

文章编号:1007-2861(2007)04-0337-07

阻抗带宽超过 21:1 的印刷单极天线

钟顺时¹, 梁仙灵¹, 张丽娜¹, 汪伟²

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 华东电子工程研究所, 合肥 230031)

摘要: 介绍一种具有极宽带特性的印刷单极天线, 该天线由椭圆单极贴片和共面的梯形导体地板组成, 通过位于地板中央的渐变共面波导来馈电。仿真和实验结果表明, 该天线获得了 21.6:1 的比带宽($VSWR \leq 2$), 覆盖频率范围 0.41~8.86 GHz, 并具有良好的全向辐射特性, 而其面积仅为 $0.19\lambda_1 \times 0.16\lambda_1$ (λ_1 为最低工作频率时的波长)。

关键词: 印刷单极天线; 超宽带; 渐变共面波导; 梯形地板; 小型化

中图分类号: TN 82 文献标识码: A

Printed Monopole Antenna with Impedance Bandwidth Exceeding 21:1

ZHONG Shun-shi¹, LIANG Xian-ling¹, ZHANG Li-na¹, WANG Wei²

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China)

Abstract: A printed monopole antenna with an extremely-wide bandwidth is proposed, which consists of an elliptical monopole patch and a coplanar trapezoid ground plane. A tapered coplanar waveguide (CPW) feeder in the middle of the ground plane is used to feed the monopole. The simulated and experimental results demonstrate that this antenna achieves a ratio bandwidth of 21.6:1 for $VSWR \leq 2$, covering the frequency range from 0.41 to 8.86 GHz. It has good omni-directional radiation characteristics, with a small area of only about $0.19\lambda_1 \times 0.16\lambda_1$, where λ_1 is the wavelength of the lowest operating frequency.

Key words: printed monopole antenna; super-wideband (SWB); tapered CPW; trapezoid ground plane; miniaturization

随着高速集成电路的快速发展, 电子战系统向多功能一体化、小型集成化、模块化、智能化的方向不断迈进。传统的超宽带天线如等角螺旋天线、对数周期天线、加脊喇叭天线以及锥形天线等, 由于其复杂的结构和庞大的体积已经无法与现代化的高集成系统相结合, 而采用平面超宽带天线可以大大减小系统的体积, 简化其结构, 降低其成本。2002年来超(特)宽带(UWB)短程通信的兴起更促进了平面超宽带天线的发展。因此, 近年来超宽带平面天线的研究

受到了广泛的青睐。带宽超过 10:1 的超宽带(SWB)平面天线大致可以分成 3 类:(1) 超宽带平板单极天线, 如矩形平板单极天线、圆盘或椭圆盘单极天线等, 结合偏置馈电、双点或多点馈电以及短路和切角技术等方法可获得超过 10:1 的阻抗带宽(驻波比 $VSWR \leq 2$)^[1-3]。S.Y. Suh 等设计了平板倒锥单极天线^[2], 其基本原理与单圆锥天线类似, 该天线的驻波比带宽超过 10:1。我们课题组曾设计了一副叶片形的平板单极天线, 并在叶片形平板上开了 3 个圆

收稿日期: 2007-02-08 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60571053); 上海市重点学科建设资助项目(T0102)

通信作者: 钟顺时(1939~), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代天线理论与技术。E-mail: shshzhong@163.com

孔^[3],该单极天线的驻波比带宽超过 22:1,覆盖频率范围 1.3~29.7 GHz.超宽带平板单极天线虽然其本身结构近似为平面形式,但这类天线一般需要一个与之垂直的导体地板.(2)超宽带印刷缝隙天线,如 J.D.S. Langley 等提出的双面反相指数渐变印刷缝隙天线^[4],能够覆盖频率范围 1.3~20 GHz,其比带宽达到 15:1. E.S. Angelopoulos 等设计的共面波导馈电椭圆形印刷缝隙天线,其比带宽也可达到 15:1^[5].(3)超宽带印刷单极天线,一般由附在介质基片同侧或两侧的单极贴片和导体地板构成,单极贴片由位于地板中央的微带线或共面波导馈电,通过选择单极贴片的形状如心形、U 形、椭圆形、扇形等,或者在地板上开槽通过改善匹配来获得较宽的驻波比带宽,其比带宽在 3:1~7:1 左右^[6-7].D.C. Chang 等在矩形地板和 U 形贴片之间切成斜坡的形式,获得 4.5:1 的驻波比带宽,覆盖频率范围 3.8~18.2 GHz^[6].我们课题组曾采用梯形地板结构设计了矩形单极天线,获得驻波比带宽超过 6.3:1,覆盖频率范围 0.59~3.72 GHz^[8].

本文将在文献[8]的基础上,介绍不同共面波导(CPW)馈线的特性阻抗对天线驻波比带宽的影响,从而引入渐变的共面波导设计,可将天线的驻波比带宽扩展到 10.7:1(提高约 1.7 倍).然后采用优化尺寸的椭圆形单极贴片,使天线的带宽获得进一步展宽,驻波比带宽达到 21.6:1(进一步提高约 2 倍).该天线具有良好的全向辐射特性,而且天线面积较小.

1 天线设计与仿真结果

1.1 基本结构

传统的盘锥天线由导体圆锥上加导体圆盘构成,采用同轴线馈电,同轴线的外导体与圆锥的锥顶相连接,而同轴线的内导体与圆盘相连接.梯形地板印刷单极天线的结构类似于盘锥天线的横截面,相当于将盘锥天线平面化(如图 1(a)所示),矩形单极贴片相当于盘锥天线的圆盘,梯形的共面地板相当于盘锥天线的圆锥体,而地板中央的共面波导对应于同轴线.矩形单极贴片长为 a ,宽为 b ;导体地板为一等腰梯形结构,其顶边宽度为 D_{\min} ,底边宽度为 D_{\max} ,高度为 H ;地板与矩形单极贴片的间隔为 t ;共面波导位于导体地板的正中,导带宽度为 w ,与矩形单极贴片相连接,导带与地板的间隙为 g .

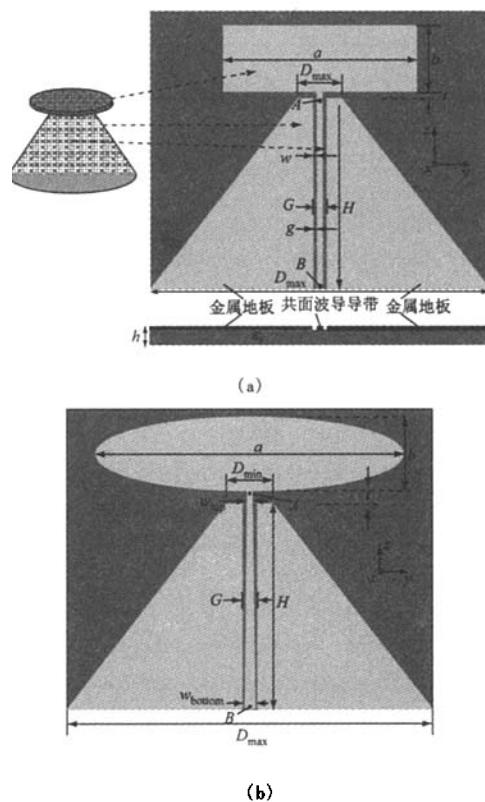


图 1 梯形地板印刷单极天线

Fig.1 Printed monopole antenna with a trapezoid ground plane

文献[8]已对上述结构天线进行尺寸优化,获得最佳的实测 VSWR≤2 比带宽为 6.3:1.为了进一步展宽这种天线的带宽,下面对共面波导馈线进行分析.

1.2 共面波导馈线

共面波导的特性阻抗可由下式表示^[9]:

$$Z_0 = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)}, \quad (1)$$

$K(k)$ 为勒让德第一类椭圆积分, ϵ_{eff} 为共面波导介质板等效相对介电常数,可表示为

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \frac{K(k_1)K(k'_0)}{K(k'_1)K(k_0)}, \quad (2)$$

式中,

$$k_0 = \frac{w}{G}, \quad k'_0 = \sqrt{1 - k_0^2},$$

$$k_1 = \frac{\text{sh}\left(\frac{\pi w}{4h}\right)}{\text{sh}\left(\frac{\pi G}{4h}\right)}, \quad k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2}, \quad G = 2g + w.$$

可见,共面波导的特性阻抗由介质基片的相对介电常数 ϵ_r 、厚度 h 、导带宽度 w 及导带与地板之间的间隙 g 共同决定。对选定的介质基片($h = 1.524\text{ mm}$, $\epsilon_r = 3.48$),保持两地板之间的总间隔 $G = 2g + w = 3\text{ mm}$ 不变,选取不同的导带宽度 w (取为2.7、2.2、1.0和0.4 mm,对应的共面波导特性阻抗分别为44、61、99和134 Ω),求得采用不同共面波导馈电时的驻波比带宽如表1所示。这里及后面的仿真计算都是利用基于有限积分法(FIT)的软件CST Microwave Studio完成的。分析发现,如果用不同特性阻抗的共面波导馈电,要获得较好的匹配,还需相应地改变 D_{\min} ,故表1中 D_{\min} 也有相应变化。由表1看出:共面波导馈线的特性阻抗从44 Ω增大到99 Ω时,天线的驻波比带宽从5:1增大到12:1,当继续增大共面波导的特性阻抗时,天线的驻波比带宽开始略微下降。因而,采用特性阻抗约100 Ω($w = 1.0\text{ mm}$)的共面波导来馈电,可获得较宽的驻波比带宽。

表1 共面波导馈线的特性阻抗对天线带宽的影响

Tab.1 Effect of characteristic impedance of CPW feeder on antenna bandwidth

编号	w/mm	D_{\min}/mm	Z_{CPW}/Ω	比带宽(VSWR≤2)
1	2.7	20	44	5.1:1
2	2.2	14	61	7.4:1
3	1.0	9	99	12:1
4	0.4	6	134	11.8:1

注: $a = 70$, $b = 30$, $t = 2.3$, $D_{\max} = 140$, $H = 75$ (单位mm)

上述结果表明,在共面波导馈线终端(A点)处的天线输入阻抗约为100 Ω。然而,实际天线的端口是接50 Ω的同轴接头,为此,我们采用渐变的形式来实现共面波导特性阻抗从50 Ω到100 Ω的平滑过渡。我们保持两地板总间隔不变,即 $G = 2g + w =$

3 mm不变,将导带顶部(A点)宽度取为 $w_{\text{top}} = 1\text{ mm}$ (99 Ω),导带底部(B点)宽度取为 $w_{\text{bottom}} = 2.7\text{ mm}$ (50 Ω),而将A点至B点间的导带宽度作线性渐变。该渐变结构如图1(b)中所示。这样设计的矩形单极天线的仿真和测试结果^[10]与原设计的比较如表2所示。可见,采用渐变的共面波导馈电,实测的阻抗带宽达到10.7:1,约为原先的 $10.7/6.3 = 1.7$ 倍。

表2 矩形单极天线的阻抗带宽比较

Tab.2 Comparison of impedance bandwidth of rectangular monopole antennas

馈线结构	VSWR≤2 频率范围		比带宽(VSWR≤2)	
	计算值/GHz	测试值/GHz	计算值	测试值
50 Ω CPW	0.64~3.46	0.59~3.72	5.4:1	6.3:1
渐变的 CPW	0.83~8.17	0.76~8.15	9.8:1	10.7:1

1.3 椭圆单极贴片

为进一步展宽阻抗带宽,用椭圆单极贴片来代替矩形单极贴片(如图1(b)所示)。计算和加工了3副不同轴比的椭圆单极天线,短轴 b 固定为30 mm,长轴 a 取为30、60和120 mm,对应于轴比1:1、2:1和4:1,其计算与实测的阻抗带宽如表3所示。可见,当长轴 a 由30 mm增大到120 mm时,计算的天线最低工作频率由0.9 GHz下降到0.4 GHz,最高工作频率基本保持在9.5 GHz;测试的最低工作频率由0.79 GHz降低到0.41 GHz,最高工作频率保持在8.9 GHz左右。而当 a 进一步增大到180 mm时,计算的最低工作频率仍在0.4 GHz左右,但在1.35~1.66 GHz范围内驻波比变差,说明 a 并不是越大越好。采用优化的 $a = 120\text{ mm}$ 椭圆形单极贴片,可使天线的驻波比带宽增大到21.6:1,此时计算的输入阻抗Smith图如图2所示,可见它呈现理想的多谐振特性。

表3 不同尺寸椭圆单极天线阻抗带宽的比较

Tab.3 Comparison of impedance bandwidths of elliptical monopole antennas with various sizes

编号	椭圆单极贴片尺寸		频率范围(VSWR≤2)		比带宽(VSWR≤2)	
	长轴 a/mm	轴比	计算值/GHz	测试值/GHz	计算值	测试值
1	30	1:1	0.9~9.55	0.97~8.98	10.6:1	9.2:1
2	60	2:1	0.58~9.54	0.64~8.94	16.4:1	14:1
3	120	4:1	0.4~9.51	0.41~8.86	23.8:1	21.6:1
4	180	6:1	0.4~1.35 1.66~9.22	- VSWR≤2.2	(23.1:1, VSWR≤2.2)	-

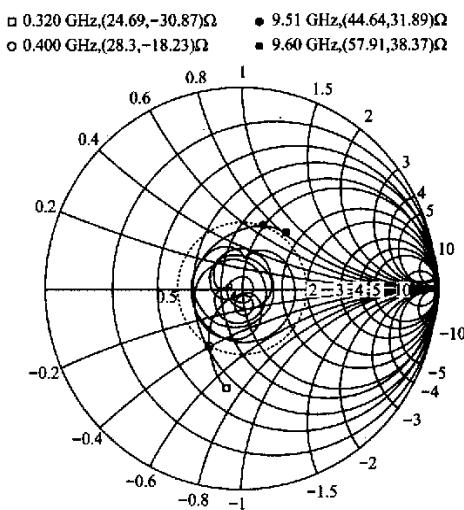


图2 输入阻抗的 Smith 圆图 ($a = 120 \text{ mm}$, $b = 30 \text{ mm}$)

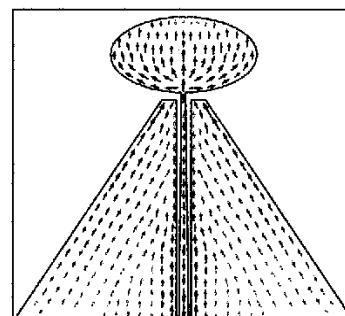
Fig. 2 Smith chart of input impedance

椭圆单极印刷天线在不同频率时的表面电流分布如图3所示。可以看到强电流主要分布在贴片和地板的边缘上,说明采用梯形地板和椭圆形贴片结构能够增加电流长度,降低天线的工作频率。当频率为1GHz时,天线的电流基本上都是沿一个方向,呈现单极天线特性;当频率为3GHz时,在导体地板上出现反相电流,两边都出现一个零点;当频率增大为6GHz时,两边的地板上都出现了3个零点,同时,椭圆贴片上也出现了零点。这是由于随着频率的升高,天线的电长度增大了。

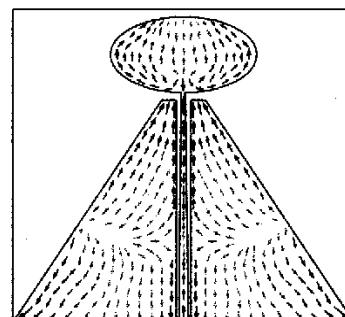
2 实验结果

已加工了采用优化尺寸的椭圆单极天线,用渐变CPW馈电,其参数是 $a = 120 \text{ mm}$, $b = 30 \text{ mm}$, $t = 2.3 \text{ mm}$, $D_{\min} = 9 \text{ mm}$, $D_{\max} = 140 \text{ mm}$, $H = 75 \text{ mm}$, $w_{top} = 1.0 \text{ mm}$, $w_{bottom} = 2.7 \text{ mm}$ 。用矢量网络分析仪 Agilent 8719ES 测试的驻波比曲线如图4所示。可见,其 $VSWR \leq 2$ 的带宽为 $0.41 \sim 8.86 \text{ GHz}$,即带宽为 $21.6:1$ 。图中也给出了仿真结果,二者吻合较好。某些差异主要是由于加工误差和计算中未记入N型同轴接头的影响,该接头会引入随频率变化的电抗,加载到输入阻抗谐振电路上,导致谐振点移动,特别是对高端谐振点影响更大。

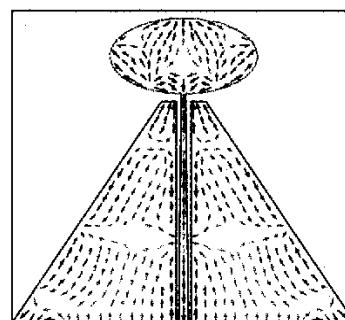
图5给出该天线在微波暗室测得的远场方向图。当频率较低时,天线的方向图呈现良好的单极天线特性,并具有较低的交叉极化电平;而当频率较高



(a) $f = 1.0 \text{ GHz}$



(b) $f = 3.0 \text{ GHz}$



(c) $f = 6.0 \text{ GHz}$

图3 椭圆形单极贴片的表面电流分布
($a = 60 \text{ mm}$, $b = 30 \text{ mm}$)

Fig.3 Surface current distribution on elliptical monopole patch

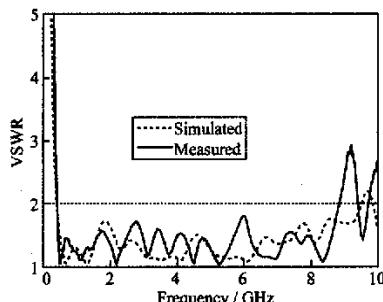
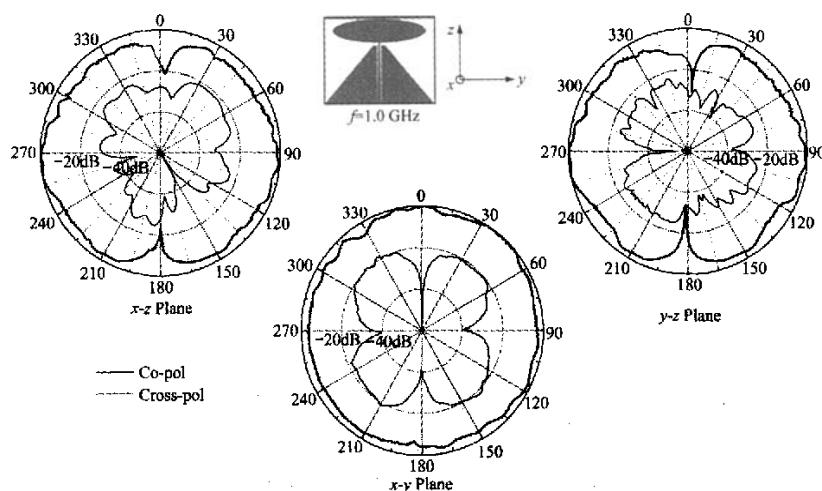
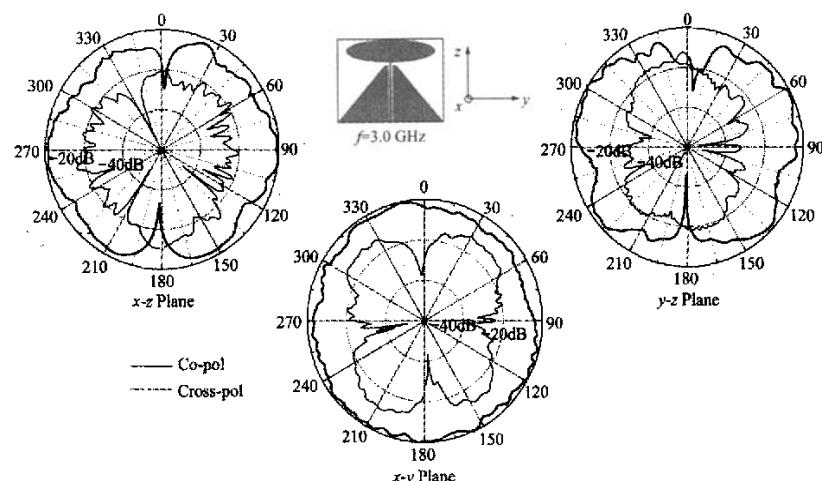


图4 仿真与测试的驻波比曲线

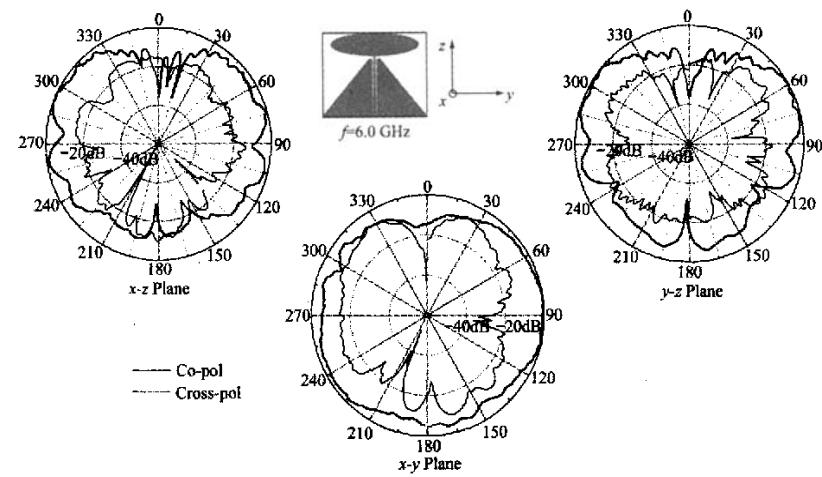
Fig.4 Simulated and measured VSWR



(a) 1 GHz



(b) 3 GHz



(c) 6 GHz

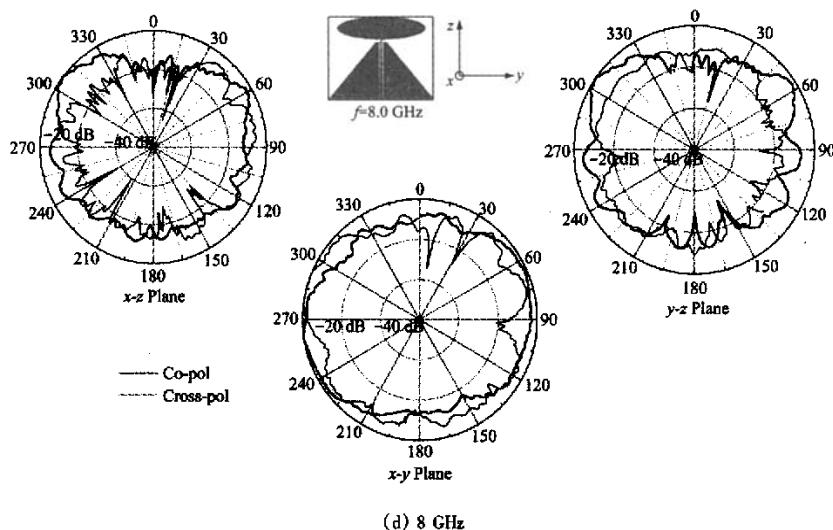


图5 实测方向图

Fig. 5 Measured radiation patterns

时,天线的方向图产生一些变形,交叉极化电平也随之升高。从表面电流来分析,随着频率的升高,零点增多,横向表面电流也相应地增大,因而交叉极化电平也会相应地升高。图6给出该天线在0.5~8 GHz频率范围上的仿真与测试的增益。可见,从1 GHz到7 GHz,该天线的实测增益由0.4 dB单调增加到4 dB,然后随频率的进一步增加,下降到1.5 dB左右。

表4中列出阻抗带宽超过10:1的几种平面天线的比较。可见,渐变缝隙天线4与其他设计相比,有较高的增益。另一方面,平板和印刷单极天线则具有较小的尺寸,其中本文介绍的印刷椭圆单极天线,

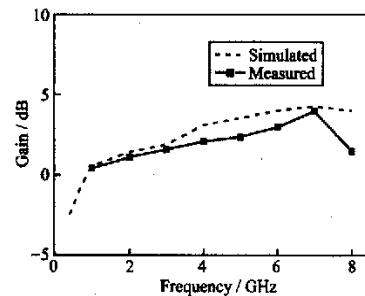


图6 仿真与实测的天线增益

Fig. 6 Simulated and measured antenna gain

表4 带宽超过10:1的几种平面天线的比较

Tab. 4 Comparison of several planar antennas with bandwidths larger than 10:1

编号	天线类型	VSWR≤2 频率 范围/GHz	VSWR≤2 比带宽	增益/dB	尺寸 λ_l^2
1	梯形平板单极天线 ^[1]	1.07~12.2	11.4:1	0.5~4.5	$0.89 \times 0.89^*$
2	倒锥平板单极天线 ^[2]	1~10	10:1	0.3~8.6	0.25×0.25
3	叶片形平板单极天线 ^[3]	1.3~29.7	22.8:1	3~5	0.35×0.35
4	渐变缝隙天线 ^[4]	1.3~20	15.4:1	3.2~9	0.43×0.32
5	椭圆形印刷缝隙天线 ^[5]	1.3~20	15.4:1	-	0.39×0.39
6	梯形地板印刷矩形单极天线 ^[10]	1.76~8.17	10.7:1	0.65~4.2	0.35×0.30
7	梯形地板印刷形单极天线 ($a = b = 30$ mm)	0.79~9.16	11.6:1	0.8~4.1	0.37×0.24
8	梯形地板印刷椭形单极天线 ($a = 120$ mm, $b = 30$ mm)	0.41~8.86	21.6:1	0.4~4	0.19×0.16

注: * 为地板尺寸

其尺寸最小,面积只有 $0.19\lambda_1 \times 0.16\lambda_1$ 。

3 结 论

本文介绍了一种超宽带的梯形地板印刷单极天线的设计。首先通过分析不同共面波导馈线的特性阻抗对天线驻波比带宽的影响,提出采用渐变的共面波导结构,将天线的驻波比带宽提高约1.7倍。其次,采用优化的椭圆形单极贴片,进一步展宽了天线的带宽,实测驻波比带宽达到21.6:1,覆盖频率范围0.41~8.86 GHz。天线面积仅为 $0.19\lambda_1 \times 0.16\lambda_1$,且具有较好的全向辐射特性。该天线结构简单、体积小、成本低,便于与有源电路集成,具有极宽的阻抗带宽,因而已应用于我国电子防护系统等处,将是各种民用和军用超宽带系统应用的一种有吸引力的设计。

参 考 文 献:

- [1] EVANS J A, AMMANN M J. Planar trapezoidal and pentagonal monopoles with impedance bandwidths in excess of 10:1 [J]. IEEE Antennas Propagat Society Int Symp, 1999, 3:1558-1561.
- [2] SUH S Y, STUTAMAN W L, DAVIS W A. A new ultra-wideband printed monopole antenna: the planar inverted cone antenna (PICA) [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2004, 52(5):1361-1365.
- [3] BAI X F, ZHONG S S, LIANG X L. Leaf-shaped monopole antenna with extremely wide bandwidth [J]. Microwave Opt Tech Lett, 2006, 48(7):1247-1250.
- [4] LANGLEY J D, HALL P S, NEWHAM P. Novel ultrawideband Vivaldi antenna and low crosspolarisation [J]. Electron Lett, 1993, 29(23):2004-2005.
- [5] ANGELOPOULOS E S, ANASTOPOULOS A Z, KAKLAMANI D I, et al. Circular and elliptical CPW-Fed slot and microstrip-fed antennas for ultra-wideband applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagat Lett, 2006, 5:294-297.
- [6] CHANG D C, LIU M Y, LIN C H. A CPW-fed U type monopole antenna for UWB applications [C]// IEEE Antennas Propagat Symp, Washington, DC. 2005, 2A:12-515.
- [7] YAO F W, ZHONG S S. Broadband and high-gain microstrip slot antenna [J]. Microwave Optical Tech Lett, 2006, 48(11):2210-2212.
- [8] 汪伟.宽带印刷天线与双极化微带及波导缝隙天线阵 [D].上海:上海大学,2005:36-39.
- [9] GEVORGIAN S, LINNER J P, KOLBERG E L. CAD models for shielded multilayer CPW [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1995, 43(4):772-779.
- [10] LIANG X L, ZHONG S S, WANG W. Tapered CPW-fed printed monopole antenna [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(7):1242-1244.

(编辑:陈海清)

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>