

## 探地雷达中蝶形振子天线的改进

周蔚红 刘培国 刘克成 何建国

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 探地雷达是进行地下环境无损探测的一种有效工具,用来探测和识别地下目标,比如水管、电力线和通信线路、考古方面的保护等。然而,传统的探地雷达系统在可靠性、分辨率、探测深度等方面存在不足。因此,改善被测信号特性,设计和开发更高性能的天线就显得很有必要。本文研制了一种贴片电阻加载的蝶形振子天线,用时域有限差分方法对其进行了分析,实际应用结果表明天线具有良好的波形保真度,良好的辐射特性和屏蔽效果。可以广泛地应用于探地雷达和其它超宽带系统。

**关键词:** 蝶形振子, 时域有限差分方法(FDTD), 探地雷达

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)07-1171-03

## Improvement on Bow-Tie Antenna of Ground-Penetrating Radar

Zhou Wei-hong Liu Pei-guo Liu Ke-cheng He Jian-guo

(Institute of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

**Abstract** The ground penetrating radar is greatly expected as an effective tool for nondestructively sensing subsurface environment, detecting and identifying underground objects such as water pipes, power and communication lines, archaeological remains, and so on. However, conventional ground penetrating radar systems are still insufficient for practical uses with respect to reliability, resolution, detectable depth, and so forth. In order to overcome these difficulties, it is important to improve characteristics of signals to be measured. Therefore, the design and development of antennas of higher performances would be invaluable. This paper designed a bow-tie antenna loaded by lumped resistors. Results of finite difference time domain calculation show good fidelity of the wave, and exciting radiation features as well as effect of shielding. It can be widely used in ground penetrating radar and other tra-wide-band systems.

**Key words** Bow-tie antenna, Finite difference time domain, Ground penetrating radar

### 1 引言

由于无载频探地雷达是一种近地面时域毫微秒脉冲探测系统,受半无限大有耗媒质界面的限制,使得对近地面时域天线的辐射特性的分析与计算极为困难。天线是探地雷达中的关键部件,目前这类天线主要有各种振子<sup>[1]</sup>、TEM喇叭<sup>[2-5]</sup>以及它们的变形<sup>[6-8]</sup>等,它们各具特点,也各有缺点。例如振子类天线具有一维小尺寸的结构特点,但其辐射在其垂直轴平面内是无方向的;喇叭类天线可以实现比较强的方向性,但其耦合到地表下的能量较小。为获得较好的分辨率和减小地面反射造成的干扰,必须在保证工作带宽内良好的幅频特性和幅相特性,良好的时域保真性的同时,结合天线处在近场区工作的特点,一方面尽量减小地表面的反射影响,另一方面尽量使辐射能量耦合到大地内,使天线具有良好的辐射特性和屏蔽效果,减小外界干扰和防止外辐射。本文研制了一种新型探地雷达天线,结合了振子类和喇叭类天线的优点,体积小,重量轻。具有良好的波形保真度,良好

的辐射特性和屏蔽效果。

### 2 天线结构

在雷达接收或发射系统中,天线是馈线的负载。因此,天线和馈线的匹配很重要,匹配不好,馈线上的电压驻波比大,便会导致辐射功率的降低。采用如图 1、图 2 所示的结构:

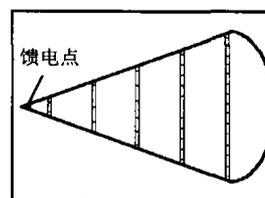


图 1 蝶形振子  
似天线的侧视图

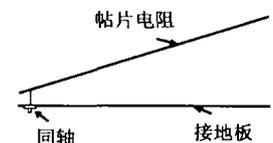


图 2 蝶形振子  
的俯视图

由于接地板与同轴电缆的屏蔽层相连,接地板的影响可以用天线的镜像来考虑,这样不仅避免了不平衡馈电,而且不需要附加任何额外的匹配措施。在天线体上即敷铜的介质

基片上刻制槽的结构,槽的两端用贴片电阻横跨,进行阻抗加载以吸收从馈电传向天线终端的电流,实现天线上电流的行波特性。天线结构简单,体积小,重量轻。不仅可以用于固定的电子系统,而且更适用于用在移动系统上,如车载、机载系统等等。

### 3 计算方法

#### 3.1 FDTD 模型

基于 Yee 网格并结合完全匹配层(Perfectly Matched Layer)技术的时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法,已经得到了广泛的应用。天线沿  $y, z$  方向伸展,阶梯近似的结果如图 3 所示。



图3 天线的阶梯近

#### 3.2 加载电阻元件的 FDTD 迭代公式

设  $z$  方向上有集中电阻加载元件  $R$ ,下面推导基于电导  $G$  的 FDTD 迭代公式:

$$(\nabla \times H)_z = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \quad (1)$$

$$\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2)$$

$\Delta x \Delta y (\nabla \times H)_z = c \Delta z (E_z^{t+1} - E_z^n) / \Delta t + G \Delta z E_z^{n+1}$ , 其中  $c = (\epsilon \Delta x \Delta y) / \Delta z$  为单位面积、单位高度电容,  $G = (\sigma \Delta x \Delta y) / \Delta z$  为单位电导。如果  $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ , 则

$$(C(\Delta z / \Delta t) + G \Delta z) E_z^{n+1} = C(\Delta z / \Delta t) E_z^n + \Delta x \Delta y (\nabla \times H)_z \quad (3)$$

即

$$\begin{aligned} E_z^{n+1} &= \frac{C(\Delta y / \Delta t)}{C(\Delta y / \Delta t) + G \Delta z} E_z^n + \frac{\Delta x \Delta y}{C(\Delta y / \Delta t) + G \Delta z} \frac{\partial H_x}{\partial y} \\ &= \frac{\epsilon \Delta x \Delta y / \Delta t}{\epsilon \Delta x \Delta y / \Delta t + G \Delta z} E_z^n \\ &\quad + \frac{\Delta x (H_{xy}^{n+1/2}[i, j+1/2, k] - H_{xy}^{n+1/2}[i, j-1/2, k])}{\epsilon \Delta x \Delta y / \Delta t + G \Delta z} \\ &\quad + \frac{\Delta x (H_{xz}^{n+1/2}[i, j+1/2, k] - H_{xz}^{n+1/2}[i, j-1/2, k])}{\epsilon \Delta x \Delta y / \Delta t + G \Delta z} \\ &= \frac{\epsilon \Delta x / \Delta t}{\epsilon \Delta x / \Delta t + G} E_z^n \\ &\quad + \frac{H_{xy}^{n+1/2}[i, j+1/2, k] - H_{xy}^{n+1/2}[i, j-1/2, k]}{\epsilon \Delta x / \Delta t + G} \\ &\quad + \frac{H_{xz}^{n+1/2}[i, j+1/2, k] - H_{xz}^{n+1/2}[i, j-1/2, k]}{\epsilon \Delta x / \Delta t + G} \\ &= B_1 E_z^n + B_2 (H_{yz}^{n+1/2}[i+1/2, j, k] - H_{yz}^{n+1/2}[i-1/2, j, k] \\ &\quad + H_{yx}^{n+1/2}[i+1/2, j, k] - H_{yx}^{n+1/2}[i-1/2, j, k]) \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $B_1 = (\epsilon \Delta x / \Delta t) / (\epsilon \Delta x / \Delta t + G)$ ,  $B_2 = \Delta t / (\epsilon \Delta x + G \Delta t)$ 。同理:

$$\begin{aligned} E_{xy}^{n+1} &= B_1 E_{xy}^n + B_2 (H_{xy}^{n+1/2}[i, j+1/2, k] - H_{xy}^{n+1/2}[i, j-1/2, k] \\ &\quad + H_{xz}^{n+1/2}[i, j+1/2, k] - H_{yx}^{n+1/2}[i, j-1/2, k]) \end{aligned} \quad (5)$$

### 4 计算及实验结果

采用 FDTD 上述计算方法得到的天线波形与在时域紧凑场暗室系统(Automatic Measuring Computational Collimator Complex)测得的波形对比如图 4。入射脉冲为高斯微分脉冲:

$$f(t) = (-2(t-t_0)/\tau) \exp\{- (t-t_0)^2 / \tau^2\} \quad (6)$$

在探地雷达中,因为天线工作在近场区,天线辐射的波形保真性对于埋地目标的识别十分重要。从图 4 可以看出,计算结果与测量结果比较吻合,证明了模型的有效性。

从图 5 可以看出,天线从 170MHz 到 1.5GHz 之间的频带驻波小于 2,所以天线具有很宽的阻抗频带特性,而天线的尺寸只有 170mm×210mm×510mm,相对于 170MHz 时的波长,天线的电尺寸是相当小的。

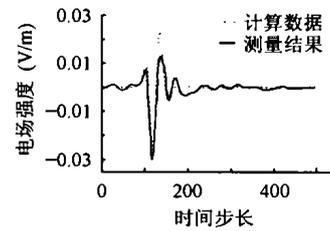


图4 天线正前方的辐射波形

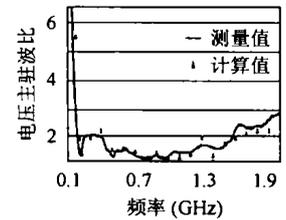


图5 天线的驻波特性

在探地雷达系统中,由于收发天线之间距离很近,收发之间的耦合是很强的。如图 6 所示:收发天线之间用两块金属隔板隔开,且两块隔板之间用阻性吸波材料填充,以吸收收发天线之间的耦合波。如图 7 所示,从波形看出,吸波材料不仅大大减小了收发之间的耦合,而且对波形有延迟作用。

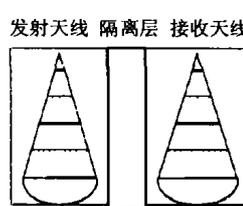


图6 蝶形振子天线在脉冲探地雷达工作示意图

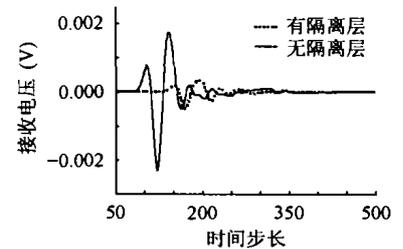


图7 接收天线的耦合波形

### 5 结束语

理论分析和实际应用都证实本文研制的探地雷达天线,具有良好的波形保真性和辐射特性,结构简单,体积小,重量轻。它结合了振子类喇叭类天线的优点,并克服了他们的一些缺陷。

## 参 考 文 献

- [1] Maloney J G, Smith G S. Optimization of a conical antenna for pulse radiation: An efficient design using resistive loading. *IEEE Trans. on AP*, 1993, 41(7): 940 – 947.
- [2] Farr E G, Baum C E: Impulse Radiating Antennas Ultra-wide Band Short-pulse Electro-magnetic. New York, Plenum Press, 1995, Chap. 1.
- [3] Robertson R C, Mogan M A. Ultra-Wideband Antenna for High-Power Operation Ultra-wide Band, Short-Pulse Electromagnetic. New York and London, Plenum Press, 1993, Chap.2.
- [4] Liu Kecheng, He Jianguo: Analysis and design of UWB TEM horn with waveform high fidelity. *Journal of NUDT*, 1994, 16 (1): 57 – 63.
- [5] 袁乃昌, 何建国, 等. 新型集成超宽带开槽天线的研制及其应用. *电子学报*, 1997, 25 (9): 43 – 46.
- [6] Darden W H, Burnside W D. An ultra-wide band antenna for pulse application. *Microwave Journal*, 1993, 36(1): 136 – 143.
- [7] Shlager K L, Smith G S, Maloney J G. Optimization of bow-tie antenna for pulse radiation. *IEEE Trans. on AP*, 1994, 42(7): 975 – 982.
- [8] 刘克成, 何建国, 尹家贤, 刘培国. 超宽带圆锥 TEM 喇叭天线的分析与设计. *微波学报*, 1995, 11(1): 66 – 70.
- 周蔚红: 女, 1972 年生, 博士生, 主要从事超宽带信号辐射和散射方面的研究, E-mail:zwhchsh@tom.com.
- 刘培国: 男, 1968 年生, 副教授, 研究兴趣为: 电磁场数值计算目标特性电磁兼容.
- 刘克成: 男, 1939 年生, 教授, 一直从事天线及超宽带技术方面的研究.
- 何建国: 男, 1954 年生, 教授, 博士生导师, 电子学会高级会员, 出版专著 5 部, 先后在国内外刊物发表论文 50 余篇. 获各种科技进步奖 10 余项, 研究领域超宽带技术和电磁兼容等.