

## 地下目标瞬态谐振特性研究

贺国权<sup>①</sup> 方广有<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(长江师范学院电子信息工程系 重庆 408003)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

**摘要:** 利用谐振特性实现目标辨识是雷达探测领域研究的热点问题之一, 地下目标在电磁波照射下也会产生外部谐振现象, 该谐振信号与媒质特性、目标固有特性有关。该文通过 FDTD 方法计算了地下目标的瞬态谐振特性以及损耗媒质参数对目标谐振信号的影响, 利用极点展开方法(SEM)对计算结果进行了分析, 在计算分析的基础上研究了利用谐振特性识别地下目标的可行性。结果表明: 在一定条件下, 利用目标的外部谐振特性可以识别地下目标。

**关键词:** 探地雷达; 地下目标; 谐振特性; 极点展开方法; FDTD 方法

中图分类号: TN959.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2081-04

## Study on the Transient Resonances of Buried Targets

He Guo-quan<sup>①</sup> Fang Guang-you<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Dept. of Electronic Information Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408003, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Object discrimination based on resonant properties is one of the research topics in radar detection domain. Obvious transient resonances will take place for some kinds of underground Perfectly Electrical Conductors (PEC) targets under impulse electromagnetic field illumination. In this paper, numerical simulation of such resonances has been done by three-Dimensional Finite-Difference Time-Domain(3D-FDTD) method. The calculated results are verified by impulse Ground Penetrating Radar(GPR) measurements and good agreements are obtained. The properties of the resonant signals from buried PEC targets are analyzed through Singularity Expansion Method(SEM). The possibility for identifying buried target by its poles are studied. It is shown that one can apply resonant properties to identify buried targets under some condition.

**Key words:** Ground Penetrating Radar (GPR); Buried target; Resonant properties; Singularity Expansion Method (SEM); FDTD method

### 1 引言

经过二十余年的发展,探地雷达技术对地下目标(深度一般小于 50m)的高分辨率探测能力已逐渐为广大工程技术人员所认识,并在国民经济建设的众多部门得到了极其广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。但目前商业化的探地雷达产品基本尚不具有目标辨识能力。由于土壤环境的复杂多变性,探地雷达用于探测地下目标时,大多数情况下只能解决地下是否存在异常体的问题,而基本上不能回答地下目标是什么。如何识别探地雷达探测到的目标一直是国内外学者研究的热点和难点问题,也是制约探地雷达技术进一步发展和应用的技术“瓶颈”。

由电磁场理论知,对于自由空间中的目标,如果入射电磁波的频率与目标本身固有的本征频率(或极点)相一致,被照射目标将产生外部谐振现象。目标本身固有的本征频率(极点)与目标在空间的取向和外加照射场特性无关,利用目标的这一特性可以实现目标的识别。对于埋入地下的目标,在外

加电磁场作用下,在一定条件下也能够产生外部谐振现象。本文利用时域有限差分(FDTD)技术分析计算埋地目标的外部谐振特性。由于细长导体具有极其明显的外部谐振现象,本文主要对该类目标的谐振特性进行计算和分析,以此来说明利用极点或 SEM 技术识别埋地目标是否可行。

### 2 三维 FDTD 计算模型

FDTD 方法是一种有效的电磁场数值计算方法,在电磁场辐射和散射等问题计算中得到了极其广泛地应用。本文待分析模型如图 1(a)所示,包括:雷达收发天线、有耗媒质、目标(细直导体)。雷达收发天线是一种 Bow-Tie 背向屏蔽型结构,发射天线和接收天线放置于一个底端开口的金属屏蔽罩内,如图 1(b)所示。收发天线的中心频率和工作带宽均为 830MHz 左右,属于超宽带(UWB)天线。天线馈点输入脉冲宽度为  $t_w = 1.2\text{ns}$ ; 天线辐射板终端通过 4 只阻值为 200  $\Omega$  的电阻与金属屏蔽罩相连接,如图 1(b)所示。

在 FDTD 法计算中,为了提高计算效率和减少计算数据

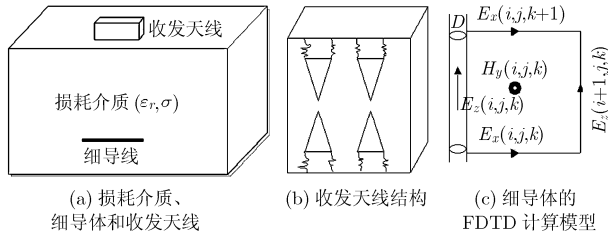


图1 实验测量及仿真计算模型示意图

存储量,对于计算模型的空间剖分网格  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$  在满足 FDTD 算法稳定条件的前提下,希望  $\Delta$  值尽量大。对于细导体目标而言,  $\Delta$  值常常远大于导体的直径,因此,在利用 FDTD 法计算该类目标时,需要对常规 FDTD 迭代公式进行修正。对于如图 1(c) 所示的坐标系统,仅需要对磁场分量  $H_x$  和  $H_y$  进行修正,其它场分量的计算公式不变<sup>[2]</sup>。其修正后的计算公式如下:

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) = H_x^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} \left[ E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \right] + \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} \frac{2}{\ln \frac{\Delta y}{d}} E_z^n\left(i + 1, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) \quad (1a)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) = H_y^{n-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} \left[ E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) \right] + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} \frac{2}{\ln \frac{\Delta x}{d}} E_z^n\left(i + 1, j, k\right) \quad (1b)$$

这里  $d$  是导体目标的半径,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  分别为余氏(Yee)剖分网格在  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向上的剖分步长,并选取  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ ;  $\Delta t$  是计算的时间步长,为了保证计算的稳定性,在本文计算中选取  $\Delta t = \Delta/(2c)$ ,  $c$  为空气中电磁波传播速度。

在下面的计算中,选取  $\Delta = 1\text{cm}$ ,  $d = 1\text{mm}$ ; 并应用 Mur 二阶吸收边界条件(ABC)处理计算网格截面(线)。天线馈电点的输入电压为半波平方正弦函数,即

$$V_i(t) = V_m \sin^2\left(\frac{\pi t}{t_w}\right), \quad 0 \leq t \leq t_w \quad (2)$$

其中  $t_w$  是脉冲宽度。

### 3 计算结果及结果讨论

为了证实 FDTD 计算结果的正确性,在图 2 中将实验测量结果和数值计算结果进行了对比。其中导体的直径和长度分别为 2mm 和 22cm,在损耗介质中的埋深 10cm。有耗媒质是一种泡沫塑料,其电磁参数通过网络分析仪测量的结果为  $\epsilon_r = 1.5$ ,  $\sigma = 0.002\text{S/m}$ 。目标位于收发天线箱体的正下方,并且其轴向平行于天线的 E 面。在 FDTD 计算中,选

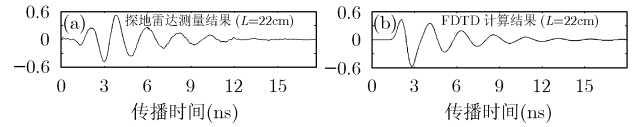


图2 媒质中细导体时域回波信号实验测量(a)和 FDTD 计算结果(b)

取脉冲宽度  $t_w = 1.2\text{ns}$ 。

从图 2 中可以看出, FDTD 法计算结果与实验测量结果有很好的 consistency。结果同时表明,在瞬态电磁脉冲照射下,位于有耗媒质中的目标能够产生明显的外部谐振现象。

为了简化计算,在下面的计算中假设损耗媒质是均匀时不变和非频变的,由后面的分析可以看出,这种假设并不影响本文的分析结论。

在下面的计算中,始终选取媒质的相对介电常数  $\epsilon_r = 4.0$ , 天线馈电点输入脉冲宽度  $t_w = 2.0\text{ns}$ , 细直导体目标的轴向与天线的 E 面相平行。

(1) 选取媒质的电磁参数  $\epsilon_r = 4.0$ ,  $\sigma = 0.002\text{S/m}$ , 导体长度  $L$  分别为  $L=6, 10, 14, 16, 18, 22, 26, 30, 36$  和  $40\text{cm}$ , 埋深为  $10\text{cm}$ , 则接收天线接收到的波形如图 3 所示。

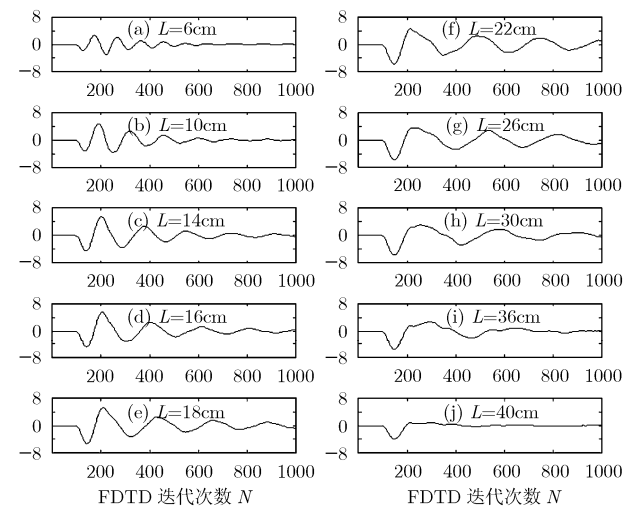


图3 不同长度细导体的时域回波信号

( $\epsilon_r = 4.0$ ,  $\sigma = 0.002\text{S/m}$ , 目标埋深  $10\text{cm}$ )

(2) 选取媒质的电磁参数  $\epsilon_r = 4.0$ ,  $\sigma = 0.02\text{S/m}$ , 其它条件不变, 则接收波形如图 4 所示。

(3) 选取媒质的电磁参数  $\epsilon_r = 4.0$ ,  $\sigma = 0.05\text{S/m}$ , 其它条件不变, 则接收波形如图 5 所示。

从图 3-图 5 知,在瞬态电磁脉冲照射下,损耗媒质中细直导体目标产生的外部谐振信号受媒质电导率影响很大,随着媒质电导率增大,导体产生的振荡信号迅速衰减。当媒质电导率达到  $\sigma = 0.05\text{S/m}$  时,导体目标的回波信号已基本不具有外部振荡特性。由后面的分析知,此时很难从目标回波中提取出表征目标特性的复极点或谐振频率,不能应用 SEM 理论或极点方法识别被探测目标。

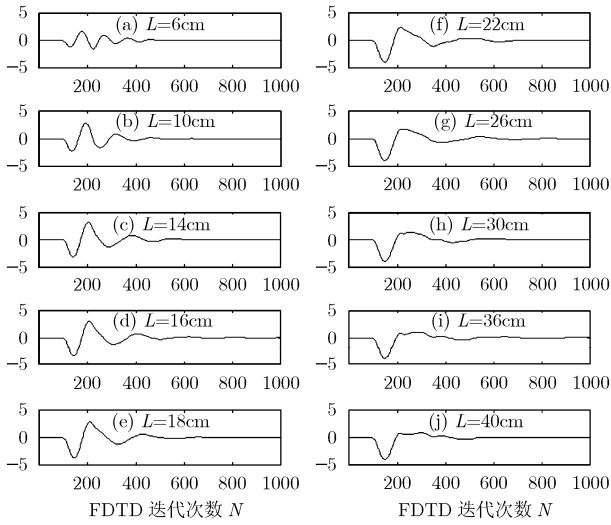


图4 不同长度细导体的时域回波信号  
( $\epsilon_r=4.0$ 、 $\sigma=0.02\text{S/m}$ ，目标埋深10cm)

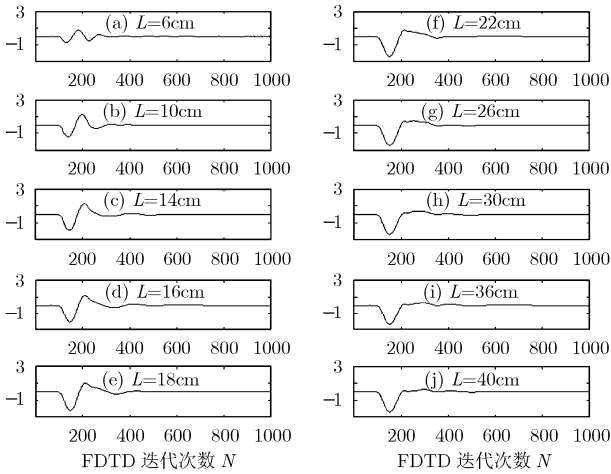


图5 不同长度细导体的时域回波信号  
( $\epsilon_r=4.0$ 、 $\sigma=0.05\text{S/m}$ ，目标埋深10cm)

上述 FDTD 计算结果可以通过 Morgan 推导的解析公式予以分析。根据 Morgan 给出的方法<sup>[3]</sup>，导体目标产生的瞬态电磁信号可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{F}(\bar{r}, t) &= \bar{F}^e(\bar{r}, t) + \bar{F}^{PO}(\bar{r}, t) + U(t - t_0) \\ &\cdot \sum C_n(\bar{r}) \bar{h}_n(\bar{r}) \exp(s_n t) = \bar{F}_{e-t}(\bar{r}, t) + \bar{F}_{SEM}(\bar{r}, t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\bar{h}_n(\bar{r}) \exp(s_n t)$  导体目标的自然模或固有极点， $s_n = \alpha_n + j2\pi f_n$  为目标的复谐振频率或极点， $\alpha_n$  是衰减因子， $f_n$  是谐振频率； $U(t - t_0)$  单位阶跃函数， $t_0 = |\bar{r}|/c$ ； $\bar{F}_{e-t}(\bar{r}, t)$  是系统的早期响应，仅与激励信号源的特性有关，由  $\bar{F}^e(\bar{r}, t)$  和  $\bar{F}^{PO}(\bar{r}, t)$  两部分组成， $\bar{F}^e(\bar{r}, t)$  为目标自然模的初期散射分量(the startup scattering of the natural modes)， $\bar{F}^{PO}(\bar{r}, t)$  是物理光学(OP)散射场； $\bar{F}_{SEM}(\bar{r}, t)$  为导体目标产生的外部谐振信号在时间上趋于稳定后的部分， $\bar{F}_{SEM}(\bar{r}, t) = \sum C_n(\bar{r}) \bar{h}_n(\bar{r}) \exp(s_n t)$ 。

由图3，图4，图5和公式(3)知，在瞬态电磁脉冲激励下，地下目标能够产生瞬态谐振现象。目标回波信号基本上由两部分组成：(1)主要由激励源特性决定的早期响应；(2)主要由目标特性和媒质特性决定的晚期振荡信号。早期响应受媒质特性影响较小，而反映目标特性的振荡信号部分受媒质参数影响较大。

对于细长型导体目标，其极点  $s_n$  可以利用如下的计算公式近似得到<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} s_n &= ((c/L)\{jn\pi - \Omega^{-1}[Ln(2|n|\pi\Gamma) - C_i(2n\pi) \\ &+ jS_i(2n\pi)] + O(\Omega^{-2})\}, n = \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

这里  $\Gamma = 1.781$  是 Euler 常数， $C_i(x)$  和  $S_i(x)$  分别为正弦和余弦积分， $\Omega = 2Ln(2L/D)$ ， $L$  和  $D$  分别为导体的长度和直径 ( $D=2d$ )。

通过式(4)计算出图3，图4，图5中各种长度导体目标对应的复极点并对比图中的计算波形可以得出如下结论：在瞬态电磁脉冲激励下，细导体目标产生的外部谐振信号主要来自固有极点中第一对极点的贡献，即在复平面上最靠近坐标原点的极点；高阶极点对外部振荡信号的贡献随时间增长迅速衰减。

为了定量分析损耗媒质对目标谐振特性的影响，这里以长度  $L=16\text{cm}$  的导体目标为例进行分析。当该目标分别埋入两种介质：(1)介质的电磁参数  $\epsilon_r=4.0, \sigma=0.002\text{S/m}$ ；(2)介质的电磁参数  $\epsilon_r=4.0, \sigma=0.02\text{S/m}$ 。对应的回波响应曲线分别如图6所示。从图6看出，目标的相应曲线可以划分为4个区域(区域1~区域4)，在每个区域内分别定义参数  $r_n = \frac{\min[f_1(n)]}{\min[f_2(n)]}$ ， $r_p = \frac{\max[f_1(n)]}{\max[f_2(n)]}$ ，其中  $f_1(n)$  和  $f_2(n)$  分别为导体目标埋入第1种媒质和第2种媒质中的时域回波曲线。则在4个区域内  $r_n$  和  $r_p$  的值分别为 1.4165, 1.7755(区域1)；2.7182, 3.4551(区域2)；5.5714, 9.0485(区域3)；12.3994, 18.2159(区域4)。可以看出，随着观测时间的延长， $r_n$  和  $r_p$  的值急剧增加，表明第2种介质中导体目标的回波信号(谐振信号)急剧减小。

另一方面，由电磁理论知，媒质的损耗可以用其损耗正切值来表示，即  $\tan^2 \delta = (\sigma/(\omega\epsilon))^2$ 。分别将  $\omega = 2\pi f_0$ ， $f_0 =$

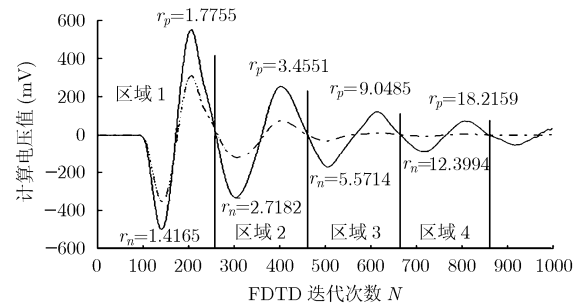


图6 位于两种不同损耗媒质中的细导体时域回波信号  
(实线  $f_1(n)$ :  $\epsilon_r=4.0$ 、 $\sigma=0.002\text{S/m}$ ; 虚线:  $\epsilon_r=4.0$ 、 $\sigma=0.02\text{S/m}$ )

$8.3E+8\text{Hz}$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r = 4\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 0.002\text{S/m}$ ,  $0.02\text{S/m}$  代入该式, 计算值分别为  $1.17E-4$ ,  $0.0117$ 。可见这两种媒质都属于低损耗介质, 即  $\tan^2\delta \ll 1$ 。但当  $\varepsilon = 4\varepsilon_0$ ,  $\sigma = 0.02\text{S/m}$ , 地下目标回波信号的振荡部分已很不明显, 这时已很难利用极点方法识别被探测到的目标。

可见, 对于地下目标探测而言, 依靠极点方法识别目标只能在媒质电导率很小, 即损耗很小情况下才能可靠地应用。

为了说明上述计算分析方法在实际地下目标探测中的应用, 这里给出一个应用实例。探地雷达天线参数和损耗介质参数分别如图1所示, 长度不同的金属细导线目标埋设深度10cm。当金属细导线长度发生改变时, 探地雷达接收信号波形如图7所示。

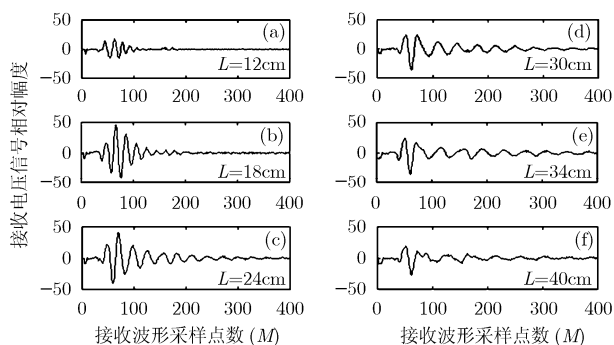


图7 地下目标谐振特性实验测量值

从图7(b)、7(c)看出, 当地下目标处于谐振状态时, 探地雷达接收到的回波信号明显增强, 对应金属细导线的长度  $L$  分别为18cm和24cm; 反之, 尽管目标较长, 回波信号也较弱, 如图7(f)所示, 此时, 目标长度  $L=40\text{cm}$ 。

#### 4 结束语

从上面的计算与分析可以看出, 当探地雷达用于探测地

下目标时, 在一定条件下, 地下目标会发生外部谐振现象, 该谐振现象在雷达接收信号中表现为具有明显的衰减振荡部分。该振荡信号来自于目标固有极点的贡献, 而且主要是在复平面中最靠近坐标原点位置的极点的贡献。可以利用这一特性来识别探测到的地下目标。但由于该振荡信号随媒质衰减量的增大而急剧地减小, 因此, 这种基于SEM理论的目标识别技术只能在媒质衰减量很小的情况下才能可靠性应用。

本文以具有明显外部谐振特征的细直导体为例, 计算并分析了地下目标外部谐振特性受媒质衰减量的影响, 从本文的计算结果可以看出, 对于地下非金属地雷等具有较弱外部谐振特征的一类弱散射目标, 利用基于SEM理论的极点识别方法识别该类目标是非常困难的。必须寻求新的识别技术。

#### 参考文献

- [1] Daniels D J. Surface Penetrating Radar [M]. 2nd Edition. IEE Press, 2004.
- [2] 方广有. 无载频脉冲探地雷达的模拟计算及应用[D], [博士论文], 西安: 西安交通大学, 1996.
- [3] Morgan M A. Singularity expansion representations of fields and currents in transient scattering [J]. *IEEE Trans. on AP*, 1984, 32(5): 466-473.
- [4] Marin L, et al. A simple way of solving transient thin wire problems [J]. *Radio Sci.*, 1976, 11(2): 149-155.

贺国权: 男, 1962年生, 副教授, 主要从事电子科学技术、信号检测与处理等方面的研究工作。

方广有: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 中科院大功率微波与电磁辐射重点实验室主任, 中科院“百人计划”人员, 主要从事电磁场与微波技术、超宽带电磁学理论与技术、探地雷达方法与技术等方面的研究工作。