

# 可用于生命探测雷达的 TEM 喇叭天线设计

赵琳<sup>1</sup>, 迟永钢<sup>1</sup>, 李红梅<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 150001 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 微波与天线技术研究所, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 设计了一种可应用于超宽谱生命探测雷达的 TEM 喇叭天线. 采用电磁仿真软件 CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup> 对 TEM 喇叭天线进行仿真研究, 讨论了天线结构参数对天线通频带的影响, 制作了天线样机, 并在微波暗室内对其进行了测试. 仿真和实验结果表明: 设计出的天线在 0.71 ~ 3.25 GHz 的反射系数小于 -10 dB, 带宽比为 4.6:1, 在 2.4 GHz 频点处天线的前后比大于 14.0 dB, 天线在通频带内的增益均大于 9.0 dBi. 设计出的天线具有超宽带、高增益和定向辐射性强的特点.

**关键词:** 生命探测; TEM 喇叭; 超宽带雷达; 高增益

中图分类号: TN82

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)05-0035-05

## Design of TEM horn antenna in human being detection radar

ZHAO Lin<sup>1</sup>, CHI Yonggang<sup>1</sup>, LI Hongmei<sup>2</sup>

(1. Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Microwave and Antenna Research Center, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** A TEM horn antenna applied to ultra-wideband radar for human being detection is designed. The proposed TEM horn antenna is simulated by CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup> software. And the influences of antenna structural parameters on antenna pass band are discussed and analyzed. Finally, the prototype of the proposed antenna is manufactured and measured in the microwave anechoic chamber. The simulation and experimental results show that the working frequency of the proposed antenna is from 0.71 GHz to 3.25 GHz with reflection coefficient less than -10 dB (bandwidth ratio 4.6:1). The antenna front-to-back ratio is greater than 14.0 dB at 2.4 GHz, and the antenna gain is greater than 9.0 dBi within the pass band. So the proposed antenna has characteristics of ultra-band, high gain, and strong directional radiation.

**Key words:** human being detection; TEM horn; ultra-wideband radar; high gain

超宽谱生命探测雷达<sup>[1-2]</sup>以电磁波为探测媒介,探测呼吸、心跳所引起的人体体表微动,进而提取所需的生命体征参数,并判断有无生命体存在.它具有发射脉冲极窄、高距离分辨率、穿透能力强和较好的抗干扰能力等优点,在应急救援、反恐、军事等领域具有广泛的应用前景<sup>[3-4]</sup>.

超宽带天线是超宽谱生命探测雷达的一个极其重要的部件,其性能直接决定了雷达的探测效果.常见的应用于雷达系统的超宽带天线主要有:螺旋天线<sup>[5]</sup>、维瓦尔第天线<sup>[6]</sup>、双锥天线<sup>[7]</sup>、TEM

喇叭天线<sup>[8]</sup>、蝶形天线<sup>[9]</sup>和加载 V 型偶极子<sup>[10]</sup>等.其中双锥天线虽然结构简单,但其增益较低,而且是三维结构,不易安装,这些都限制了这种天线的广泛应用;蝶形天线具有超宽频带、体积小和重量轻的特点,目前已经被大量运用在了探地雷达系统中<sup>[11-12]</sup>.文献[13]提出了一种可应用于探地雷达系统的椭圆偶极子天线,该天线从 250 MHz 到 1 GHz 具有良好的驻波特性,并且采用印刷介质板形式,易于加工,但是该天线的增益较低.文献[14]设计了一种结构类似橄榄球的超宽带天线,该天线在 0.1 ~ 20 GHz 的电压驻波比小于 2,非常适合用于发射窄脉冲,但是该天线不易加工,而且需要设计反射器和接地面,增大了天线的尺寸,不利于雷达的小型化.

收稿日期: 2012-04-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071035).

作者简介: 赵琳(1989—),女,硕士研究生.

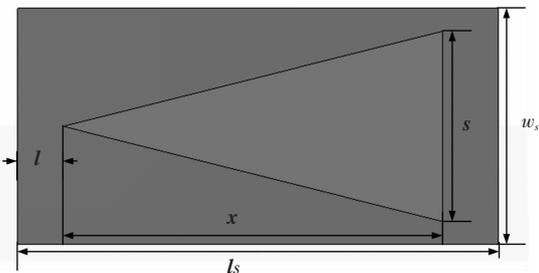
通信作者: 迟永刚, chiyg@hit.edu.cn.

双脊喇叭天线具有超宽带、高增益和相位中心稳定等诸多优点<sup>[15-16]</sup>, 已经被广泛应用于超宽带雷达系统中. 其中文献[17]将 TEM 喇叭结构与双脊喇叭结构相结合, 提出一种维瓦尔第型的双脊喇叭天线, 天线的工作频段为 0.4 ~ 18 GHz, 可应用于多频段的探地雷达系统中. 文献[18]提出了一种可应用于探地雷达系统的小型化双脊喇叭天线, 通过在双脊喇叭之间添加介质材料, 从而降低天线的工作频率, 同时通过引入一个金属背板以改善天线的反射系数. 但是上述双脊喇叭天线在极化方向的尺寸偏大, 天线在低频段的增益较低, 且天线的设计和制作较为复杂, 这些均是有待解决和改善的问题.

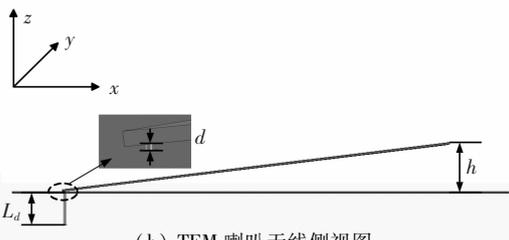
本文设计了一种带地板的 TEM 喇叭天线, 该 TEM 喇叭天线由一个三角形金属板和一个地板组成, 采用同轴线馈电. 采用电磁仿真软件 CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup>对天线进行仿真研究, 讨论了天线结构参数对天线通频带的影响, 并制作了天线样机在微波暗室中进行了测试, 设计出的天线具有超宽带、高增益和定向辐射性强的特点, 可以广泛地应用在生命探测雷达系统中.

## 1 TEM 喇叭天线的结构及设计原理

本文设计的 TEM 喇叭天线是由一个金属三角板和一个有限大金属地板构成, 采用同轴线馈电, 同轴线的内外导体分别与金属地板和金属三角板相连, 同轴线内导体向上延伸一段距离用参数  $d$  表示, 如图 1 所示. 该结构是将标准形式的 TEM 喇叭天线改进为带地板结构的 TEM 喇叭天线, 相对标准的 TEM 喇叭天线可以减小体积, 易于工程上的实现与安装.



(a) TEM 喇叭天线俯视图



(b) TEM 喇叭天线侧视图

图 1 TEM 喇叭天线的结构示意图

一般要求 TEM 喇叭天线的张角为小角度, 对于小张角的 TEM 喇叭天线, 可看成终端开路的传输线, 假定信号源为阶跃信号, 则天线上任意位置  $z$  的电流为

$$i(z, t) = I_0 \left[ u\left(t - \frac{l}{c} - \frac{z}{c}\right) + u\left(t - \frac{l}{c} + \frac{z}{c}\right) \right]. \quad (1)$$

式中  $u(t)$  为单位阶跃函数,  $c$  是光速 (假定 TEM 喇叭天线放置在空气中). 设电压为  $V_0$ , 天线特性阻抗为  $Z_c$ , 根据  $V_0 = I_0 Z_c$ , 可以得天线上任意位置  $z$  的电压.

TEM 喇叭天线辐射出去的波是 TEM 球面波. 受到天线端口中心与边缘相位差的限制, 一般要求喇叭张口不能太大. 因喇叭端口开路, 这种喇叭天线对低频反射较大, 因此可以采用加载电阻吸收反射的能量. 小张角的 TEM 喇叭天线, 在低频率时可近似为电偶极子天线, 而加载低频补偿回路可构成磁偶极子, 这样电偶极子与磁偶极子构成组合振子天线, 可改善天线的低频辐射性能<sup>[19]</sup>.

把传输线等效为许多小段电偶极子与磁偶极子, 并将二者的辐射场叠加, 作相应的代换, 得到小角度 TEM 喇叭天线的远场频域辐射方程

$$d\tilde{E}_y^{\text{TOT}}(z, z', s) = \frac{e^{-\gamma(z-z')}}{4z\pi} \frac{\mu_0}{c} s^2 [d\tilde{m}_x(z', s) - cd\tilde{p}_y(z', s)]. \quad (2)$$

将上式再进行拉氏反变换, 可得到天线的远场时域辐射方程:

$$E_y^{\text{TOT}}(r, t_r) = -\frac{V_0}{r} \frac{h}{4\pi c f_g} \left\{ \delta(t_r) + \frac{c}{2l} \left[ -u(t_r) + u\left(t_r - \frac{2l}{c}\right) \right] \right\}. \quad (3)$$

根据施瓦兹保角变换, 可得到 TEM 喇叭天线的特性阻抗为<sup>[20]</sup>

$$Z_c = \begin{cases} 120 \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right), & \frac{w}{h} < 1; \\ 120 \ln\left[\frac{w}{h} + \frac{1.4 + 0.7 \ln(w + 1.4)}{h}\right], & \frac{w}{h} \geq 1. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $w$  为天线口径的宽度 (m),  $h$  为天线口径高度 (m).

## 2 TEM 喇叭天线的仿真分析

依据上述对 TEM 喇叭天线的理论分析, 采用电磁仿真软件 CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup>对 TEM 喇叭天线进行仿真研究, 讨论馈电高度  $d$ 、仰角  $\alpha$  和金属三角板的底边长  $s$  对天线阻抗带宽的

影响,然后选取最佳的尺寸参数组合对天线进行设计.

本文 TEM 喇叭的设计初值需要按照下列原则选取:

1) 由于传统 TEM 喇叭是由两个相同的等腰三角形金属片构成,本文基于镜像法采用地板替换了其中的一个,因此,为尽量满足镜像法的实施条件,要求地板的尺寸尽量大一些,即长和宽要分别大于三角形金属片的高  $x$  和底边长  $s$ . 其中等腰三角形金属片的高度与起始工作频率成负相关关系;

2) 等腰三角形金属片的底边长  $s$  (或者三角形顶角) 与天线的仰角  $\alpha$  决定了天线的带宽与阻抗,在设计过程中,需要在满足天线带宽要求的前提下尽量降低  $s$  的值以减小天线的尺寸,另外天线仰角  $\alpha$  的选择与公式(4)的  $h$  有关.

### 2.1 馈电高度 $d$ 对反射系数的影响

根据对天线的理论分析可得,改变馈电高度  $d$ ,相当于改变平行双线的间距,因此馈电高度的选择很大程度上决定了天线的匹配特性. 由图2的仿真结果可以看出,馈电距离  $d$  对整个通频带的阻抗特性影响显著,在一定范围内随着馈电高度的减小,天线反射系数曲线逐渐降低,天线的通频带逐渐展宽,当  $d$  取 0.5 mm 时,天线阻抗特性的效果最好.

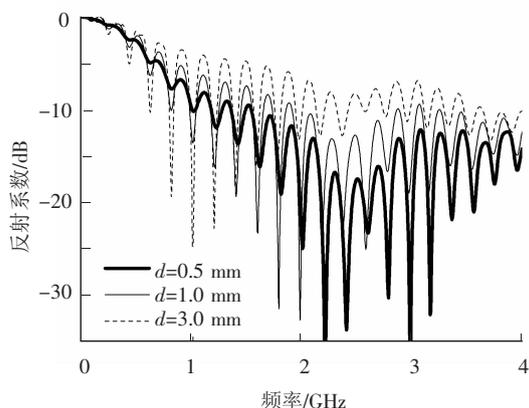


图2 馈电高度  $d$  对反射系数的影响

### 2.2 仰角 $\alpha$ 对反射系数的影响

由于天线端口中心与边缘相位差的限制,因此 TEM 喇叭天线必须是小角度张角,对于小角度张角的天线口径反射较难通过计算得到,因此需要通过仿真确定天线的最佳张角. 由图3可以看出,当金属三角板的尺寸保持不变时,随着仰角  $\alpha$  的增加,天线通频带的下限频率逐渐减小,天线带宽逐渐增加. 当仰角为  $7.5^\circ$  时,天线通频带的下限频率在 1 GHz 附近,此时天线具有理想的宽频带特性.

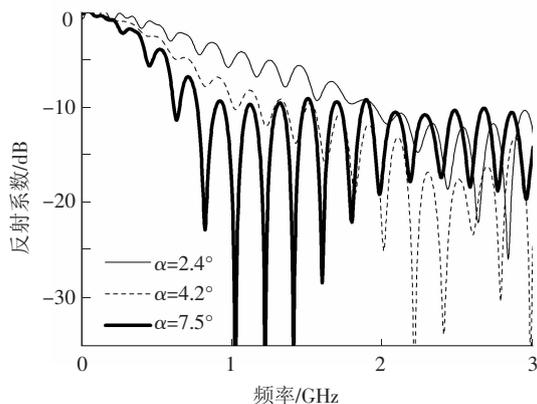


图3 仰角  $\alpha$  对反射系数的影响

### 2.3 金属三角板的底边长 $s$ 对天线反射系数的影响

图4为金属三角板的底边长  $s$  变化时天线反射系数的仿真结果,当  $s$  减小时反射系数曲线逐渐上升,抖动逐渐增大. 当参数  $s$  取 240 mm 时反射系数的效果最优.

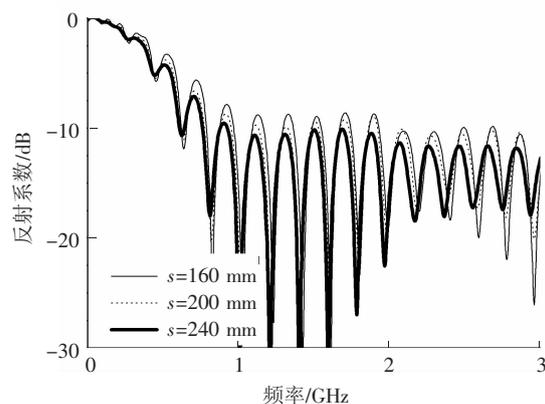


图4 金属三角板的底边长  $s$  对反射系数影响

## 3 TEM 喇叭天线的仿真和测试结果

根据以上对 TEM 喇叭天线的理论分析和不同参数的仿真讨论结果,可设计一个能够适用于超宽谱生命探测雷达的 TEM 喇叭天线. 在设计天线时需要综合考虑馈电高度、三角板的仰角以及三角板底边长度对天线通频带的影响. 根据大量的仿真研究,最终确定天线的尺寸为:  $x = 480$  mm,  $s = 240$  mm,  $l = 61$  mm,  $h = 60$  mm,  $d = 0.5$  mm,  $w_s = 300$  mm,  $l_s = 680$  mm,  $\alpha = 7.5^\circ$ ,  $L_d = 70$  mm, 同轴线的内外导体半径分别为  $a = 0.5$  mm、 $b = 1.2$  mm, 金属板的厚度  $t = 2$  mm.

根据仿真所得到的天线参数制作了一个天线样机,并在微波暗室内用 Agilent E8363B 型矢量网络分析仪进行了测试(如图5所示),天线反射系数的仿真和测试结果列于图6中. 结果表明:在仿真结果中,天线反射系数低于  $-10$  dB 的频率范围是 0.76 ~ 3.37 GHz,而测试结果则为 0.71 ~

3.25 GHz, 带宽比为 4.6:1, 具有超宽带的阻抗特性. 仿真和测试结果相差不大, 在工作频率范围上两者吻合得较好. 另外, 仿真结果出现了许多谐振点, 而在测试结果中这些谐振点均消失了, 这是由于仿真所采用的材料都是理想导体材料, 由于导体尺寸满足谐振频率对应半波长的整数倍, 所以形成了一系列的高  $Q$  值谐振点, 导致谐振深度较深, 而实际所采用的金属材料为良导体, 具有一定损耗, 在高频时损耗更大, 这种损耗会降低系统的  $Q$  值, 所以导致谐振深度降低. 尽管如此, 两者在曲线变化的趋势上仍然吻合得较好.

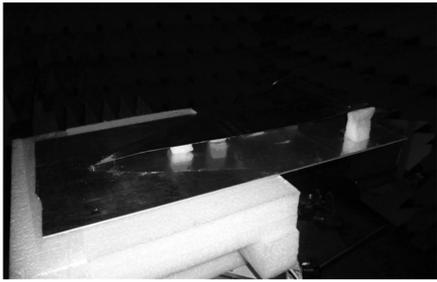


图5 TEM喇叭天线样机图及测试环境

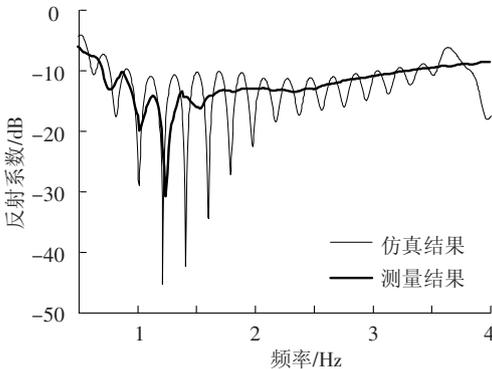


图6 TEM喇叭天线反射系数的仿真和测试结果

同时由图6可得, 天线在较宽的频带内的反射系数曲线均在  $-10$  dB 附近, 并且曲线趋势平坦, 若应用在工程领域内(即不会对天线的反射系数严格限制在  $-10$  dB 以下), 该天线的工作带宽可以向更高的频段扩展, 呈现超宽带的阻抗特性.

图7为天线归一化方向图的仿真和测试结果, 可以看出, 方向图的仿真和测试结果在主瓣方向上吻合较好, 并且天线在较宽的工作频带内具有较强的定向辐射特性. 在 2.4 GHz 频点处, 天线 E 面方向图的主瓣宽度为  $17.5^\circ$ , 前后比为 14.4 dB, H 面方向图的主瓣宽度为  $31.7^\circ$ , 前后比为 14.6 dB, 同时方向图的旁瓣电平较低, 可以满足超宽谱生命探测雷达系统对天线的要求. 图8为天线增益的仿真和测试结果, 表明天线在工作频带范围内的增益均大于 9.0 dBi, 此外, 由于受到天线的焊接以及天线方向图测试夹具的影响, 方向图副瓣电平的仿真和测试结果会存在一定差

异, 同时天线加工精度的不稳定性也会影响天线方向图的测试结果. 而材料的损耗会导致增益的测试结果与仿真结果相比偏低, 本文的偏差是 0.7 ~ 1.9 dB.

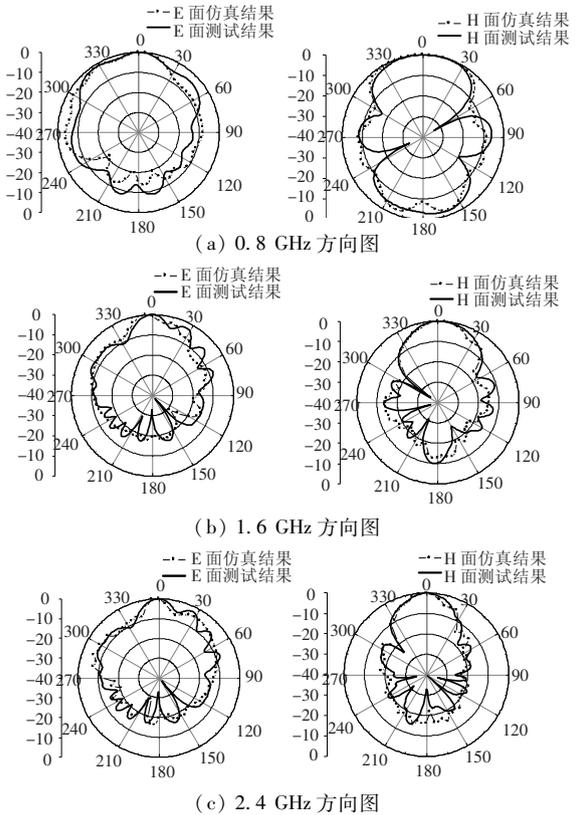


图7 TEM喇叭天线归一化方向图的仿真和测试结果

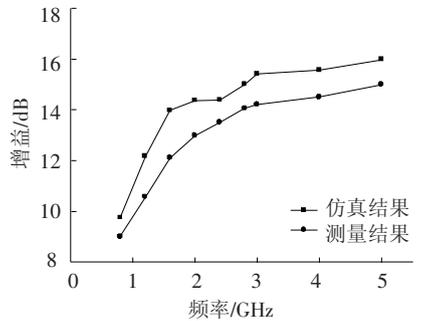


图8 TEM喇叭天线的增益仿真和测试结果

在表1中列出了本文天线和其他文献中的天线参数的比较结果, 从中可以看出: 本文天线具有极化方向尺寸小、工作频带内增益波动小以及低频段增益较高的优点, 这对于生命探测是十分有益的.

表1 本文天线和其他文献中天线的参数比较

| 天线类型     | 天线工作频带/GHz          | 低频段增益/dBi | 增益起伏/dB | 极化方向尺寸/mm |
|----------|---------------------|-----------|---------|-----------|
| 本文天线     | 0.71 ~ 3.25 (4.6:1) | 9.0       | 6.0     | 60        |
| 文献[15]天线 | 1.0 ~ 18.0 (18:1)   | 6.5       | 15.5    | 140       |
| 文献[16]天线 | 0.5 ~ 2.0 (4:1)     | 6.8       | 6.2     | 280       |

综上所述,设计的TEM喇叭天线具有超宽带、定向辐射特性好、窄波束和高增益的特点,若系统采用较大的发射功率,电磁波会在主辐射方向具有较强的穿透能力,有利于系统对生命体的探测。

## 4 结 论

TEM喇叭天线兼具超宽频带和定向辐射的特点,可以广泛应用于各种超宽带雷达系统中. 本文设计了一个带有地板的TEM喇叭天线,采用电磁仿真软件CST MICROWAVE STUDIO<sup>®</sup>讨论了馈电高度、仰角和三角板的底边长对天线通频带的影响,并制作了天线样机在微波暗室中进行了实验测试. 最终设计出的天线在0.71~3.25 GHz的反射系数均小于-10 dB,带宽比为4.6:1,在2.4 GHz频点处天线的前后比大于14.0 dB,天线在通频带内的增益均大于9.0 dBi. 该天线具有超宽带、高增益和定向性强的特点,并且易于制作,可以作为超宽谱生命探测雷达的发射天线用于发射窄脉冲。

## 参考文献

- [1] YAROVY A G, LIGTHART L P, MATUZAS J, *et al.* UWB radar for human being detection [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(11): 22-26.
- [2] MAAREF N, MILLOT P, PICHOT C, *et al.* A study of UWB FM-CW radar for the detection of human beings in motion inside a building [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 47(5): 1297-1300.
- [3] 张扬,焦腾,荆西京,等. 生物雷达技术的研究现状与新进展[J]. 信息化研究, 2010, 36(10): 6-13.
- [4] LEVITAS B, MATUZAS J. UWB radar for breath detection [C]//Proceedings of the 2010 11th International Conference on Radar Symposium. Piscataway: IEEE, 2010: 1-3.
- [5] HERTEL T W, SMITH G S. The conical spiral antenna over the ground[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2002, 50(12): 1668-1675.
- [6] CERNY P, MUDROCH M. Back radiation minimization of ultra wideband Vivaldi antenna for radar application [C]//3rd European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE, 2009: 3335-3339.
- [7] AMERT A K, WHITES K W. Miniaturization of the biconical antenna for ultrawideband applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(12): 3728-3735.
- [8] TURK A S, NAZI H. Hyper-wide band TEM horn array design for multi band ground-penetrating impulse radar [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(1): 76-81.
- [9] 郭晨,刘策,张安学. 探地雷达超宽带背腔蝶形天线设计与实现[J]. 电波科学学报, 2010, 25(2): 221-226.
- [10] KIM K, SCOTT W R Jr. Design of a resistively loaded vee dipole for ultrawide-band ground-penetrating radar applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 51(3): 2525-2532.
- [11] LESTARI A A, BHARATA E, SUKSMONO A B, *et al.* A modified bow-tie antenna for improved pulse radiation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(7): 2184-2192.
- [12] SAGNARD F, REJIBA F. Wide band coplanar waveguide-fed bowtie slot antenna for a large range of ground penetrating radar applications [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5(6): 734-739.
- [13] 吴秉横,纪奕才,方广有. 一种新型探地雷达天线的设计分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1487-1489.
- [14] RUENGWAREE A, GHOSE A, KOMPA G. A novel UWB rugby-ball antenna for near-range microwave radar system [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(6): 2774-2779.
- [15] Xu Hengfei, Zhou Yang, Li En, *et al.* Design and simulation of ultra-wideband double-ridged horn antenna [C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Piscataway: IEEE, 2010: 8-11.
- [16] 毛岫. 500 M~2 GHz 高性能双脊喇叭天线的设计及仿真[J]. 电子测量学报, 2007, 30(11): 78-82.
- [17] TURK A S, KESKIN A K. Vivaldi shaped TEM horn fed ridged horn antenna design for UWB GPR systems [C]//6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Piscataway: IEEE, 2011: 1-4.
- [18] PANZNER B, JÖSTINGMEIER A, OMAR A. A compact double-ridged horn antenna for ground penetrating radar applications [C]//18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON). Piscataway: IEEE, 2010: 1-4.
- [19] 廖勇,张秦岭,陆巍,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.
- [20] WHEELER H A. Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1965, 13(2): 172-185. (编辑 张宏)