

一种新型探地雷达天线的设计分析

吴秉横 纪奕才 方广有

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 该文研究了一种近似椭圆结构的超宽带偶极子天线。通过设计沿着振子向末端方向渐变的导体臂,可以有效地减小天线末端电流的反射,改善天线的输入阻抗特性,拓宽天线的带宽。由于没有采用任何加载措施,此天线相比电阻加载宽带天线具有更高的效率。采用三维电磁仿真软件对天线进行了分析和设计,根据设计结果实际制作了一副天线样机,并对其电压驻波比和辐射特性进行了测试,测试结果与仿真设计结果吻合良好。仿真结果和实验测试结果表明,该天线在很宽的工作频带内具有良好的阻抗特性和辐射特性。

关键词: 探地雷达天线; 超宽带; 椭圆偶极天线; 阻抗特性

中图分类号: TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1487-03

Design and Analysis of a Novel GPR Antenna

Wu Bing-heng Ji Yi-cai Fang Guang-you

(Institute of Electronics, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: An ellipse-like UWB dipole is investigated in this paper. By designing a novel antenna structure, which can effectively reduce the current reflection at the end of dipole, the input impedance is improved, and the bandwidth is widened. The dipole is more effective than the resistance loaded bow-tie antenna. In this article, the dipole is analyzed and designed by an EM simulation tool and a sample antenna is produced based on the design results. The VSWR and radiation pattern of the proposed antenna are measured and the results prove the validity of the simulation. The results indicate that the novel antenna has a wide bandwidth and a good radiation performance.

Key words: GPR antennas; Ultra WideBand (UWB); Ellipse-like dipole; Impedance characteristic

1 引言

基于无载波脉冲体制的探地雷达(GPR)由于其非破坏性的探测特点,越来越受到国内外工程部门的关注,近几年得到了长足的发展,现已广泛应用于浅层地下目标的探测之中。探地雷达主要应用于公路、桥梁、隧道以及矿井的无损探测、地质勘探和研究,以及地下管线等各种金属和非金属目标的检测、定位、成像等。

天线是探地雷达系统中至关重要的一个组成部分,它直接影响着整个系统的性能。探地雷达系统普遍采用超宽带窄脉冲信号,因此要求天线应具有良好的辐射特性和宽带特性,以及较好的时域特性。总结各种类型的超宽带天线,只有几种类型的天线可以满足探地雷达的需要,如:电阻加载的蝶形天线,TEM喇叭天线及其变形以及螺旋天线等等。其中,蝶形天线^[1]由于平面的结构以及相对简单的制作方法得到了最广泛的应用。目前通过电阻加载^[2]此类天线,可以有效地消除天线末端的二次反射,从而获得满意的波形以及驻波特性,但是这类天线的缺点是效率偏低,影响探测效果。

对于超宽带平面天线的研究^[3],除去蝶形偶极子天线,

通过共面波导馈电的单极子超宽带天线被广泛深入研究,其中不少天线在结构上推陈出新^[4-6]。本文提出了一种特殊形状的偶极子天线,通过设计沿着振子向末端方向渐变的导体臂,有效地降低了天线末端电流的反射、改善了天线的输入阻抗特性,拓宽了天线的带宽。

2 天线的结构

文献[1,2]提到,通过电阻加载的方法来减小天线末端的电流反射,可以抑制辐射脉冲拖尾,展宽天线工作带宽,然而电阻是能量消耗元件,因此天线的辐射效率相对较低。本文设计的天线并未引入任何电阻元件,具有较高的辐射效率。图1给出了偶极天线的结构。天线的振子由一个半椭圆和半圆组合而成,通过优化确定椭圆的长轴为 $a = 10\text{cm}$,短轴为 $b = 6\text{cm}$,半圆的半径为 b ,中心馈电点之间的距离是 4mm 。整副天线印制在 $L \times W$ 的覆铜板上,其中 $L = 344\text{mm}$, $W = 220\text{mm}$,覆铜板的基底是介电常数 $\epsilon_r = 4.9$ 的FR-4材料。

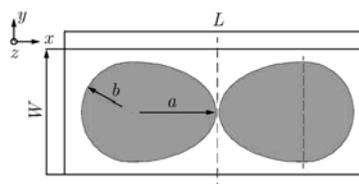


图1 天线的结构图

2008-09-08 收到, 2008-12-09 改回

国家自然科学基金(60551002)和国家 863 计划项目(2008AA10Z205)资助课题

3 实验和仿真结果分析

借助基于时域有限积分(FITD)方法的三维电磁仿真软件,对天线进行了建模和仿真,并且按照设计结果进行了实际制作和测试。对比仿真的理论结果和测量结果,对天线的驻波特性、输入阻抗、辐射特性进行了分析和研究。

3.1 天线的阻抗和驻波特性分析

天线的输入阻抗通过仿真计算得出,如图 2 所示。从图中可以看出,当频率高于 300MHz 时,天线的输入电阻围绕 100Ω 左右变化,输入电抗部分很小,因此天线采用特性阻抗为 100Ω 的馈线进行平衡馈电。在实验中需要的 50-100Ω 阻抗变换巴伦则采用了 CPW-CPS 宽带巴伦^[7]的设计方式。

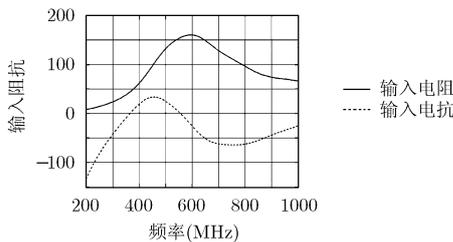


图 2 天线的输入阻抗

将天线与在相同大小覆铜板上制作的蝶形天线^[1]进行比较,其中馈电部分均采用 100Ω 的馈线。从图 3 反射损耗的仿真结果中可以看出,本文设计的天线相比蝶形天线具有更好的宽带特性,这也是蝶形天线采用电阻或电容加载拓宽其工作带宽的原因。

图 4 给出了天线的电压驻波比 VSWR,并且将实验结果与仿真的理论结果进行了比较,从图中可以看出,天线在 380MHz 以上具有较好的电压驻波比(≤ 2)。实验结果与仿真结果的误差主要源于实验中使用的宽带巴伦引入了插入损耗,造成了馈源接收到的反射减小。

3.2 天线反射腔的设计

天线应用在探地雷达系统之中时,为了获得更好的探测效果,往往要求天线具有向下的最大辐射方向。一般情况下在天线上方安装一个反射腔,使得天线主要向地下辐射能量,可达到定向的效果。天线反射腔的高度是一个重要的参数。一般情况下,天线反射腔的高度为天线工作中心频率对应波长的 1/4 左右,这里选定高度为 12cm。

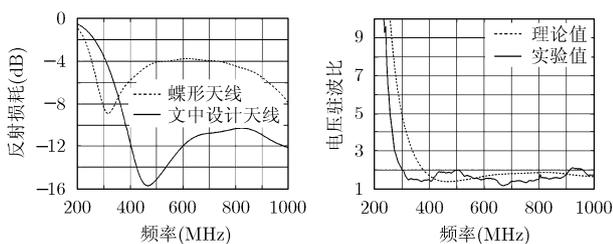


图 3 本文天线与蝶形天线的比较

图 4 天线的电压驻波比

天线反射腔的结构是另外一个需要着重考虑的方面。大部分探地雷达天线系统都是将一个由五面金属板构成的长方体罩在天线上方,但是研究发现,由于天线的 H 面 (yoz 面) 方向图是全向辐射,因此在 yoz 面内沿 $\pm y$ 方向的辐射会被天线反射腔其中的两面金属板多次反射,相互叠加,加大了天线馈电点收到的反射波形,影响了天线输入端口的阻抗匹配。针对这种不利情况,有的设计者采用了吸波材料覆在反射腔内壁来削弱反射^[8]。本文提出了一种此类天线反射腔的改进方案,将天线两侧的金属板去掉。此结构可以回避天线 $\pm y$ 方向的辐射,很大程度上消除天线反射腔侧壁对天线馈电点的影响。

图 5 给出了应用上面提到的两种反射腔情况下天线反射损耗的仿真值。从图中可以看出,改进后的天线反射腔可以很好的保持天线原有的阻抗特性,实现足够的工作带宽。图 6 给出了应用改进反射腔后天线电压驻波比仿真的理论结果以及实验结果,可以看出两种结果基本上一致,天线在 250MHz 到 1GHz 基本保持了较好的电压驻波比。实验与理论值的误差主要来源于天线反射腔的制作误差以及天线巴伦的与天线的匹配。

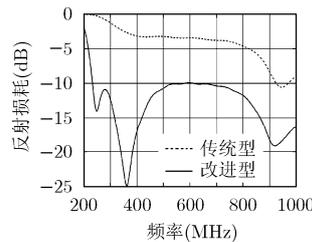


图 5 应用不同反射腔时天线的反射损耗

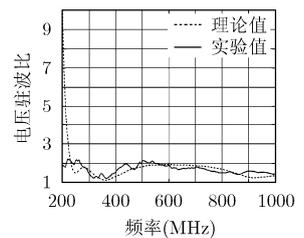


图 6 应用反射腔后天线的电压驻波比

3.3 天线的辐射特性分析

天线的辐射特性可以从频域和时域两方面分析。频域分析主要是研究天线在不同频率时的增益特性。探地雷达一般要求天线没有明显的副瓣,如果天线出现旁瓣辐射,这就限制了天线的工作带宽。图 7 分别给出了 250MHz, 500MHz, 750MHz, 1GHz 天线的 E 面和 H 面归一化方向图,并将仿真的理论值和实验测量值进行了比较。表 1 列出了本文天线在 250MHz-1GHz 的增益的最大值,并将其与长宽相同的电阻加载蝶形天线进行了比较,从表中可以看出,本文设计的天线增益的最大值均在 3.5dBi 以上,在大部分频带内尤其在低频端大于电阻加载蝶形天线的增益。

探地雷达系统普遍采用超宽带窄脉冲信号,因此天线的时域辐射特性是衡量天线是否满足需要的标准之一。当采用脉冲宽度为 1.5ns 的高斯脉冲激励时,观察天线正下方 2m 距离处的电场强度,如图 8 所示,可以观察出天线良好的时域特性。

4 结束语

本文研究了一种近似椭圆结构的超宽带偶极子天线的

阻抗特性和辐射特性。通过优化确定天线结构的具体参数，使得天线从 250MHz 到 1GHz 具有良好的驻波特性；而由于并未引入任何加载元件，天线的辐射效率几乎为 100%，增益均在 3.5dB 以上；同时提出了一种改进的天线反射腔结

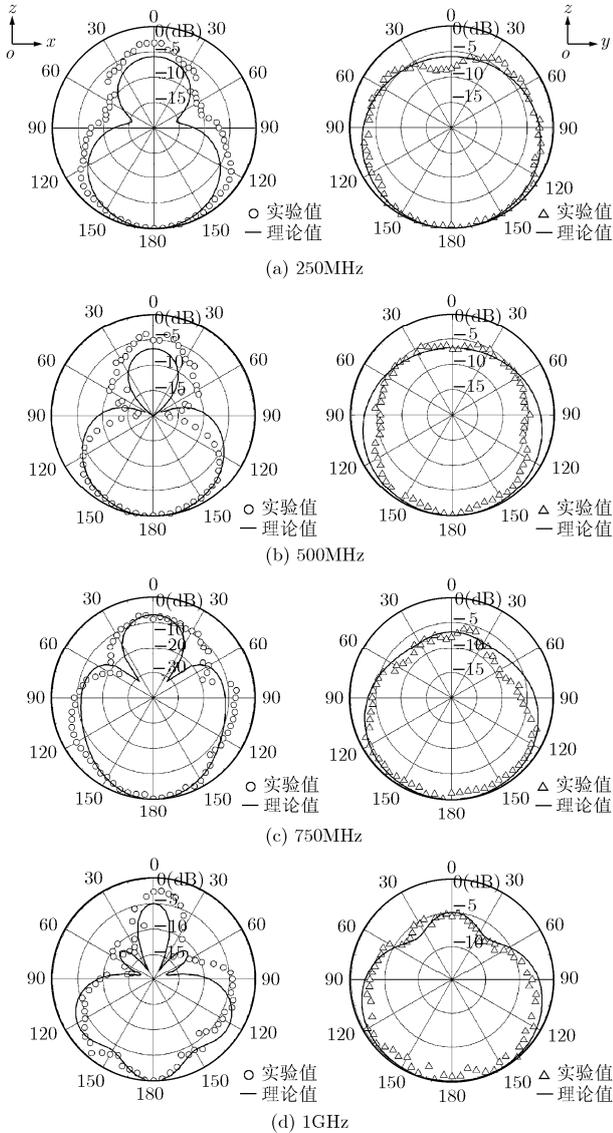


图 7 天线的归一化辐射方向图
左：E 面(xoz 面)；右：H 面(yoz 面)

表 1 本文天线与电阻加载蝶形天线的增益比较

| 频率 | 250MHz | 500MHz | 750MHz | 1GHz |
|--------------------|--------|--------|--------|-------|
| 本文设计 天线 (dBi) | 4.115 | 3.837 | 4.749 | 3.534 |
| 电阻加载蝶 形天线 (dBi) | 1.832 | 1.922 | 3.992 | 3.745 |

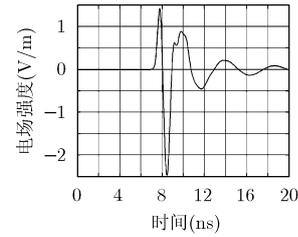


图 8 天线的时域辐射波形

构，有效提高了天线的辐射性能。由于天线具有良好的阻抗特性、方向性和时域辐射波形，所以可以考虑将此天线应用于探地雷达之中。

参考文献

- [1] Manoj Stephen Jayakumar. Antenna optimization for ground penetrating radar using the finite difference time domain technique. [Master dissertation], South Dakota School of Mines and Technology, 1999.
- [2] Wu T T and King R W P. The cylindrical antennas with nonreflecting resistive loading. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1965, 13(5): 369-373.
- [3] 钟顺时, 梁仙灵, 延晓荣. 超宽带平面天线技术. 电波科学学报, 2007, 22(2): 308-315.
- [4] Abbosh A M and Bialkowski M E. Design of ultrawideband planar monopole antennas of circular and elliptical shape. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2008, 56(1): 17-23.
- [5] Bai F, Zhong S S, and Liang X L. Leaf-shaped monopole antenna with extremely wide bandwidth. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2006, 48(7): 1247-1250.
- [6] Yan X R, Zhong S S, and Guo Y W. Compact hollowed printed monopole antenna with extremely wide bandwidth. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2007, 49(11): 2883-2886.
- [7] Su Hong. Investigations of RC-loaded bow-tie antennas for impulse ground penetrating radar applications. [M.S. Thesis], University of Manitoba, 2006.
- [8] 刘立业, 粟毅, 毛钧杰. 具有屏蔽腔和吸波材料的探地雷达天线的 FDTD 分析. 电波科学学报, 2006, 21(3): 422-427.

吴秉横：男，1982 年生，博士生，研究方向为超宽带天线的设计和分

析等。
纪奕才：男，1974 年生，副研究员，研究方向为超宽带电磁学、

宽带天线技术、电磁场数值计算。
方广有：男，1964 年生，研究员，博士生导师，主要从事超宽带电磁场理论及其工程应用、超宽带成像雷达技术、微波成像新方法和新技术等方面的研究工作。