

文章编号 1005-0388(2008)05-01003-06

超宽带脉冲天线研究综述*

李长勇^{1,2☆} 杨士中¹ 张承畅¹

(1. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400030; 2. 中国人民解放军重庆通信学院, 重庆 400035)

摘 要 对脉冲天线技术进行了讨论并回顾总结了它们的研究和技术发展状况, 主要包括脉冲天线的时域特征、脉冲天线的加载技术、高功率脉冲天线技术和超宽带平面天线技术几个方面。

关键词 脉冲天线; 加载天线; TEM 喇叭天线; 平面印刷天线; 电压驻波比带宽

中图分类号 TN820

文献标志码 A

Review of ultra-wide band pulse antenna

LI Chang-yong^{1,2} YANG Shi-zhong¹ ZHANG Cheng-chang¹

(1. College of Communication Engineering of chongqing university, Chongqing 400030, China;

2. College of Chongqing Communication of P. L. A. Chongqing 400035, China)

Abstract Recent development of the ultra-wide band pulse antenna, including the time-domain characteristics of pulse antenna, the loaded pulse antennas technology, high power pulse antennas technology, and Ultra-wideband planar antennas technology, etc., is discussed and reviewed in this paper.

Key words pulse antenna; loaded antenna; TEM horn antenna; planar-printed antenna; voltage stand wave ratio band

1 引 言

基于短脉冲技术的雷达是超宽带雷达的一种形式, 比其他形式的超宽带雷达如线性调频、伪随机编码、频率步进信号、随机噪声波雷达占有更宽的带宽, 这种直接发射脉冲的雷达又称为非正弦波雷达、基带雷达、视频脉冲雷达、时域雷达、无载波雷达等。这些雷达中的短脉冲多为冲激脉冲, 脉冲宽度在纳秒(ns)级或亚纳秒级, 频带宽度在吉赫兹(GHz)级, 比带宽(最高频率与最低频率之比)达 10:1, 这种频带对天线提高出了很高的要求。目前这种雷达在远距离对空目标探测上有一定的应用, 但由于功率有限使其作用距离有限, 但在地下目标探测中应用广泛, 如工程地质结构探测、道路下空洞及裂缝调查、埋设物探测、水坝的缺陷检测、隧道及堤岸探测

等^[1,2], 冲激雷达对非金属反步兵地雷的探测具有相当的优势。探地雷达最小探测深度可在几个厘米, 最大深度可在 30~50 m。

用于脉冲发射的天线有双锥天线或单锥天线, 以及其平面结构的领结天线, TEM 喇叭天线等, 为了更好地进行雷达接收后续信号处理及提高探测效果, 展宽天线的带宽、减小脉冲的失真是研究的一条主线。研究方法多是从时域进行, 通过对天线的脉冲激励, 观测天线的辐射电场的时域波形变化, 常用保真系数这一参数来表征脉冲信号的失真程度。时域有限差分法(FDTD)特别适合用于分析这种瞬态信号, 在这种天线研究中的应用最多; 矩量法(MOM)也可通过多次宽带频点的分析后用傅氏反变换也可得到时域波形。

脉冲天线不仅可用于雷达, 也可用于通信。

* 收稿日期: 2007-09-14.

基金项目: 重庆市院士基金(CSTC: 2008BC2001); 重庆大学研究生科技创新基金

(200801A1A0150274)

☆E-mail: lll_ccc_yyy@163.com
万方数据

UWB 通信技术近几年也是国内外的研究热点^[3]。在短距离高速率通信中有很好应用前景,如在个人无线局域网(WPAN)、家庭数字媒体流传输中的应用。UWB 通信技术有基于冲激脉冲(IR)和多波段(Multi-band)两种实现方式,FCC 在 2002 年发布的报告中指定其工作频段在 3.1~10.6 GHz,且辐射功率谱密度不大于-41 dBm/MHz^[4]。近几年来基于这种应用的超宽带天线的研究报道很多,可以说成为超宽带天线研究的另一主线。研究的目标是使天线辐射信号的带宽在这一频带内,且多为小型、低成本、可集成的印刷平面天线结构。

下文就脉冲天线的时域特性、天线的加载技术、高功率脉冲天线技术、平面天线技术几个方面进行了讨论,回顾总结了相应的研究状况。

2 脉冲天线多从时域特性进行研究

传统的窄带天线多从频域进行参数定义,如方向性、增益、辐射效率、输入阻抗、有效辐射口径等都是 在一定频率下的数值,这些参数可描述天线性能。超宽带脉冲天线又称为瞬态天线或时域天线,占有相当宽的频带,无法从某一频率下的参数描述天线特性,可以用天线传递函数来描述天线性能,如在整个宽频带内平坦的幅度响应和线性相位响应就认为好的性能;也可用类似窄带天线的参数来描述,但有所不同,多从能量不从功率角度来定义参数^[5],如把天线方向图定义为辐射信号的能量空间分布,成为发射能量图,而不是一般意义的场强(或功率)空间分布变图,这就考虑了信号的频谱特性和天线的发射传递函数。天线波瓣图上某点的值由峰值接收幅值与上升时间之比来计算,再归一化到最大波瓣值;波形保真系数作为脉冲天线性能的一个重要衡量参数,对发射天线保真系数定义为输入电压的时间导数与辐射场的互相关系数,对接收天线定义为人射场与接收电压的互相关系数,其值介于 0 到 1 之间。Allen 等人^[6]给出了时域天线参数的计算式,并以高斯脉冲作天线激励源,圆锥天线作发射天线,两种 TEM 喇叭作接收天线,测试比较了 TEM 喇叭天线的方向性、天线有效面积和波形保真性。喇叭天线在喇叭轴向有最大的辐射,波形保真性也最好,保真系数最大约为 0.85。

尽管时域天线参数有了计算式,但实验研究中不方便使用,基于现有的矢量网络分析仪和高速采样示波器等仪器,对这种天线的实验研究还是要从频域上考查 VSWR 带宽、增益、收发天线间的传递

函数等。在时域,采用 FDTD 可以对天线辐射脉冲波形进行模拟,大多文献给出了激励脉冲与响应波形的比较图,以考查波形保真度。也有时域近场方向图测试系统研制出来用于脉冲天线的测量^[7]。

3 天线加载技术展宽频带以提高脉冲辐射特性

线天线的带宽与其长粗之比有关,长粗之比越小,带宽越宽。天线加载提高带宽的原理是从天线的馈电端到天线末端的电阻以线性或指数关系增大变化,使得激励电流在天线上从馈电处到天线末端逐渐减小到零,消除天线馈电端与末端的多次反射(振铃),使天线上的电流为行波分布。天线的激励脉冲多为高斯脉冲或微分高斯脉冲形式,这种脉冲有很强的低频成分,提高天线的辐射带宽,特别是低频端的带宽可以减小辐射脉冲的失真,有利于接收机的接收。无反射式连续电阻加载天线的理论在 1965 年就由 T. T. Wu 等人提出^[8],文献^[9]比较全面地分析了五种加载模型技术对脉冲辐射单极子天线的时域波形、保真系数、反射系数、增益的影响,分析结果可知,基于“Wu-King”分布的电阻加载和阻容加载方式天线的反射最小且波形保真度最高。近几年国内也有不少这样的分析研究报道^[10-13]证实了加载展宽频带和减小波形失真,并对线单极子改进为球形、锥形或泪滴形天线结构。这些研究还多是停留在基于 FDTD 或 MOM 数值分析方法的理论分析上,实验研究或应用的文献还很少有见到。

双锥天线是能够用分离变量法求解波动方程的一种天线形式,无限长的锥形天线具有很好的宽带特性,很多实验中用此天线作发射参考天线。但实际应用中长度有限,引起终端的不连续而降低了阻抗带宽,也可采用加载方法,为减轻锥体重量,可采用金属网状结构,双锥天线在小型便携式移动设备中应用不方便。

偶极天线的传递函数相位特性具有近似线性,通过加载技术可以提高幅频特性带宽^[14,15]。文献^[16]报道了用于冲激脉冲探地雷达的“背载”式电阻加载天线的实验研究,证明了加载天线提高了系统性能。由于天线加载增加了能量的损耗,降低了天线的效率,为提高天线加载效率,有学者将“Wu-King”的线性电流分布扩展为双指数电流分布^[17],理论分析表明有利提高天线效率。

不仅线天线可以进行加载,具有平面金属板结构的 天线如 TEM 喇叭天线或领结(bow-tie)天线也

可进行加载。TEM喇叭天线的加载方式可以是沿平板向外整个平板电阻值呈指数规律增大分布^[18],或在金属平板外扩展一段有分布电阻加载的平板一起构成喇叭两臂^[19]。加载电阻可以是连续分布或集总电阻的离散分布^[20]。文献[21]也研究了在TEM两臂间填充介电材料方法提高了天线增益和VSWR带宽,文献[22]设计了一种TEM喇叭天线,把喇叭臂延长并弯折回馈电处,再放置反射背板以提高辐射效率。领结天线在探地雷达中应用最为广泛,可看成是双锥天线的平面形式,其两平面三角臂也可采用相同的方式进行加载,也有在领结天线的金属表面刻划出一条条的缝隙形成电容加载效果^[23],或再在缝隙上跨接集总贴片电阻形成阻容加载效果,周游等人^[24]设计了这种领结天线并进行探地雷达应用测试,100~1300 MHz的测试范围内VSWR<2.5,脉冲最大拖尾为主峰值的20%,证实了天线的良好时域性能。为提高效率,有研究者设计出用13条线元代替三角形金属臂的线型领结天线^[25]。

4 高效率、小型化是超宽带高功率脉冲天线研究热点

在高功率超宽带脉冲辐射中,TEM喇叭天线应用最广泛,也出现了以TEM喇叭为馈源的介质凸镜天线以及TEM喇叭为馈源的抛物反射面天线等高功率超宽带电磁脉冲辐射装置,这种天线几何尺寸较大。

TEM喇叭天线是由平行平板传输线张开成喇叭面形成,具有沿轴向外的辐射方向性。在军事上有重要应用价值,如高功率微波武器、脉冲雷达、电子对抗等。人们从阻抗匹配的观点、口径辐射的观点、低频补偿的观点等不同设计思想提出了不同的TEM喇叭天线结构形式:‘柳叶’型TEM喇叭天线、恒阻抗TEM喇叭天线及加脊TEM喇叭天线。‘柳叶’TEM喇叭天线其喇叭面呈柳叶形以得到从馈电处的50Ω到自由空间的377Ω指数型阻抗过渡,实现馈电脉冲无反射地辐射;恒阻抗TEM喇叭逐渐变宽的喇叭面的宽度与张开的距离之比保持恒定;加脊喇叭是在喇叭内的金属臂上加上金属脊线。这类天线的效率不高,刘小龙^[26]研制了一套高功率超宽带辐射系统并进行了全面的测试,−12 dB频谱宽度为151~1200 MHz,分析计算天线的辐射效率约为37%。孟凡宝^[27]研究了高功率同轴双锥天线的脉冲辐射特性,天线的VSWR小于4时低频

端可达到150 MHz,辐射功率大于100 MW,天线的功率效率约为65%,喇叭圆锥长70多厘米。

提高天线的辐射效率和减小天线馈电处的反射是这种高功率天线研究的目标。从频域的观点看,对于低频分量,同样条件下辐射能力较差。为减小辐射波形失真和防止反射脉冲可能造成脉冲产生装置的损坏,增加脉冲信号的低频辐射能力是一种提高效率减少反射的有效方法。喇叭内加脊可增加低频辐射能力^[28~31];采用电—磁振子组合型也可提高低频段的辐射能力^[32,33],电—磁振子组合型设计思想是将TEM喇叭视为电偶极子,用良导体或者用适当加载的导体从侧后方将喇叭连接成为一磁偶极子以增强低频辐射;还有一种办法是在TEM喇叭末端附加一段弧面,依靠电子运动轨迹改变,使低频电流进一步产生辐射^[34]。在喇叭两臂间放置介质材料也能降低截止频率^[21]。一种平面结构的TEM喇叭天线被设计并作为天线阵单元使用^[35],这有利于减小天线重量和体积,工作频带在0.15~1.75 GHz内。

5 基于短程通信应用超宽带天线成为另一研究热点

2002年2月14日美国联邦通信委员会(FCC)批准在3.1~10.6 GHz频段作为短距离高速率超宽带通信商业应用,这使超宽带平面天线成为一个研究热点,近几年,国内外有大量这方面的天线设计研究报道^[36]。这类天线一般由覆在介质基片同侧或两侧的金属贴片和导体地板(电路印制板)构成,可以是单极天线结构或双极天线结构,多是采用微带线馈电^[37~39]或共面波导馈电^[40,41],这类天线低成本、小尺寸(几个厘米长或宽)、小功率应用,以便与系统的其他电路集成,这种结构天线在微机电系统(MEMS)上也可应用。为了展宽频带,可以选择不同介电常数的介质基片或改变金属贴片的形状,如方形、圆形、椭圆形。Edward Lule^[42]设计的平面菱形天线在VSWR<2时的带宽可在2.57~13.72 GHz,具有全向辐射特性,天线输入阻抗与方向性随频率的变化很小。一种方形平面双极天线^[43]可在0.5~2.7 GHz频带上有低反射系数。J. Liang等^[44]设计的圆形贴片印刷单极天线阻抗带宽超过5.3:1, S11≤−10 dB的频率范围从2.27 GHz到12 GHz以上。J. Jung等^[45]设计的超宽带印刷单极天线在其单极贴片上有梯形过渡,地板上开了矩形槽,这相当于在贴片单元与地板之间增加一个匹

配网络,从而展宽了天线的带宽。该天线的尺寸只有 $16 \times 18 \text{ mm}^2$, 覆盖频率范围 $3.1 \sim 11 \text{ GHz}$ 。

同时,在印制板上设计金属缝隙的缝隙印刷天线也得到了大量的研究,通过改变缝隙形状和采用不同的馈电结构来展宽阻抗带宽,实现超宽带特性。P. Li 等^[46]设计的椭圆形缝隙天线带宽可在 $2.6 \sim 10.6 \text{ GHz}$, 在 $3 \sim 10 \text{ GHz}$ 的 H 面方向性具有全向特性,在 E 面方向性随频率增加而增强。采用 U 型微带馈源的印刷缝隙天线,在矩形缝隙的中间增加了一个矩形贴片并与地板连接,测得该天线的阻抗带宽为 111% ^[47]。通过在微带馈线的一侧加一矩形铜片,以调节天线的端口阻抗来增大阻抗带宽,该天线的阻抗带宽可达 135.7% , 覆盖频率范围 $2.3 \sim 12 \text{ GHz}$ ^[48]。

为了避免 UWB 通信对其他通信系统的干扰,如工作频带为 $5.15 \sim 5.825 \text{ GHz}$ 的 IEEE 802.11a, 又有不少天线被设计成具有这一频带带阻特性,他们通过在单极金属贴片上开槽^[49,50]或引入寄生振子^[51]方式来实现带阻功能。

6 结论

无线通信技术的发展也推动着天线技术的发展,特别是近几年的 UWB 通信技术促使了相应天线技术的发展。天线的小型化,高效率,在宽频带内的全方向性是天线研究的主要问题,在某一具体的应用系统中可能对天线的某一性能指标有更好的要求,并以降低其它指标为代价。只有针对具体的应用环境进行合理的设计才是最佳的选择。此外,超宽带脉冲天线的馈电问题;脉冲天线参数的测量问题,如时域近场测量等方面也值得进一步研究。

参考文献

- [1] Adrian Neal. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress [J]. Earth-Science Reviews 2004, 66: 261-330.
- [2] 陈义群, 肖柏勋. 论探地雷达现状与发展 [J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(2): 149-155.
- [3] R J Fontana. Recent System Applications of Short-Pulse Ultra-Wideband Technology [J]. IEEE Microwave Theory and Tech., 2004, 52(9): 2087-2090.
- [4] FCC 02-48. FIRST REPORT AND ORDER[R]. Adopted: 2002, February 14, Released: 2002, April 22, 5.
- [5] David Lamensdorf, Leon Susmad. Baseband- Pulse-Antenna Techniques [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1994, 36(1): 20-30.
- [6] Oliver E Allen, David A. Hill. Time-Domain Antenna Characterizations [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(3): 339-346.
- [7] WANG Nan, XUE Zheng-hui, YANG Shing-ming. Antenna Time Domain Planar Near Field Measurement System [J]. International Journal on Wireless and Optical Communications, 2006, 3(2): 127-133.
- [8] T T WU, R W P King. The Cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading [J]. IEEE transactions and propagation, 1964, 12(3): 369-373.
- [9] T P Montoya, G S Smith. A study of pulse radiation from several broad-band loaded monopole [J]. IEEE Trans. on AP, 1996, 44(8): 1172-1182.
- [10] 吴昌英, 张璐, 许家栋. 加载单极子天线的时域辐射特性 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 296-299. Wu C Y, Zhang L, Xu J D. The time domain radiation characteristics of loaded monopole [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(3): 296-299.
- [11] 王敏男, 马兴峰. 连续电阻加载偶极天线的电流分布 [J]. 河南职业技术学院学报, 2002, 20(3): 45-48.
- [12] 毛从光, 周辉. 两种分布加载电磁脉冲天线的 FDTD 方法模拟 [J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(4): 357-360.
- [13] 岳欣, 康行健, 费元春. 球形和锥形加载单极子天线的宽带特性研究 [J]. 微波学报, 2000, 16(4): 329-335.
- [14] 黄冶, 尹成友. FDTD analysis of transient radiation from Wu-King resistive dipole antenna [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(1): 105-108.
- [15] ZHANG Chun-qing, ZOU Wei-xia. Radiation Characteristics of Arm-folded Dipole Antenna Loaded Parallel Dielectric [J]. Radio Engineering, 2006, 36(8): 34-36.
- [16] 邓扬建. 冲激脉冲探地雷达天线的实验研究 [J]. 电子科学学刊, 1995, 17(6): 647-650.
- [17] 郭玉春, 史小卫. 高效电阻加载天线理论研究 [J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 276-280. Guo Y C, Shi X W. Theoretical study of high efficiency resistive loading antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(2): 276-280.
- [18] Motohisa Kanda. The effects of resistive loading of "TEM" Horn [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1982, 24(2): 245-255.
- [19] 余春, 郭华民. 用于瞬态电磁场测量的宽带脉冲天线 [J]. 电波科学学报, 1997, 12(2): 190-194. Yu C, Guo H M. A wideband impulse antenna for

- transient electromagnetic field measurements [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1997, 12(2): 190-194.
- [20] 刘立业, 梁毅, 刘克成等. 一种新型探地雷达天线的 FDTD 分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 654-657.
- [21] Ahmet Serdar Turk. Ultra-wideband Vivaldi Antenna Design for Multisensor Adaptive Ground-Penetrating Impulse Radar [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(5): 834-839.
- [22] Vitaliy Prokhorenko, Volodymyr Ivashchuk, and Sergiy Korsun. Improvement of Electromagnetic Pulse Radiation Efficiency [J]. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2005, 6(2): 107-123.
- [23] A A Lestari, A G Yarovoy, L P Ligthart. Capacitively-tapered Bowtie Antenna [C]. Proc. (CD-ROM) Millennium Conference on Antenne & Propagat. (AP 2000), Davos, Switzerland, Apr. 2000.
- [24] 周游, 潘锦, 聂在平. 时域背腔式馈结天线的工程化设计[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(1): 1-3.
- [25] A A Lestari, A B Suksmono, E Bharata. Small UWB Antenna With Improved Efficiency for Pulse Radiation [C]. Proc. the international workshop on Antenna Technology, 2005, pp. 295-298.
- [26] 刘小龙. 超宽带高功率脉冲天线研究[D]. 西安交通大学博士学位论文, 2003.
- [27] 孟凡宝, 杨周炳, 吴文涛等. 高功率超宽带同轴双锥天线的设计和实验[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(2): 245-247.
- [28] Cohn S B. Properties of the Ridge Wave Guide [J]. Proc. IRE, 1947, 35(8): 783-788.
- [29] Chen, T-S. Calculation of the parameters of Ridge wave guides [J]. IRE Trans. Microwave Theory Tech, 1957, 5(1): 12-17.
- [30] 刘培国, 刘克成, 何建国. 新型圆锥加脊 TEM 喇叭天线的分析[J]. 微波学报, 1996, 12(3): 225-227.
- [31] 袁乃昌, 何建国等. 集成鳍线为脊的新型圆锥及方锥 TEM 喇叭及其在目标瞬态特性中的应用[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 115-117.
- [32] 廖勇, 张秦岭等. TEM 喇叭天线低频补偿实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1247-1250.
- [33] 刘锋, 樊亚军, 张雪霞. 电-磁振子组合型小型化超宽带天线研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(8): 1037-1040.
- [34] Kragalot. Inline coaxial balun fed ultrawidenband cornu flared horn antenna [P]. patent application, Navy case No. 78.290.
- [35] Wu F T, Zhang G F, Yang X L, *et al.*. Research on Ultra-wideband Planar Vivaldi Antenna Array [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(10): 2117-2120.
- [36] 钟顺时, 梁仙灵, 延晓荣. 超宽带平面天线技术[J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 308-315.
- Zhong S S, Liang X L, Yan X R. UWB planar antenna technology [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(2): 308-315.
- [37] 姚凤薇, 钟顺时. 新型带扇形馈源的宽带缝隙天线[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 675-677.
- Yao F W, Zhong S S. A new broadband slot antenna with a fan-shaped microstrip feed [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 675-677.
- [38] 陈董, 程崇虎. 宽缝结构超宽带天线的研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 72-75.
- [39] 程勇, 吕文俊, 程崇虎等. 一种小型平面超宽带天线的设计与研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(4): 582-585.
- Cheng Y, Lü W J, Cheng C H, *et al.*. Design and analysis of a compact planar ultra-wideband antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(4): 582-585.
- [40] 白晓锋, 钟顺时, 梁仙灵. 翼形地板超宽带印刷天线[J]. 上海大学学报, 2006, 12(2): 125-128.
- [41] 汪伟, 钟顺时, 陈胜兵. 宽带共面波导馈电“ Δ ”形单极天线[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2005, 32(2): 323-326.
- [42] Edward Lule, Tadeusz Babi, Kazimierz Siwiak. Diamond Dipole Antenna for Ultra-wideband [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 46(6): 536-538.
- [43] Young-Jin Park, Jong-Hwa Song. Development of Ultra-wideband Planar Stepped-fat Dipole Antenna [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(9): 1698-1701.
- [44] J Liang and L Guo. CPW-fed Circular Disc Monopole Antenna for UWB Applications [J]. IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials [C]. Singapore, 2005: 505-508.
- [45] J H JUNG, W Y CHOI, J H CHOI. A small wideband Microstrip-fed Monopole Antenna [J]. IEEE Microwave and Wireless Component Letters, 2005, 15(10): 703-705.
- [46] P Li, J Liang, X Chen. Ultra-wideband Elliptical Slot Antenna Fed by Tapped Microstrip Line With U-Shaped Tuning Stub [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 47(2): 140-143.

- [47] S Sadat, M Fardis. A compact microstrip square-ring slot antenna for UWB applications [C]. IEEE Antennas Propagat. Symp., Albuquerque, New Mexico, 2006, 4629-4633.
- [48] D C Chang, J C Liu, M Y Liu. Improved U-shaped stub rectangular slot antenna with tuning pad for UWB applications [J]. Electron. Lett., 2005, 41(20): 1095-1097.
- [49] Chih-Yu Huang, Wei-Chun Hsia, Jieh-Sen Kuo. Planar Ultra-wideband Antenna with a Band-notched Characteristic [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(1): 99-101.
- [50] Jung N L, Jong K P. Impedance Characteristics of Trapezoidal Ultra-wideband Antennas With a Notch Function [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 46(5): 503-506.
- [51] K H Kim, Y J Cho, S H Wang, *et al.*. Band-notched UWB planar monopole antenna with two parasitic patches [J]. Electron. Lett., 2005, 41(14): 783-785.



李长勇 (1971—), 男, 重庆人, 博士生, 主要研究方向为超宽带通信及超宽带天线技术。



杨士中 (1937—), 男, 重庆人, 中国工程院院士, 重庆大学教授, 博士生导师, 国家 985 工程“运载器测控及遥感信息传输技术”重点实验室首席科学家。



张承畅 (1975—), 男, 湖北人, 博士生, 主要研究方向通信与测控技术。

(上接第 1002 页)



王安国 (1958—), 男, 山西人, 天津大学电子信息工程学院教授, 博士, 中国电子学会高级会员。1981 年毕业于南京工学院(现东南大学)无线电工程系, 获学士学位。1990 年毕业于天津大学电子工程系, 获硕士学位。2001 年于天津大学获博士学位。1996 年至今, 在天津大学电子信息工程学院任教。在国内外学术刊物与会议上发表学术论文 30 余篇。主要研究方向为微波集成电路设计和天线设计。
E-mail: agwang@tju.edu.cn



张佳杰 (1984—), 男, 天津人, 天津大学通信与信息系统专业硕士生, 主要研究方向为无线通信及基带处理与天线协同。

作者: [李长勇](#), [杨士中](#), [张承畅](#), [LI Chang-yong](#), [YANG Shi-zhong](#), [ZHANG Cheng-chang](#)
作者单位: [李长勇, LI Chang-yong \(重庆大学通信工程学院, 重庆, 400030; 中国人民解放军重庆通信学院, 重庆, 400035\)](#), [杨士中, 张承畅, YANG Shi-zhong, ZHANG Cheng-chang \(重庆大学通信工程学院, 重庆, 400030\)](#)
刊名: [电波科学学报](#)   
英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE](#)
年, 卷(期): 2008, 23 (5)
被引用次数: 6次

参考文献(51条)

1. [Adrian Neal](#) [Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress](#) [外文期刊] 2004
2. [陈义群; 肖柏勋](#) [论探地雷达现状与发展](#) [期刊论文] - [工程地球物理学报](#) 2005 (02)
3. [R J Fontana](#) [Recent System Applications of Short-Pulse Ultra-Wideband Technology](#) [外文期刊] 2004 (09)
4. [FCC 02-48](#). FIRST REPORT AND ORDER 2002
5. [David Lamensdorf; Leon Susmad](#) [Baseband-Pulse-Antenna Techniques](#) 1994 (01)
6. [Oliver E Allen; David A. Hill](#) [Time-Domain Antenna Characterizations](#) [外文期刊] 1993 (03)
7. [WANG Nan; XUE Zheng-hui; YANG Shing-ming](#) [Antenna Time Domain Planar Near Field Measurement System](#) [外文期刊] 2006 (02)
8. [T T WU; R W P King](#) [The Cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading](#) [外文期刊] 1964 (03)
9. [T P Montoya; G S Smith](#) [A study of pulse radiation from several broad-band loaded monopole](#) [外文期刊] 1996 (08)
10. [吴昌英; 张璐; 许家栋](#) [加载单极子天线的时域辐射特性](#) [期刊论文] - [电波科学学报](#) 2002 (03)
11. [王敏男; 马兴峰](#) [连续电阻加载偶极天线的电流分布](#) [期刊论文] - [河南职业技术师范学院学报](#) 2002 (03)
12. [毛从光; 周辉](#) [两种分布加载电磁脉冲天线的FDTD方法模拟](#) [期刊论文] - [核电子学与探测技术](#) 2003 (04)
13. [岳欣; 康行健; 费元春](#) [球形和锥形加载单极子天线的宽带特性研究](#) [期刊论文] - [微波学报](#) 2000 (04)
14. [黄冶; 尹成友](#) [FDTD analysis of transient radiation from Wu-King resistive dipole antenna](#) [期刊论文] - [强激光与粒子束](#) 2006 (01)
15. [ZHANG Chun-qing; ZOU Wei-xia](#) [Radiation Characteristics of Arm-folded Dipole Antenna Loaded Parallel Dielectric](#) [期刊论文] - [Radio Engineering of China](#) 2006 (08)
16. [邓扬建](#) [冲激脉冲探地雷达天线的实验研究](#) 1995 (06)
17. [郭玉春; 史小卫](#) [高效电阻加载天线理论研究](#) [期刊论文] - [电波科学学报](#) 2007 (02)
18. [Motohisa Kanda](#) [The effects of resistive loading of "TEM" Horn](#) [外文期刊] 1982 (02)
19. [余春; 郭华民](#) [用于瞬态电磁场测量的宽带脉冲天线](#) 1997 (02)
20. [刘立业; 梁毅; 刘克成](#) [一种新型探地雷达天线的FDTD分析](#) [期刊论文] - [电子与信息学报](#) 2006 (04)
21. [Ahmet Scrdar Turk](#) [Ultra-wideband Vivaldi Antenna Design for Multisensor Adaptive Ground-Penetrating Impulse Radar](#) [外文期刊] 2006 (05)
22. [Vitaliy Prokhorenko; Volodymyr Ivashchuk; Scrgiy Korsun](#) [Improvement of Electromagnetic Pulse Radiation Efficiency](#) [外文期刊] 2005 (02)
23. [A A Lestari; A G Yarovoy; L P Lighthart](#) [Capacitively-tapered Bowtie Antenna](#) 2000

24. [周游;潘锦;聂在平 时域背腔式领结天线的工程化设计](#)[期刊论文]-[电子科技大学学报](#) 2005(01)
25. [A A Lestari;A B Suksmono;E Bharata Small UWB Antenna With Improved Efficiency for Pulse Radiation](#) 2005
26. [刘小龙 超宽带高功率脉冲天线研究](#)[学位论文] 2003
27. [孟凡宝;杨周炳;吴文涛 高功率超宽带同轴双锥天线的设计和实验](#)[期刊论文]-[强激光与粒子束](#) 1999(02)
28. [Cohn S B Properties of the Ridge Wave Guide](#) 1947(08)
29. [Chen T-S Calculation of the parameters of Ridge wave guides](#)[外文期刊] 1957(01)
30. [刘培国;刘克成;何建国 新型圆锥加脊TEM喇叭天线的分析](#) 1996(03)
31. [袁乃昌;何建国 集成鳍线为脊的新型圆锥及方锥TEM喇叭及其在目标瞬态特性中的应用](#)[期刊论文]-[电子学报](#) 1999(06)
32. [廖勇;张秦岭 TEM喇叭天线低频补偿实验研究](#)[期刊论文]-[强激光与粒子束](#) 2005(08)
33. [刘锋;樊亚军;张雪霞 电-磁振子组合型小型化超宽带天线研究](#)[期刊论文]-[强激光与粒子束](#) 2004(08)
34. [Kragalot Inline coaxial balun fed ultrawidenband cornu flared horn antenna](#)
35. [Wu F T;Zhang G F;Yuang X L Research on Uhra-wideband Planar Vivaldi Antenna Array](#)[外文期刊] 2006(10)
36. [钟顺时;梁仙灵;延晓荣 超宽带平面天线技术](#)[期刊论文]-[电波科学学报](#) 2007(02)
37. [姚凤薇;钟顺时 新型带扇形馈源的宽带缝隙天线](#)[期刊论文]-[电波科学学报](#) 2005(05)
38. [陈董;程崇虎 宽缝结构超宽带天线的研究](#)[期刊论文]-[南京邮电大学学报\(自然科学版\)](#) 2006(02)
39. [程勇;吕文俊;程崇虎 一种小型平面超宽带天线的设计与研究](#)[期刊论文]-[电波科学学报](#) 2006(04)
40. [白晓锋;钟顺时;梁仙灵 翼形地板超宽带印刷天线](#)[期刊论文]-[上海大学学报](#) 2006(02)
41. [汪伟;钟顺时;陈胜兵 宽带共面波导馈电“ \$\Delta\$ ”形单极天线](#)[期刊论文]-[西安电子科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2005(02)
42. [Edward Lule;Tadeusz Babi;Kazimierz Siwiak Diamond Dipole Antenna for Uhra-wideband](#)[外文期刊] 2005(06)
43. [Young-Jin Park;Jong-Hwa Song Development of Ultra-wideband Planar Steppe&fat Dipole Antenna](#)[外文期刊] 2006(09)
44. [J Liang;L Guo CPW-fed Circular Disc Monopole Antenna for UWB Applications](#) 2005
45. [J H JUNG;W Y CHOI;J H CHOI A small wideband Microstrip-fed Monopole Antenna](#)[外文期刊] 2005(10)
46. [P Li;J Liang;X Chen Ultra-wideband Elliptical Slot Antenna Fed by Tapped Microstrip Line With U-Shaped Tuning Stub](#)[外文期刊] 2005(02)
47. [S Sadat;M Fardis A compact microstrip square-ring slot antenna for UWB applications](#) 2006
48. [D C Chang;J C Liu;M Y Liu Improved U-shaped stub rectangular slot antenna with tuning pad for UWB applications](#)[外文期刊] 2005(20)
49. [Chih-Yu Huang;Wei-Chun Hsia;Jieh-Sen Kuo Planar Ultra-wideband Antenna with a Band-notched Characteristic](#)[外文期刊] 2006(01)
50. [Jung N L;Jong K P Impedance Characteristics of Trapezoidal Ultra-wideband Antennas With a Notch Function](#) 2005(05)
51. [K H Kim;Y J Cho;S H Wang Band-notched UWB planar monopole antenna with two parasitic patches](#)[外文

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>