i+r_{i1}} \sin \theta_i \cos \varphi_i \Gamma_h \quad (9)$$

对于射线1、2、4同样可用以上方法分析。再将电磁波5条传播路径进行叠加, 便可得到车顶接收天线处由漏缆产生的总辐射场。

1.3 螺旋天线辐射场的计算

隧道天线是一种轴向辐射的螺旋天线, 它可以沿轴向产生圆极化波并且具有很强的方向性^[6]。它的结构简图和一些重要的参数如图4所示, 其中 $\alpha = \arctan \frac{S}{\pi D}$ 。在这种情况下, $0.25 < D/\lambda < 0.4$, 也就是说螺旋一圈的长度与波长相当。

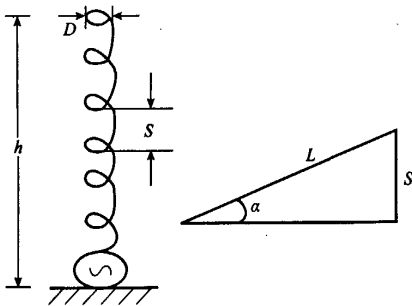


图4 螺旋天线的结构和参数

螺旋天线上一个单元环在远场处产生的电场 E_θ 和 E_φ 可以由式(10)表示^[4]

$$E_\theta = \frac{\omega \mu_0}{4\pi r} e^{-jk_r r} e^{-j\varphi} I a \cos \theta \int_0^{2\pi} \sin^2 \tau \cos(\sin \theta \cos \tau) d\tau \quad (10)$$

$$E_\varphi = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi r} e^{-jk_r r} e^{-j\varphi} I a \int_0^{2\pi} \cos^2 \tau \cos(\sin \theta \cos \tau) d\tau \quad (11)$$

式中, ω 是角频率, μ_0 是磁导率, k_0 是自由空间中的波数, $\tau = \varphi' - \varphi$ 。以上两式中 I, a, r, θ, φ 和 φ' 的涵义都在图5中予以标明。

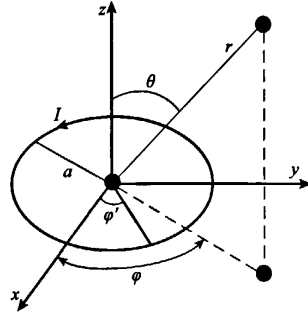


图5 螺旋天线中一个单元环的辐射场

螺旋天线可以看成是由多个单元环组成的天线阵。根据天线阵乘法原理, 螺旋天线在远场的总方向性等于单圈圆环的方向性乘以阵因子的方向性。由 n 个各向同性点源组成天线阵的阵因子为^[7]

$$E = \frac{\sin(n\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (12)$$

对于螺旋天线, $\psi = 2\pi[S_1(1 - \cos \theta) + (1/2n)]$, $S_1 = S/\lambda$, n 是螺旋的圈数。由式(11)和(12)可以近似得到在自由空间某处由一螺旋天线产生的总场强

$$E_\varphi = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi r} e^{-jk_r r} e^{-j\varphi} I a \frac{\sin(n\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \int_0^{2\pi} \cos^2 \tau \cos(\sin \theta \cos \tau) d\tau \quad (13)$$

结合式(13)与1.2部分中的分析方法, 便可得到隧道中由螺旋天线产生的总辐射场 E_y 。

2 计算分析

2.1 漏缆和螺旋天线辐射场分布的比较

在计算时, 根据实际情况, 设隧道为矩形, 其宽、高和长分别位6 m、6 m和200 m, 四壁为混凝土材料, 复介电常数为 $4-j0.3$ ^[8]。火车位于隧道中部, 接收天线距右壁3 m, 距顶部2 m。漏缆沿隧道悬挂, 距右壁0.5 m, 距顶部0.8 m, 其内导体半径为9 mm, 外导体半径为22.8 mm, 开缝角度为 $\pi/4$, 介质层的介电常数为1.25, 开缝周期为0.31 m。螺旋天线安装在隧道口, 同样距右壁0.5 m, 距顶部0.8 m, 其轴向与隧道纵向一致。根据隧道天线的技术指标^[6], 其参数设计为: $\alpha = 14^\circ, n = 4, D = 0.2$ m, $S = 0.16$ m^[9]。

首先将工作频率设定在460 MHz, 用计算机程序绘制出了火车沿隧道行进时, 由两种辐射源产生的辐射场与车顶接收天线位置之间的关系。

从下面的图6(a)和(b)中我们可以看到两种辐射场有着明显的区别。由于漏缆的特殊机理, 其辐射场沿隧道方

向波动不大,比较平稳,尤其是在隧道的中部。相反的,电磁波的反射和吸收导致螺旋天线产生的辐射场波动很大并且衰减严重,经过一段距离后将很难被车顶天线所接收。

下面将工作频率提高到900 MHz,由漏缆产生的辐射场分布如图7所示。从图中可以发现其辐射场仍然很平稳,这正充分的说明了漏缆的辐射场分布均匀的特性。然而对于螺旋天线,由于 $D/\lambda=0.6$,它已经不在轴向辐

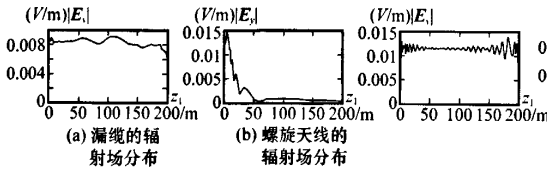


图6 隧道壁为混凝土时辐射场分布 ($f=460$ MHz)

图7 隧道壁为混凝土时漏缆的辐射场分布 ($f=900$ MHz)

比较以上对应的六幅图可以发现,随着复介电系数实部的增加,辐射场也相应的增强,电磁波衰落的程度也以很微弱的区别增大。这是因为相对复介电系数较大的墙面,通常会得到较大的反射系数,从而被反射的能量较大,接收到的能量就较大些,同时电磁波衰落也更大些。

3 结束语

本文从辐射理论出发,结合射线追踪法和场的叠加原理,扼要的分析了隧道中两种常用辐射源——漏缆和螺旋天线的辐射场并讨论了不同材质的隧道壁对它们的影响。结果表明:漏缆的场强分布更加均匀且频带更宽。通过与隧道天线的比较,可以明显看出漏缆更适合用来进行隧道中电磁波的场强覆盖。本文的理论和结果可以根据实际情况扩展到其它闭域空间。

另外,尽管隧道天线的性能比以往有了很大的改进,但仍有一些致命缺陷,比如工作频带窄和单工工作模式。而且,当隧道很长,弯道很多,断面很窄的时候,电磁波很难有效的传输。受螺旋天线特点的限制,以上问题并不能得到很好的解决。相比之下,漏缆并不存在这些缺点。它适用于各种构造的隧道,并且其工作带宽可以根据需要进行扩展。针对移动通信中80 MHz至2 600 MHz整个频带的漏缆研究目前已经取得了很多成果^[10-11]。更重要的是,漏缆产生的电磁波仅分布在相对有限的区域内,可以减少日益严重的电磁能量污染。因此,漏缆不仅会为进一步实现闭域空间中的无线通信作出积极的贡献,而且必将在未来的通信领域中发挥更重要的作用。

射模式下了,因此其辐射特性将会发生畸变,不适于在这种条件下传送电磁波。

2.2 不同材质的隧道壁对辐射场的影响

由于地理条件和环境的不同,隧道四壁的状况也会不同。以上讨论的是隧道壁表面材质为干燥混凝土条件下的辐射场分布,下面再给出材质为土壤条件下(其复介电常数为 $20-j0.02$)相应的辐射场分布,如图8所示。

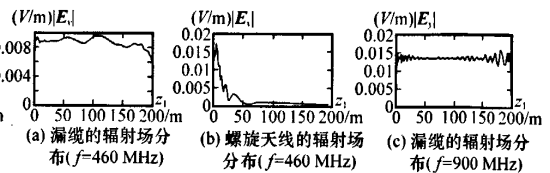


图8 隧道壁为土壤时辐射场分布

参考文献:

- [1] 季忠,黎洪,王豪行,等.用射线跟踪法对室内电波传播进行预测[J].电波科学学报,1999,14(2):160-165.
- [2] 舒琳,施华,王均宏.铁路隧道中漏泄同轴电缆辐射场分布的计算[J].铁道学报,2002,24(2):69-73.
- [3] 王均宏,简水生.漏泄同轴电缆耦合损耗的计算[J].铁道学报,1996,18(6):17-22.
- [4] 卢万锦.天线理论与技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [5] 肖景明,王元坤.电波传播工程计算[M].西安:西安电子科技大学出版社,1989:83-84.
- [6] 吴惠增,郭美钧,虞珊珠,等.铁路隧道天线及其应用.中国铁路,1994(5):32-33.
- [7] Kraus John D, Marhefka Ronald J. 天线(上):for all applications [M].章文勋(译).北京:电子工业出版社,2004.
- [8] Henry L. 现代无线通信系统电波传播[M].顾金星等(译).北京:电子工业出版社,2001.
- [9] 林昌禄,陈海,吴为公.近代天线设计[M].北京:人民邮电出版社,1990.
- [10] Zhang Xin, Yang Xiaodong, Guo Lili, et al. Research of wide-band leaky coaxial cable[C]//Proceedings of the International Conference on Communication and Information, 2005: 811-814.
- [11] Yang Xiaodong, Zhang Xin, Zhang Xiaolin. Research of leaky waveguide using for SHF-EHF band mobile radio communication[C]//Proceedings of the 2004 China-Japan Joint Meeting on Microwaves, 2004: 264-266.

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>