

文章编号: 1001-4322(2007)08-1329-04

超宽带 Cassegrain 双反射面天线研究^{*}

廖 勇¹, 谢 平¹, 陆 巍¹, 陈志刚¹, 杨周炳¹, 孟凡宝¹, 周海京²

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 为了减小馈线损耗和方便天线旋转, 设计了超宽带 Cassegrain 双反射面天线系统。采用 FEKO 数值模拟软件在 0.2~1.5 GHz 频率范围内模拟了不同副反射面直径的 4.5 m 双反射面天线(焦距比为 0.4)的辐射增益, 并与相同口径和焦距比的前馈式反射面天线进行了比较。模拟结果表明, 当双曲副反射面直径为 70 cm, 焦距为 22.5 cm 时, 在 0.2~1.0 GHz 频率范围内, 双反射面天线增益比前馈式抛物面天线高 1~2 dB; 在 1.1~1.5 GHz 频率范围内, 双反射面天线增益比前馈式抛物面天线小 1~2 dB。选择直径为 70 cm、焦距为 22.5 cm 的双曲副面与 TEM 喇叭和 4.5 m 抛物面组成双反射面天线系统, 分别用 960 ps 和 3 ns 脉宽的单极脉冲源对天线进行了实验研究。实验结果表明, 用 960 ps 和 3 ns 脉宽的单极脉冲激励, Cassegrain 双反射面天线在 70 m 轴上远场辐射波形峰峰值分别为前馈式反射面天线的 158% 和 162%。

关键词: 超宽带高功率微波; Cassegrain 双反射面天线; 抛物面天线; TEM 喇叭

中图分类号: TN823.28

文献标识码: A

目前使用的反射面超宽带天线一般采用前馈式^[1], 但前馈式反射面天线系统在馈入功率较高和反射面口径较大时将带来较大的馈线损耗。高功率下同轴传输馈线外径一般较大, 如果馈线与抛物面天线中轴线重合, 会对辐射场带来较大的影响, 因此馈线多避开抛物面中轴线, 而从抛物面底部穿出。另外高功率下, 馈线与馈源喇叭和脉冲源之间均采用刚性硬连接, 不便于实现天线系统的方位和俯仰旋转, 且增大了馈线长度。天线系统采用双反射面天线设计能在一定程度上克服上述缺点。首先可以将馈线沿抛物面天线中心轴摆放, 因为双反射面系统本身存在馈源喇叭对副反射面辐射的遮挡, 因此不用考虑馈线对抛物面辐射场的遮挡; 其次, 若要实现天线系统旋转, 馈线从抛物面天线转动轴穿出后直接与馈源喇叭相连, 馈线长度大为缩短; 再次, 可用副反射面调节抛物面口径场分布, 提高口径效率。文献[5]介绍了一种仅属于概念设计的 Cassegrain IRA 天线, 其特点是利用抛物面天线馈臂与副反射面和抛物面构成组合振子, 实现低频时的单向辐射, 同时利用反射面得到高频时的高增益辐射。这种天线适宜于较低功率的超宽带辐射, 当馈入功率增大时, 在同轴馈线到天线馈臂过渡设计时会带来功率容量和辐射能量损耗等一系列工程实现上的困难。

1 Cassegrain 双反射面天线设计

本文采用馈源 TEM 喇叭、双曲副反射面和抛物面构成 Cassegrain 双反射面天线系统, 如图 1 所示。其中, D 和 d 分别为主反射面和副反射面的直径; F 为主反射面的焦距; f 为副反射面的 2 倍焦距。 φ_0 为馈源喇叭对副反射面的半照射角, θ_0 为抛物面半张角。天线系统同轴馈线到 TEM 喇叭平板过渡和 TEM 喇叭均置于充满变压器油的尼龙介质箱体中。抛物面口径设计为 4.5 m, 焦距比(F/D)为 0.4。天线系统馈入的超宽带脉冲信号辐射场 10% 频谱宽度为 0.2~1.5 GHz, 辐射场频谱中心频率在 500 MHz 左右。

1.1 副反射面直径的设计

根据窄带 Cassegrain 天线副反射面设计原理^[6], 在将馈源 H 面和 E 面的平均副反射面边缘照射锥削为 10 dB 时, 要满足对抛物面辐射场最小遮挡, 一般取副反射面直径为

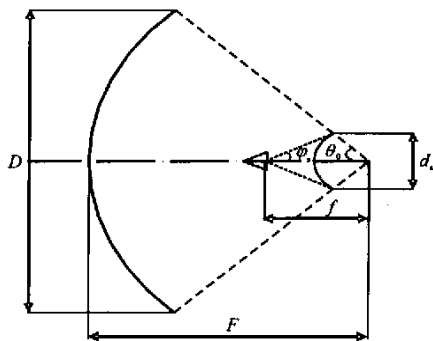


Fig. 1 Geometry of Cassegrain dual reflector antenna

图 1 Cassegrain 双反射面天线结构示意图

^{*} 收稿日期: 2006-12-28; 修订日期: 2007-06-11

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 廖 勇(1967—), 男, 硕士, 现从事高功率微波天线研究工作; liaoyongmail@163.com。

$$d_s = \sqrt{2\lambda F} \quad (1)$$

式中 λ 为波长。如果计算出的副面直径与主反射面直径之比 $d_s/D > 0.2$,则只能取 $d_s/D = 0.2$ (遮挡效率为90%),不能过大。图2是由式(1)计算得到的针对4.5 m抛物面在不同频率下最小遮挡副反射面直径,在0.2~1.1 GHz范围内 $d_s/D > 0.2$,在1.1~1.5 GHz范围内 $0.1 < d_s/D < 0.2$,因此选择副反射面直径为500,700,900 mm。

1.2 馈源 TEM 喇叭设计

对于馈源 TEM 喇叭的设计,主要考虑与超宽带脉冲功率源输出阻抗匹配、辐射带宽、高功率容量以及与抛物面和副反射面匹配等因素。一般高功率超宽带脉冲源的输出阻抗为50 Ω 左右。TEM 喇叭特性阻抗为^[7]

$$Z_c = 120\pi / \{\sqrt{\epsilon_r} [w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.444)]\}, \quad w > h \quad (2)$$

式中 w 和 h 分别是 TEM 喇叭口径的宽度和高度。TEM 喇叭在变压器油介质中,变压器油相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$,根据公式(2),当 $w/h = 2.7$ 时,变压器油中的 TEM 喇叭特性阻抗为50 Ω 。

馈源 TEM 喇叭的低频、高频截止频率分别为^[8-9]

$$f_l = c/2\pi l, \quad f_h = 2k f_g E_{y, \text{norm}}/h^2 \quad (3)$$

式中: l 是 TEM 喇叭长度; $f_g = Z_c/Z_0$, Z_0 是空间波阻抗, Z_c 是 TEM 喇叭特性阻抗; $E_{y, \text{norm}}$ 是 TEM 喇叭口径面归一化场强,一般可取1。考虑 TEM 喇叭高功率容量,取 TEM 喇叭口径高为20 cm。为满足辐射带宽取 TEM 喇叭长45 cm。经公式(3)计算 TEM 喇叭的低频、高频截止频率分别为100 MHz和2.25 GHz。

对于 TEM 喇叭口径面宽度的选择,除了考虑与超宽带脉冲源匹配外,还要考虑与抛物面和副反射面的匹配。实验表明当喇叭口径宽度为35 cm时,4.5 m 抛物面天线与 TEM 喇叭组成前馈式反射面天线,馈入脉宽1 ns的超宽带脉冲时,可得到最大辐射场,此时 TEM 喇叭天线特性阻抗约为65 Ω 。所设计的 TEM 喇叭天线在频率500 MHz时,3 dB主瓣宽度约为60°,10 dB宽度约110°。

1.3 副反射面焦距的设计

为减小计算量,对于副反射面焦距的选择,采用 Sabor 软件进行理论分析和计算。采用辐射场频谱中心频率500 MHz分析天线增益。由于 Sabor 软件仅能分析矩形和圆锥喇叭馈源,因此用矩形喇叭形成与所设计 TEM 喇叭近似的方向图。矩形喇叭长75 cm,喇叭口径宽为60 cm,高52.8 cm。在副反射面直径不变前提下,线性变化副反射面焦距,得到副反射面焦距与双反射面天线系统增益的关系,计算结果如图3所示。当副反射面焦距取15.0,22.5,27.5 cm时,对于直径为50,70,90 cm的副反射面分别取得双反射面天线系统最大增益。

1.4 TEM 喇叭馈源与双反射面天线系统的匹配

保持 TEM 喇叭长度和口径宽度不变,变化 TEM 喇叭口径高度,副反射面直径取50 cm。采用 FEKO 数值

表1 不同 TEM 喇叭口径高度的双反射面天线增益
Table 1 Gain of dual reflector antenna with different height of TEM horn

length/cm	width/cm	height/cm	gain/dB
45	35	5	21.64
45	35	10	22.83
45	35	20	22.62
45	35	30	21.71
45	35	50	19.49

模拟软件分析辐射场中心频率500 MHz下双反射面天线增益,模拟计算结果如表1所示。当口径高度为10 cm时,天线系统辐射场最大,考虑到馈源 TEM 喇叭的高功率容量,喇叭口径面高度太小会产生介质窗沿面放

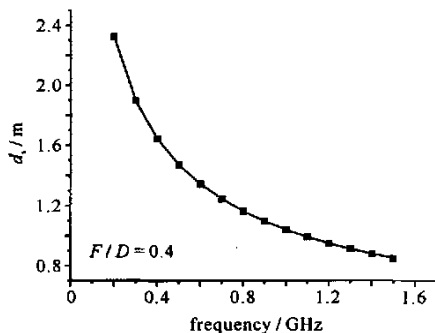


Fig. 2 Diameter of subreflector of 4.5 m dual reflector antenna with smallest obstruct vs frequency

图2 不同频率的4.5 m双反射面天线最小遮挡副反射面直径

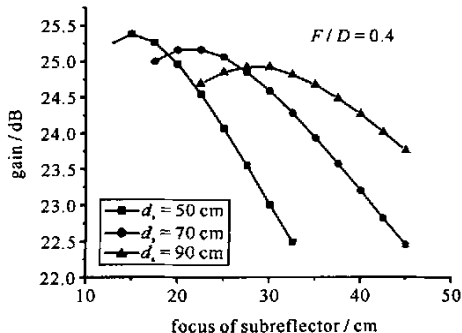


Fig. 3 Gain of 4.5 m Cassegrain antenna vs subreflector focus

图3 不同副反射面焦距的4.5 m Cassegrain 天线增益

电,因此选择喇叭口径高度为 20 cm。增益只减小 0.2 dB。同样,分析结果表明,以口径宽度 35 cm 为基础,在 ± 10 cm 范围内变化喇叭口径宽度对天线辐射增益的影响不超过 0.3 dB;在 20 cm 范围内延长 TEM 喇叭的长度对天线辐射增益的影响也不超过 0.3 dB。当副反射面直径为 70 cm 和 90 cm 时,进行同样的数值模拟,可以得到类似结果。因此所设计的 TEM 喇叭馈源与双反射面 Cassegrain 天线能实现较好的匹配。

1.5 3 维数值模拟

选取长 45 cm、口径高 20 cm、宽 35 cm 的 TEM 喇叭作为馈源,与焦距比为 0.4 的 4.5 m 抛物面天线和副反射面组成双反射面天线系统。采用 FEKO 软件 3 维模拟不同副反射面直径下,0.2~1.5 GHz 频率范围内 4.5 m 双反射面天线增益,并与相同口径和焦距比的前馈式抛物面天线相比较,模拟结果如图 4 所示。当双曲副反射面直径为 70 cm,焦距为 22.5 cm 时,双反射面天线在 0.2~1.0 GHz 范围内,增益比前馈式抛物面天线高 1~2 dB;在 1.1~1.5 GHz 频率范围内,增益比前馈式小 1~2 dB,比选用副面直径为 50 cm 和 90 cm 时,增益高 1~2 dB。

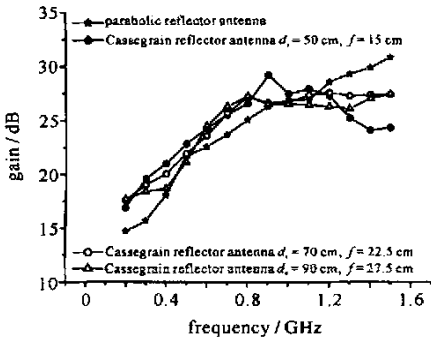


Fig. 4 Gains of 4.5 m Cassegrain and parabolic reflector antennas

图 4 4.5 m Cassegrain 天线和抛物面反射天线增益

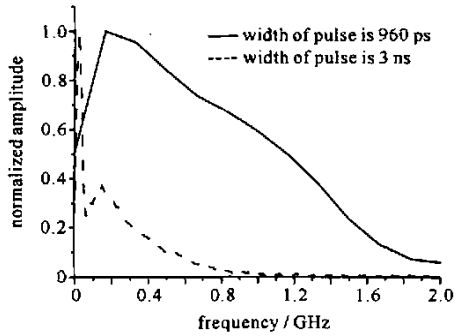


Fig. 5 FFT of source pulse

图 5 脉冲源频谱曲线

2 实验研究

用 4.5 m 抛物面($F/D=0.4$)、馈源 TEM 喇叭以及副反射面构成 Cassegrain 双反射面天线,副反射面直径为 70 cm,焦距为 22.5 cm。馈源 TEM 喇叭长、宽、高分别为 45,35,20 cm。馈入信号为脉宽 960 ps 和 3 ns 的单极脉冲(两种源电压幅度不同),两种源的频谱曲线见图 5,它们的频谱 10%带宽分别为:DC~1.75 GHz 和 DC~750 MHz。

在 70 m 远场测量反射面天线轴上远场辐射场,结果如图 6 所示。如果按峰峰值比较,960 ps 脉冲激励时,Cassegrain 天线辐射场波形峰峰值为前馈式抛物面天线的 158%;用 3 ns 脉冲激励时,卡塞格伦天线辐射场波形峰峰值为前馈式抛物面天线的 162%。如果按最大峰值比较,960 ps 脉冲激励时,Cassegrain 天线辐射场最大峰值为前馈式抛物面天线的 137%;用 3 ns 脉冲激励时,Cassegrain 天线辐射场最大峰值为前馈式抛物面天线的 155%。天线辐射场的频谱曲线如图 7 所示,Cassegrain 天线辐射场频谱分量在 200~800 MHz 频谱范围内比前馈式抛物面天线明显大些,这与数值模拟结果相吻合。

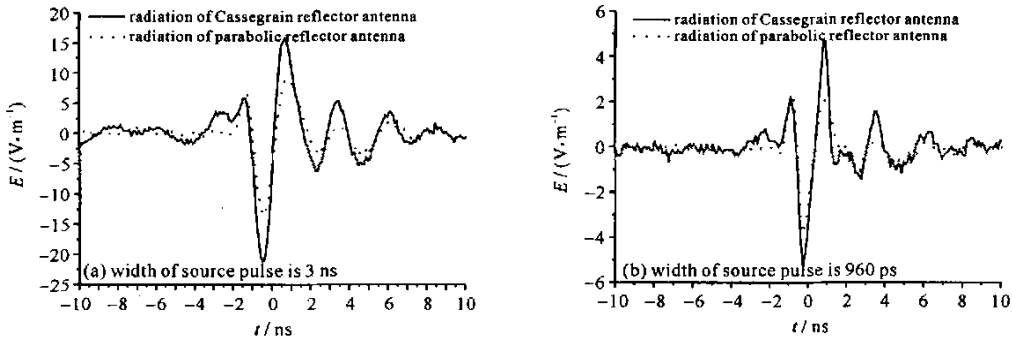


Fig. 6 Radiation field of parabolic and Cassegrain reflector antennas at 70 m on boresight

图 6 70 m 轴上抛物面和 Cassegrain 天线远场辐射波形

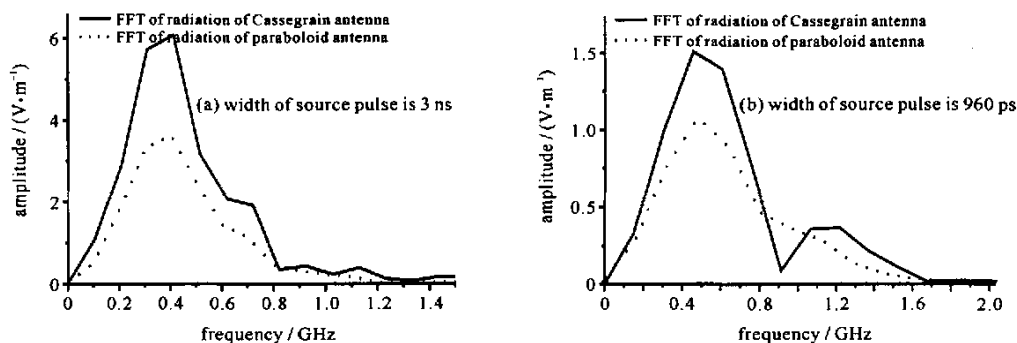


Fig. 7 Spectra of radiation of parabolic and Cassegrain reflector antennas

图7 抛物面天线和Cassegrain天线辐射场频谱曲线

3 结论

通过理论分析计算设计了 4.5 m Cassegrain 双反射面超宽带天线,用 FEKO 数值模拟软件对比分析了 Cassegrain 双反射面天线和前馈式抛物面天线增益。对天线系统进行了小信号实验,用 960 ps 单极脉冲源激励时,在 70 m 轴上远场,Cassegrain 天线辐射场波形峰峰值是前馈式抛物面天线的 158%;用 3 ns 脉冲激励时,Cassegrain 天线辐射场波形峰峰值为前馈式抛物面天线的 162%。

参考文献:

- [1] Prather W D, Baum C E, Lehr J M, et al. Ultra-wideband source and antenna research[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2000, 28(5):1624-1630.
- [2] Baum C E, Farr E G. Impulse radiating antennas, in ultra wideband/short-pulse electromagnetics[M]. New York: Plenum Press, 1993: 139-147.
- [3] 孟凡宝. 高功率半抛物面冲击脉冲辐射天线系统实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6):725-728. (Meng F B. Experimental investigation of half paraboloid impulse radiating antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(6):725-728)
- [4] Giri D V, Lacker N, Smith I D, et al. Design, fabrication and testing of a paraboloidal reflector antenna and pulser system for impulse-like waveforms[C]//IEEE 10th Pulsed Power Conference. 1995:56-64.
- [5] Farr E G, Baum C E. Impulse radiating antennas with two refracting or reflecting surfaces[C]//Sensor and Simulation Note 379. 1995.
- [6] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002:602-610. (Lin C L. Engineering manual of antenna. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002:602-610)
- [7] 吕善伟. 微波工程基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995:154-171. (Lü S W. The basics of microwave engineering. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1995:154-171)
- [8] Shlager K L. Accurate analysis of TEM horn antenna for pulse radiation[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1996, 38(3):414-422.
- [9] Farr E G, Baum C E. A simple model of small-angle TEM horns[C]//Sensor and Simulation Note 340. 1992.
- [10] Scheers B, Acheroy M, Vorst A V. Time-domain simulation and characterisation of TEM horns using a normalised impulse response[J]. *IEEE Trans on AP*, 2000, 147(6):463-468.

Cassegrain dual reflector antenna for UWB high power microwave

LIAO Yong¹, XIE Ping¹, LU Wei¹, CHEN Zhi-gang¹, YANG Zhou-bing¹, MENG Fan-bao¹, ZHOU Hai-jing²

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P.O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China;

2. Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P.O. Box 8009, Beijing 100088)

Abstract: A Cassegrain dual reflector antenna which consists of a TEM horn, a hyperbolical subreflector and a parabolic reflector, was developed to radiate high power UWB microwave. The Cassegrain dual reflector is formed by a 4.5 m parabolic reflector (the ratio of focal length to diameter is 0.4) and a 70 cm hyperbolical subreflector (focal length is 22.5 cm). The size and the F/D parameter of the parabolic single reflector antenna in experiment are the same as that of the dual reflector antenna. The gain of the Cassegrain dual reflector antenna and the parabolic single reflector antenna were simulated by FEKO program. The gain of the Cassegrain dual reflector is 1~2 dB higher than that of the parabolic single reflector at the frequency band between 0.2 GHz to 1.0 GHz, while the gain is 1~2 dB lower between 1.1 GHz to 1.5 GHz. Excited by a 960 ps pulse and a 3 ns pulse, the peak-peak value of radiation field waveform at 70 m on boresight of Cassegrain reflector antenna is 158% and 162% of that of the parabolic single antenna, respectively.

Key words: UWB high power microwave; Cassegrain dual reflector antenna; Parabolic reflector antenna; TEM horn

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>