

# 超宽带低背腔车载探地雷达收发天线的研究

李雪萍<sup>1,2,3</sup>, 纪奕才<sup>1</sup>, 卢伟<sup>1</sup>, 方广有<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100039;  
3. 河南师范大学物理与电子工程学院, 河南新乡 453007)

**摘要:** 本文研制了一种超宽带车载探地雷达收发天线系统, 采用半椭圆形状的偶极子天线形式和电阻加载的方法拓宽了天线的工作带宽, 使天线末端的反射明显减小. 分析了背腔高度对天线电性能的影响, 在保证天线电性能的前提下, 采用的背腔高度仅为 22mm. 设计并制作了一套天线样机, 并安装在探测车上, 在电波暗室中对天线的电性能进行了测试, 测试结果与仿真结果吻合良好, 这表明该超宽带收发天线可以满足车载探地雷达系统的需求.

**关键词:** 探地雷达; 半椭圆偶极子天线; 电阻加载; 车载

**中图分类号:** TN957.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2014)08-1577-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.08.018

## Research on an UWB Transmitting/Receiving Antenna with Shallow Backed Cavity Mounted on a Vehicle for GPR Application

LI Xue-ping<sup>1,2,3</sup>, JI Yi-cai<sup>1</sup>, LU Wei<sup>1</sup>, FANG Guang-you<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;  
3. College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China)

**Abstract:** A Ground Penetrating Radar (GPR) UWB transmitting/receiving antenna system mounted on a vehicle for the exploration of the subsurface is investigated in this paper. A dipole antenna with two half-elliptical-shape arms which are loaded by continuous resistive elements can broaden the bandwidth and improve the impulse radiation. The influence of the height of backed cavity to the antenna electrical performance is analyzed. Taking fully into account the antenna radiation efficiency and the waveform fidelity, a backed cavity with height of 22mm is adopted. The antenna system is manufactured and mounted on a vehicle. Then it is measured in an anechoic chamber. The results of simulations and measurements are compared together and good agreements are achieved. The results show that the UWB transmitting/receiving antenna system is suitable for vehicle-mounted GPR applications.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); half-ellipse antenna (HEA); resistive loading; vehicle

## 1 引言

探地雷达是一个可以通过无损探测方法实现地下结构探测的工具, 广泛应用于考古、地球物理学研究、公路和桥梁的质量评估、地质检测和土木工程中<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着深空探测技术的不断发展, 月球与火星等星球次表层结构的探测越来越受到学者的关注, 探地雷达则被认为是这些探测任务中不可缺少的工具之一<sup>[2]</sup>. 探地雷达可以通过探测地质结构分层和内部埋藏体的反射特性实现地下结构的探测, 为开展外太空星体地形地貌与内部地质构造、矿物组成和化学成分等一系列的研究提供了条件.

天线是探地雷达系统中一个至关重要的组成部分, 直接影响着雷达系统的性能. 探地雷达系统常用的天线

有以下几种形式: 电阻加载的偶极子天线<sup>[3]</sup>、bow-tie 天线<sup>[4,5]</sup>、宽带缝隙天线<sup>[6,7]</sup>、螺旋天线<sup>[8]</sup>和 TEM 喇叭<sup>[9]</sup>. bow-tie 天线由于结构简单、宽频带以及良好时域辐射特性而得到了最广泛的应用. 许多学者通过加载来改善 bow-tie 天线的带宽特性和时域波形<sup>[10-14]</sup>. 文献[10]提出电阻电容相结合的 bow-tie 天线来改善时域波形, 这比单独的电感或电容加载能提高天线的辐射效率, 但是其辐射波形仍存在严重的拖尾, 会对探地雷达的性能产生影响. 文献[11]给出了电阻连续加载阻抗匹配卡, 但这种连续加载方式在工程上比较难以实现. 文献[12]利用 FDTD 方法对电阻加载 bow-tie 天线电阻剖面的优化进行了研究, 但是对于天线的阻抗特性和辐射波形没有分析. 此外, 大多数的 bow-tie 天线均是采用三角形状的天线臂, 这种结构的天线阻抗很难匹配. 针对上述问题,

本文研制了一种用于车载探地雷达的收发天线系统,采用半椭圆形状的偶极子天线形式和电阻加载的方法,拓宽了天线的工作带宽,对该加载的半椭圆偶极子天线与无加载的半椭圆偶极子天线的增益、阻抗特性和辐射波形进行了对比;接着分析了背腔高度对天线辐射性能的影响.根据仿真设计结果制作了一套收发天线样机,并安装在探测车上,在电波暗室中对天线的电压驻波比、隔离度、辐射方向图以及时域辐射波形进行了测试.天线样机与探地雷达系统相连后,在沙漠进行了外场探测试验.

## 2 天线结构和设计

文献[3]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,拓宽天线工作带宽.实际工程中,通常采用不均匀电阻加载的形式,天线从馈电端开始,始端加载轻,尾部加载重,辐射场的主要波形在天线前部已经产生,因而损失较小.本文所研究的分段电阻加载的半椭圆偶极子天线的几何形状如图1所示.

选取天线振子臂上加载电阻的阻值按 Wu-king 方法来确定<sup>[3]</sup>,即

$$R^i(z) = \frac{60\phi_0}{L - |z|} (\Omega/\text{m}) \quad (1)$$

式中  $z$  是从馈电端开始的天线臂的长度,  $L$  是天线臂的长度,  $\phi_0$  是一个无量纲常数,在文献[3]中有详细的讨论.这里,我们选取  $\phi_0 = 1.1$ ,此时输入阻抗大约为  $100\Omega$ .每个天线臂分为7段( $i$ 从馈电端开始标号从1到6),并通过加载电阻  $R^i$  相连接.考虑到计算结果和实际的电阻分布表,这里每一个加载电阻  $R^i$  由五个并行的电阻  $r^i$  组成(如图1).

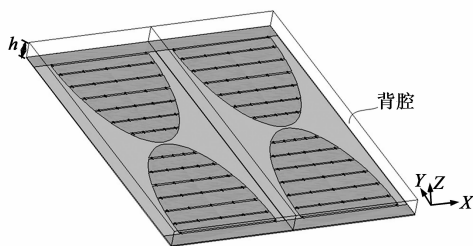


图1 电阻加载半椭圆偶极子天线的结构图

探测车结构图如图2所示,其尺寸为  $1.2\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.87\text{m}$ .收发天线系统安装在探测车的底部,并且距离地面高度为  $30\text{cm}$ .为了减小天线结构对探测车移动过程中跨越障碍物能力的影响,并确保收发天线的辐射特性,超宽带收发天线的反射背腔高度仅为  $22\text{mm}$ .从图1可以看出,发射天线和接收天线是两个完全相同的半椭圆偶极子天线,并排安装在两个相隔开的金属反射背腔内.天线的工作频率范围为  $250 \sim 750\text{MHz}$ ,天

线的尺寸为  $360\text{mm} \times 300\text{mm} \times 22\text{mm}$ .收发天线系统通过印制电路板工艺制作在尺寸为  $360\text{mm} \times 300\text{mm}$  的  $\text{FR4}$  介质板上,并且通过特性阻抗为  $100\Omega$  的平行双线进行馈电.

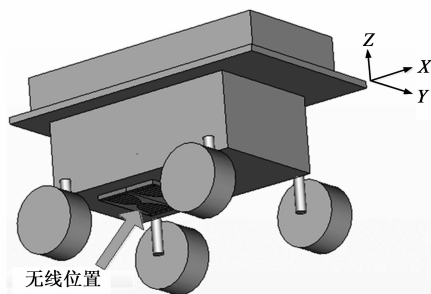


图2 天线在探测车上的安装示意图

### 2.1 电阻加载对天线性能的影响

本文对天线的增益、阻抗特性以及辐射波形特性进行了研究.图3给出了电阻加载半椭圆偶极子天线与无电阻加载的半椭圆偶极子天线的阻抗特性和电场分量  $E_y$  的时域辐射波形.从图3可以看出,无电阻加载的半椭圆偶极子天线由于阻抗不匹配而引起了较明显的二次反射,输入阻抗曲线也不是很平坦,而对天线振子进行如本文提出的电阻加载后,振子表面电流呈行波分布,从而抑制了多次反射,使辐射波形明显得到改善,同时天线的输入阻抗曲线更为平坦,天线的带宽得到明显改善.然而,经过电阻加载后,天线辐射效率降低,天线的增益从  $5\text{dBi}$  降低到  $-7\text{dBi}$  ( $500\text{MHz}$ ),加载后天线的辐射波形幅度比加载前小.

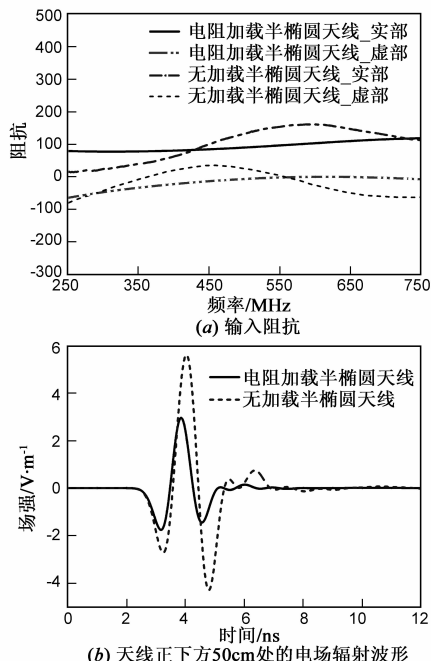


图3 电阻加载对天线阻抗特性和辐射波形的影响

### 2.2 不同背腔高度对天线性能的影响

天线在 H 面的方向图为全向辐射,为了抑制天线背面不必要的对空辐射场,以及屏蔽周围环境和金属器件给天线系统带来的干扰,设计中使用了一个中间隔离的金属屏蔽盒来形成天线系统的反射背腔.当金属反射背腔高度  $h = \lambda/4$  时,天线对地面的辐射能量达到最大.但在实际中需要结合天线应用环境,在保证天线性能的前提下,尽量降低天线反射腔的高度.本文设计的天线安装于探测车底部,需要满足以下几个条件:(1)确保天线的辐射特性;(2)尽量减小天线结构对探测车移动过程中跨越障碍物能力的影响;(3)尽量减小天线的重量和体积.

图 4 给出了不同背腔高度下天线的阻抗特性和电场分量  $E_y$  的时域辐射波形.从图 4 可知,背腔高度为 22mm 的天线的阻抗带宽和辐射波形要好于背腔高度为 50mm 和 150mm 的,但是高背腔的天线辐射波形幅度要大于低背腔天线的辐射波形幅度,这意味着低背腔天线的辐射效率要低于高背腔天线的辐射效率.考虑到天线的辐射能力,设计的背腔高度也不能过于小.综合考虑上述条件,结合实际的仿真分析结果,最终选择背腔高度为 22mm.

### 3 天线的特性和分析

借助基于时域有限积分(FITD)方法的三维仿真软件 CST,对天线进行了建模和仿真,根据仿真设计结果制作了一套收发天线样机,天线照片如图 5 所示.将天线样机安装在探测车上,在电波暗室中对天线的电压驻波比、隔离度、辐射方向图以及时域辐射波形进行了测试.

图 6 给出了车载加载半椭圆偶极子天线电压驻波比的仿真结果和测量结果.从图中可以看出在 250MHz ~ 750MHz 频率范围内电压驻波比小于 2,仿真结果和测量结果吻合良好.

为了研究收发天线间的相互作用,本文对收发天线之间的隔离度进行了仿真和测量,结果如图 7 所示.从图中可以看出在整个频率范围内隔离度均大于 35dB.

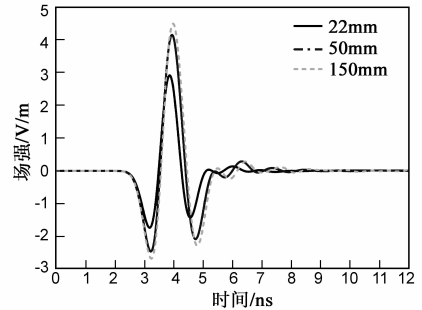
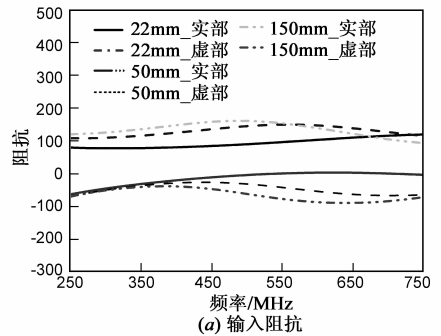


图 4 不同背腔高度对天线阻抗特性和辐射波形的影响

图 8 给出了车载探地雷达收发天线系统的 E-面辐射方向图,可以看出此车载天线系统的辐射方向指向地面,并具有光滑的主瓣,良好的方向性和小的后向辐射,辐射方向图的仿真结果和实验测试结果吻合良好.

在基于脉冲体制的探地雷达系统中,时域辐射波形也是一个极其关键的参数,它能直接影响探地雷达系统的成像质量.本文采用高斯脉冲对天线进行激励,激励脉冲波形的表达式如下所示:

$$u(t) = u_0 e^{-a^2(t-t_0)^2} \quad (2)$$

式中  $u(t)$  是高斯脉冲,它是时间  $t$  的函数.  $u_0$ 、 $a$  和  $t_0$  都是自定义的脉冲参数.这里,  $u_0$ 、 $a$  和  $t_0$  三者分别取值为 1、2.36 和 1.77.

自由空间归一化的辐射脉冲波形的仿真结果如图 9(a)所示,图 9(b)是归一化的接收天线收到的直耦波的仿真结果和实际测量结果.从图中可知,该车载天线

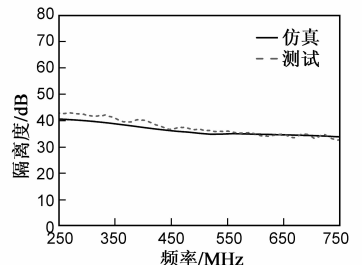
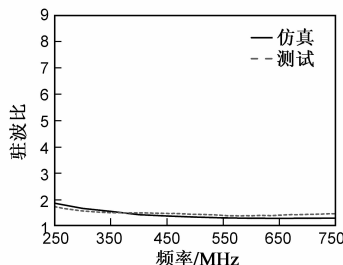
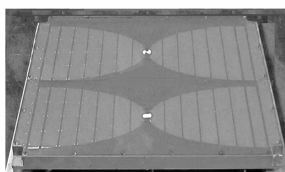


图 5 电阻加载半椭圆偶极子天线的照片 图 6 车载加载半椭圆偶极子天线的电压驻波比 图 7 收发天线之间的隔离

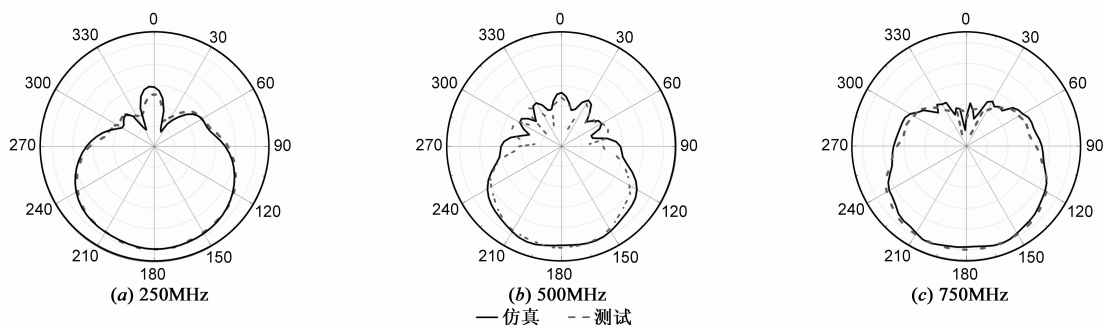


图8 归一化车载探地雷达收发天线系统的E-面辐射方向图

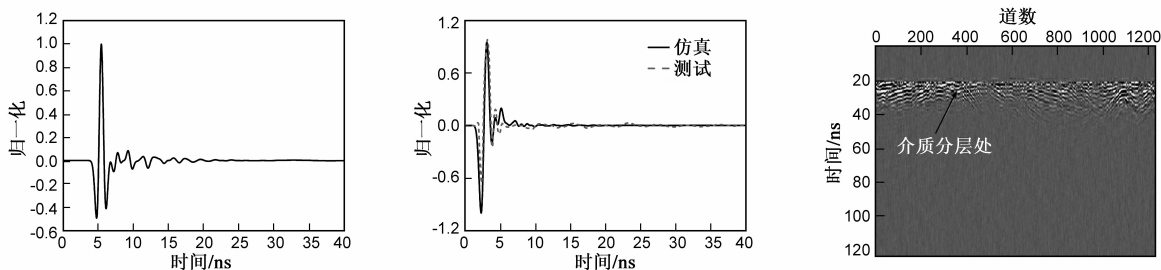


图9 归一化的车载探地雷达收发天线系统时域波形

图10 实测的沙漠内部剖面图

系统具有比较干净的直耦波和较小的振荡系数,并且仿真结果和实际测量结果具有很好的吻合度,能满足车载探地雷达系统的使用需求。

将收发天线系统安装在探测车的底部,收发天线分别通过特性阻抗为  $100\Omega$  的平行双线与探地雷达发射机和接收机相连接,平行双线长度为  $7\text{cm}$ 。探测车在沙漠进行了实地测试,测试得到了沙漠内部剖面图。如图 10 所示,采用本文设计的收发天线可以清晰地探测到沙漠内部的分层结构,这表明该天线具有良好的脉冲辐射特性,可以应用到超宽带探地雷达系统中。

### 4 结论

本文研制了一种用于车载探地雷达的超宽带收发天线系统。为了改善天线的辐射波形和带宽特性,提出了一种电阻加载半椭圆偶极子天线形式,采用电磁场数值计算软件 CST 对天线的电性能进行了研究,并分析了背腔高度和电阻加载对天线性能的影响,在保证收发天线的辐射特性满足探地雷达系统技术要求的前提下,使天线反射背腔的高度仅为  $22\text{mm}$ ,这极大的减小了天线结构对探测车移动过程中跨越障碍物能力的影响。根据设计结果制作了一套天线系统样机并安装在探测车上,在电波暗室中进行了测试,然后将其与探地雷达系统相连后在沙漠进行了试验测试,获得了清晰的沙漠内部剖面图。仿真结果和实验测试结果表明,该车载探地雷达天线系统可以满足超宽带雷达的探测需要。

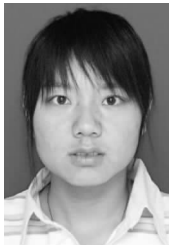
### 参考文献

- [1] D J Daniels. Ground Penetrating Radar[M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004. 3 - 5.
- [2] Takao Kobayashi, Seung Ryeol Lee, Jin Song Ping. Kaguya lunar radar sounder observation of sinus iridium[A]. Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar[C]. Shanghai: IEEE, 2012. 919 - 922.
- [3] T T Wu and R W P King. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading[J]. IEEE Trans on Antennas Propag, 1965, 13(5): 369 - 373.
- [4] A V Vorobyov, A G Yarovoy, P Aubry, L P Ligthart. Cavity-backed UWB antenna for impulse radio applications[A]. EuCAP 2007[C]. Edinburgh: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. 1 - 6.
- [5] R C Hardaig, M E de Cos, Y Alvaez, F Las-Heras. Novel bowtie antenna on artificial magnetic conductor for 5.8GHz radio frequency identification tags usable with metallic objects[J]. IET Microw Antennas Propag, 2011, 5(9): 1097 - 1102.
- [6] 方广有, 佐藤源之. 频率步进探地雷达及其在地雷探测中的应用[J]. 电子学报, 2005, 38(3): 436 - 439. Fang Guang-you, Sato Motoyuki. Stepped-frequency ground penetrating radar and its application for landmine detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 38(3): 436 - 439. (in Chinese)
- [7] 叶亮华, 褚庆昕. 一种小型的具有良好陷波特性的超宽带缝隙天线[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2862 - 2866. Ye Liang-hua, Chu Qing-xin. Improved notch-band slot UWB

antenna with small size [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38 (12): 2862 – 2866. (in Chinese)

- [8] A M Abbosh. Miniaturized microstrip-fed tapered-slot antenna with ultrawideband performance [J]. IEEE Antennas Propag Letters, 2009, 8(1): 690 – 692.
- [9] A S Turk. Hyper-wideband TEMhorn array design for multi band ground-penetrating impulse radar [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(1): 76 – 81.
- [10] A A Lestari, A G Yarovoy, Y Erbas, L P Lightart. RC-loaded bow-tie antenna for improved pulse radiation [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2004, 52(10): 2553 – 2563.
- [11] Kwan-Ho Lee, Chi-Chih Chen, Fernando L Teixeira, Robert Lee. Modeling and investigation of a geometrically complex UWB GPR antenna using FDTD [J]. IEEE Trans on Antennas Propag, 2004, 52(8): 1983 – 1991.
- [12] D Caratelli, A G Yarovoy, L P Lightart. Full-wave analysis of cavity-backed resistively-loaded bow-tie antennas for GPR applications [A]. Proceeding of the 5th European Radar Conference [C]. Amsterdam: IEEE, 2008. 204 – 208.
- [13] Diego Caratelli, Alexander Yaroboy, Leo P Lighthart. Accurate FDTD modelling of resistively-loaded bow-tie antennas for GPR applications [A]. EuCAP 2003 [C]. Berlin: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 2115 – 2118.
- [14] Andrian Andays Lestari, Endon Bharata, Andrian Bayue Suksmo, et al. A modified bow-tie antenna for improved pulse radiation [J]. IEEE Transactions on Antennas AND Propagation, 2010, 58 (7): 2184 – 2192.

## 作者简介



**李雪萍 (通信作者)** 女, 1985 年出生于河南焦作人。现为中国科学院电子学研究所博士研究生, 研究方向为电磁场数值仿真计算、超宽带天线的仿真和分析等。

E-mail: lxpslxhw@126.com



**纪奕才** 男, 1974 年出生于山东青岛, 中国科学院电子学研究所副研究员, 研究方向为超宽带电磁学、宽带天线技术、电磁场数值计算。



**卢伟** 男, 1984 年出生于山东青岛, 中国科学院电子学研究所助理研究员, 研究方向为超宽带天线技术、电磁场仿真。



**方广有** 男, 1963 年出生于河南确山, 博士, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”入选者, 主要研究方向为超宽带电磁学及其工程应用、损耗介质中隐蔽目标的电磁探测、微波成像新技术和新方法以及电磁场的数值计算方法等。