

瞬态电磁脉冲在地下目标探测中的应用

王保义 徐润民 邓扬健 余惠卿

(四川大学无线电系,成都 610064)

龙宪惠 王永德

(电子技术研究所,成都 610036)

摘要 本文描述了纳秒电磁脉冲在探测地下目标中的基本方案;研制了一种高质量行波天线。作者采用的是三层结构的扇形天线,其辐射效率高,行波特性好。终端采用快速、高分辨率的图形显示系统,对埋地深度在1m左右的金属管道,能清晰的显示,并打印出目标特性。整个装置与国内外同类装置相比,分辨率高,终端处理时间短,符合工程需要。

关键词 地下目标探测; 瞬态电磁脉冲; 行波天线设计; 目标成像系统

1. 前言

近20多年来,使用无载波的电磁窄脉冲探测地下目标取得了很大的进展^[1-7]。这种形式的雷达常称为冲激脉冲雷达,它与别的探地系统比较,具有距离分辨率高,结构简单,价格低廉的特点。发射信号为周期性单次电磁脉冲,具有极宽的频谱,可视为一次宽带范围的扫频过程,因而在识别目标时信息量极为丰富。接收终端可以采用时域处理技术。

冲激脉冲雷达广泛地用于城建、交通、地矿、考古及军事等部门。冲激脉冲雷达与常规探空雷达的区别在于,它主要用于探测地下目标。电磁波在地下媒质中传输有很大的损耗,色散严重。

1985年美国GSSI公司曾在我国试验SIR-8型地下界面雷达,实测目标是直径200mm,深度为80cm的水管。在土面上实测,后经过近两小时的信号处理,获得较为清晰的回波信息^[8]。1986年日本学者报道了一个地下目标探测微机成像系统^[9]。他们采用固定于卡车上的宽带天线,原始数据为数十条波形记录曲线,但结果对水管的回波信号,十分难以辨认。同年日本又报道了另一实验结果^[6],他们对水平间距50cm,垂直间距20cm的四根管道进行探测和处理,可以给出表征管道的图案。1988年美国学者报道了地下目标成像系统^[1]。整个装置固定在一辆货车上,经过复杂的信号处理给出了地下管线不明显的灰色图。国内学者也报道了地下管道的实验结果^[4,7,8],但只能给出目标反射波形的记录曲线,不易辨认。

我们研制的系统,水平分辨率为50cm,垂直分辨率为20cm,具有较高的水平。系统轻便,天线小巧(线度约70cm),便于野外工作。回波信号经过处理能在3min左右打出记录曲线和目标的灰色电平图。十分快速,结果明显,便于识别,具有很高的实用价值。

2. 探地雷达方程及提高探测深度的要求

利用雷达原理及空气与地面交界的不连续条件可推出如下方程^[8]

$$S_{in} = \frac{P_t \eta_e D_t \eta_r \sigma T A_r}{(4\pi R^2)^2} e^{-0.46\delta R} \quad (1)$$

其中, P_t 为发射天线的发射功率; D_t, η_r 分别为发射天线的方向性系数及效率; A_r 为接收天线的有效面积; σ 为雷达目标的截面积; η_e 为电磁能量耦合入地层的效率; T 为目标回波从地层向空气中的透射系数; δ 为地层媒质对电磁波的衰减指数; R 为埋地目标距地面上天线的距离, 当收发天线系统放在地面上时, R 约等于目标的埋地深度; S_{in} 是雷达接收机输入端获得的回波信号功率。

如果在(1)式中, $P_t = P_{t,max}$, 即发射机输出最大功率; $S_{in} = S_{in,min}$ 即接收机的接收信号为最小的可检测功率, 则此时 $R = R_{max}$, 为雷达最大可探测距离。

$$(4\pi R_{max}^2)^2 \exp(0.46\delta R_{max}) = \eta_e D_t \eta_r \sigma A_r T (F/M) \exp(0.23I) \quad (2)$$

其中 $F = S_{in,max}/S_{in,min}$, 即雷达接收机动态工作范围; $M = S_{in,min}/S_N$, 称雷达的识别系数, S_N 是接收机的噪声电平; $I = 10 \log(P_{t,max}/S_{in,max})$ 称为收发天线的隔离度。由上式看出, 为了提高探地雷达的探测深度, 必须从下列几方面进行。

(1) 提高收发天线(包括整个收发系统)的隔离度, 即增大 I 值。大大减少收发系统的噪声电平, 特别是系统各部分之间的失配反射及各种杂散的电磁干扰, 并降低接收机的噪声电平。

(2) 提高发射机的辐射功率, 在冲激脉冲雷达里主要是要增大电磁脉冲的幅度, 适当提高电磁脉冲的重复频率, 增大发射天线的增益。最关键的是要设计一副行波性能特别好的收发天线, 增益高, 对电磁脉冲拖尾电平低, 拖尾时间短, 保持良好的与地耦合性能。

(3) 降低识别系数 M , 即在接收终端采取一些消除噪声背景的办法, 并采用有利于鉴别目标的新技术。

3. 系统方案和行波天线设计

图 1 示出了冲激脉冲雷达方框图。其中的宽带限幅器用来限制发射的电磁脉冲直接到达接收天线的强信号, 以保护取样器不受破坏。此外, 它可以用来补偿收发天线平行放置时, 隔离度不足的问题。用来将无用的尖脉冲部分大部削去, 以便突出有用回波信号部分, 便于采样和信号处理。我们用的纳秒脉冲是高斯型脉冲, 幅度为 100V 左右, 半功率点宽度为 2.5ns, 上升沿 1~1.2ns, 电磁脉冲的重复频率可变, 分别为 50kHz、100kHz、200kHz。在冲激脉冲雷达中, 宽频带行波天线的设计是一个关键问题。1965 年, T. T. Wu et al.^[9] 分析了一臂长为 l , 半径为 a 的圆柱型对称偶极天线, 并提出连续电阻加载以构成无反射式行波天线。设 $Z(z)$ 为天线一臂上阻抗随长度的分布, $I(z)$ 为天线上电流分布, 如图 2 所示。

当其上电阻率分布取下式

$$Z(z) = 60\phi / (l - |z|) \quad (3)$$

其中 $\phi = 2[\text{sh}^{-1}(l/a) - C(2K_0a, 2K_0l) - jS(2K_0a, 2K_0l)] + [j/(K_0l)][1 - \exp(-j2K_0l)]$

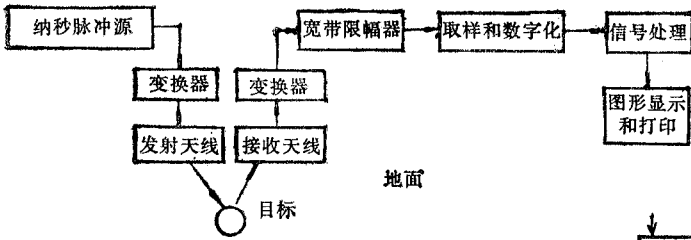


图1 系统原理方框图

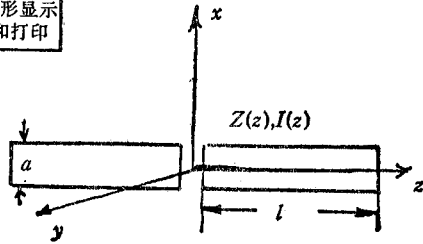


图2 连续电阻加载的圆柱天线

$$C(a, x) = \int_0^x \frac{1 - \cos \sqrt{a^2 + u^2}}{\sqrt{a^2 + u^2}} du, \quad S(a, x) = \int_0^x \frac{\sin \sqrt{a^2 + u^2}}{\sqrt{a^2 + u^2}} du$$

K_0 为真空中的波数。这时，天线上只维持 z 方向的行波电流，即 $I(z) = C(|l| - |z|) \exp(-j2K_0|z|)$ 。 C 为常数， $C = j2\pi\omega\epsilon_0 V_0 / \phi(1 + jK_0 l)$ 。天线上行波电流幅值呈线性递减分布，天线终端不再反射，但这种天线的缺点是辐射效率较低。当用纳秒电磁脉冲激励该加载天线时，沿天线臂仍能保持幅度递减的无色散脉冲电流单向行波，天线终端无反射，且激励脉冲电流的波形基本保持不变。在许多文献中都用极化去耦的正交结构^[4,7]，我们则研制了一种收发天线平行放置的特殊电阻加载的偶极天线，其原理图如图3所示。此天线与国内外已公开发表的的天线结构相比，不同处在于靠地表面一侧全由导体构成，它可以产生强烈的辐射；最上一侧是一种特殊的电阻性吸收材料涂层；中间为介质层；其电阻率沿臂长的分布与国内外其它作者的天线刚好相反，靠端点电阻极小；而靠馈电端达到极大。从本质上说，此天线是一种折叠型振子天线，其形成行波的分析，正在进行之中。

这种天线行波性能好，辐射效率高，结构简单，加载方式和电阻率分布独特，符合实际使用。

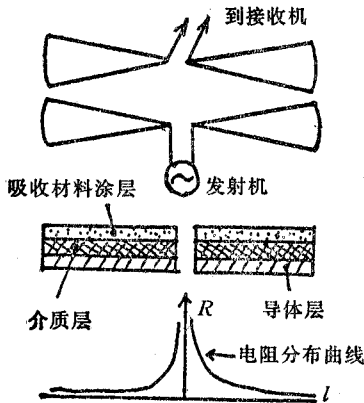


图3 天线示意图

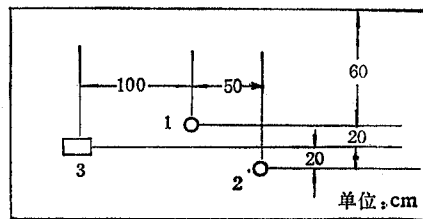


图4 实验场地示意图

4. 终端处理系统及实验结果

本系统采用 APLLE-11 微机，A/D 变换器采用 12 位，转换时间小于 $60\mu s$ 每一个时

域波形采样 256 点。

为了能实时给出探测的地下目标反射的信号并给出灰色电平图显示，我们分别采用了高级语言程序及 6502 机器汇编语言编制运用软件，完成了从数据采集，图形显示到打印结果全套快速处理过程。全屏幕高清晰图形显示只需 20s。

实测时，是让天线的臂长方向与地下管道处于平行位置，天线快速移动，同时进行数据采集及处理，天线的导体层离地面较近或紧贴着地表面，地面对天线来说相当于一个强耦合负载，所以增强了能量向地下层的耦合。经过实测，天线的背向辐射(向空气中)非常小，几乎测不出来。但是当天线与地表面距离有 10cm 左右时，从地表的杂散反射很大，幸而，这种间距在实用中是不必要的。

一般来说，对脉冲源的波形是有较严格的要求的，特别是后沿拖尾要短，否则影响目标反射波形的有效检测。但收发脉冲经过变换器后都要产生一定的畸变。解决这一问题，一是要设计宽带的平衡变换器，另外是在信号处理中采取有效的对消办法。我们在处理信号时使用了一种纵向波形相比较的方案，把前一个波形与后一个波形相比较，无变化的部分相消，只保留了波形的变化部分，从而有效地克服了脉冲后沿的影响。还大大地补偿了收发天线隔离度不够的缺点。

下面是实验示意图及结果。我们自制了一个 $5000 \times 2300 \times 1100\text{mm}^3$ 的坑，内填自然土质以近似的模拟真实地下层。最初在深 60cm 处埋下一根直径 100mm 的铸铁管进行单目标测试；其后又在其左边和右边各埋一个目标，右边目标为深 100cm，直径 100mm 的水管；左目标为 $7 \times 4\text{cm}^2$ 的方铜管，深 80cm；如图 4 所示。图 5 示出了单目标的灰色电平图。图 6 和图 7 分别给出了双目标和三目标的测试灰色电平图，图中每一个钟形曲

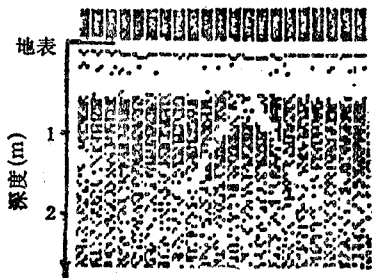


图 5 单目标测试

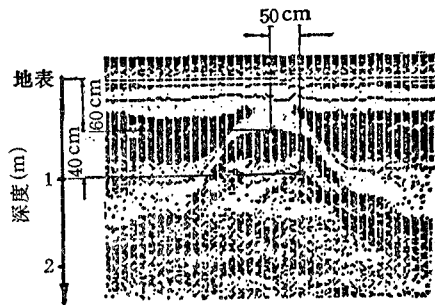


图 6 双目标测试

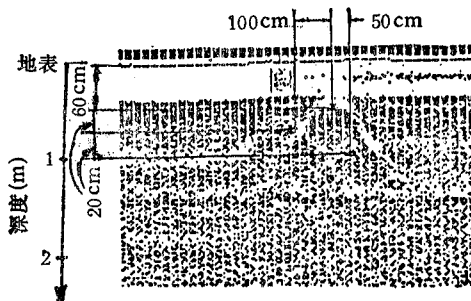


图 7 三目标测试

线代表地面下的一根管道。图 6 和图 7 中还分别标明了各管道的深度和间距。目标图象清晰,易于辨识,其可测的地下的目标距离为 1m 左右。

参 考 文 献

- [1] D. J. Daniels et al., Introduction to Subsurface Radar, Special Issue on Subsurface Radar, IEE Proc. —F, August, (1988), 278—320.
- [2] J. D. Young, R. Caldecott, Underground Pipe Detector, U. S. Patent 4062010, (1977).
- [3] L. C. Chan, D. L. Moffatt, L. Peter, *Proc. IEEE*, **67**(1979) 7, 991—1000.
- [4] 潘仲英等,电波科学学报,**3**(1988)3/4,68—76.
- [5] Keiichi Ueno et al., An Underground Object Imagine System with Computerized Reconstruction, NTT Elec. Com. Lab., 9—11, Midori-Cho, 3-Chome Musashino-shi, Tokyo 180 Japan, (1986).
- [6] Teruo Usami et al., Detection of the Underground Pipes by Synthetic Aperture Techniques, *The Trans. of the IECE of Japan*, **69E**(1986) 4,491—493.
- [7] 廖春林,章锡元,无载脉冲地下目标探地系统的实现与实验,1986年全国电波年会论文,北京,第351—353页。
- [8] 聂在平,谢俊,用瞬变电磁脉冲进行地下目标探测,电子科技大学技术报告,成都,1985年12月。
- [9] T. T. Wu, R. W. P. King, *IEEE Trans. on AP*, **AP-12** (1965) 5, 369—374.

APPLICATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PULSE IN DETECTING SUBSURFACE TARGETS

Wang Baoyi Xu Runming Deng Yangjian Yu Huiqing

(Sichuan University, Chengdu 610064)

Long Xianhui Wang Yongde

(Institute of Electronic Technology, Chengfu 610036)

Abstract A basic scheme for detecting subsurface targets with EM pulse of nanoseconds and an especially developed travelling-wave antenna of high quality are described. The antenna is a sort of sector antenna with structure of three layers, which possesses higher radiation efficiency and better travelling-wave properties. A fine resolution graphic system and a high speed display are employed in terminal processing. Metal pipes burried about 1m under the earth can be detected and clearly displayed. High resolution and short processing time of the system, compared with other similar devices, make it suitable for engineering use.

Key words Subsurface target detection; Transient EM pulse; Travelling-wave antenna; Target imaging system