

探地雷达时域有限差分法正演模拟

薛桂霞¹, 王鹏²

(1. 九江学院 土木工程与城市建设学院, 江西 九江 332005; 2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在以往雷达波的正演模拟中, 借鉴地震波中成熟的正演模拟方法, 均采用模拟声波方程的方法, 精度不够高。因此从麦克斯韦方程组出发, 采用目前电磁场理论中最常用的时域有限差分法, 对探地雷达进行了正演模拟。为了进一步说明其正确性, 对正演模拟的结果又进行了偏移处理, 从结果看出该方法的正确性及可行性。

关键词: 探地雷达; 雷达波; 时域有限差分; 正演模拟

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2006)03-0244-03

探地雷达的正演模拟一直是国内外专家学者的重要研究方向之一, 目前国外学者研究较多, 1994年 Tsili Wang 做了三维时域有限差分法探地雷达正演模拟^[1], 1998年 How wei Chen 做了二维时域有限差分法探地雷达正演模拟^[2]。在这些模拟中, 均采用时域有限差分法, 并引入了1966年由 K. S. Yee 提出的具有代表性的 Yee 氏网格。由于这些模拟均以符合电磁波传播的 Maxwell 方程为出发点, 所获得的正演剖面既能模拟雷达波传播的运动学特征, 同时也能较好地模拟其动力学特征。在国内, 这一方面的研究工作开展的相对较少, 1994年沈飏将声波方程代替电磁波的传播方程进行了正演模拟; 1999年底青云和王妙月进行了探地雷达剖面的有限元仿真模拟, 从麦克斯韦方程组出发, 并且考虑了衰减项; 1999年岳建华将超吸收边界条件应用在探地雷达的剖面正演中。上述模拟方案均只对一两个极简单的地质模型进行了模拟, 其模拟结果在反映对应模型的运动学特征或动力学特征方面均存在不足。而从电磁波传播所满足的基本方程—麦克斯韦方程组出发, 采用时域有限差分法正演模拟探地雷达剖面的研究在国内尚未见有关文献报道。笔者的研究以麦克斯韦方程组为出发点, 采用时域有限差分法, 以 Yee 氏网格剖分单元, 同时考虑超吸收边界条件和理想频散关系, 进行了探地雷达剖面的正演模拟。

1 时域有限差分法

雷达波正演是雷达资料反演和解释的依据。在探地雷达的许多应用中, 人们发现电磁波在地下介

质传播时衰减得十分迅速, 并有明显的频散现象。这说明, 电磁波在地下介质中传播所遵循的 Maxwell 方程组中, 传导电流项起着不可忽略的作用, 因此, 在模拟实际介质中高频雷达波的传播时, 必须考虑 Maxwell 方程组中传导电流项的影响。

时域有限差分法(finite-difference time-domain method, 简称 FDTD)是求解电磁场问题的一种数值技术, 在1966年 Kane S. Yee 发表的著名论文“numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media”中首次被提出。FDTD 法直接将有限差分式代替麦克斯韦时域场旋度方程中的微分式, 得到关于场分量的有限差分式, 用具有相同电参量的空间网格去模拟被研究的目的体, 选取合适的场初始值和计算空间的边界条件, 可以得到包括时间变量的麦克斯韦方程的四维数值解。

Maxwell 方程组概括了宏观电磁场的基本规律, 由2个旋度方程和2个散度方程构成。2个旋度方程是 Faraday 电磁感应定律和 Ampere 环流定律的微分形式。2个散度方程可由2个旋度方程导出, 因此, 研究电磁场问题可由2个旋度方程作为出发点。假定所研究的电磁场问题是各向同性、线性且与时间无关的媒质, 在无源区域, Maxwell 方程的2个旋度方程表示为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t},$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma_c \mathbf{E},$$

式中 \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{H} 为磁场强度, ε 为介电常数,

μ 为磁导率 σ_e 为电导率。

通常情况下以二维 TM 波问题进行讨论 x 与 y 方向的空间步长相等,用 Δs 表示统一的空间步长,大多数电磁场问题中,计算空间为非磁性媒质,时域有限差分方程为^[3-4]

$$E_z^{n+1}(i j) = A(i j) \cdot E_z^n(i j) + D \cdot B(i j) \cdot \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2} j) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2} j) + H_x^{n+\frac{1}{2}}(i j - \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i j + \frac{1}{2}) \right],$$

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i j + \frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i j + \frac{1}{2}) + D \cdot [E_z^n(i j) - E_z^n(i j + 1)],$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2} j) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2} j) + D \cdot [E_z^n(i + 1 j) - E_z^n(i j)],$$

其中,

$$A(i j) = \left[1 - \frac{\sigma(i j)\Delta t}{2\varepsilon(i j)} \right] / \left[1 + \frac{\sigma(i j)\Delta t}{2\varepsilon(i j)} \right],$$

$$D = \frac{\Delta t}{\Delta s} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}},$$

$$B = \varepsilon_0 \left[\varepsilon(i j) + \frac{\sigma(i j)\Delta t}{2} \right].$$

该算法的特点是,任一网格点上的电场分量只与它上一个时间步的值及四周环绕它的磁场分量有关,同理,任一网格点上的磁场分量也只与它上一时间步时的值及四周环绕它的电场分量有关,而且方程中 ε, μ, σ 都是空间坐标的函数,这说明这些参数可随介质而改变,虽然推导时假设介质是各向同性的,但方程同样适合于介质的各向异性^[5-6]。

在该方法的应用中,还要采用可提高正演模拟精度的吸收边界条件以减少边界反射引起的影响,还要考虑到方程的稳定性条件。

2 模拟应用

图 1a 为垂直断层的二维断面模型,断层在 70 道处,图 1b 是时域有限差分法正演模拟剖面。从影像的基本特征看与断层结构的雷达响应特征是相吻合的。为了进一步验证其正确性,将正演模拟的结果进行了偏移处理,处理后的结果如图 1c。由此看出,时域有限差分法的模拟精度是很高的,这一方法的运用也是正确的。

探地雷达经常用来探测地下溶洞。图 2 为某洞状目标的实测雷达记录,该实测剖面下方为一人工挖掘的引水隧道,洞内充水,围岩为灰岩,洞宽约 3 m,洞高约 2 m,数米洞体周边围岩中存在岩溶裂隙。图

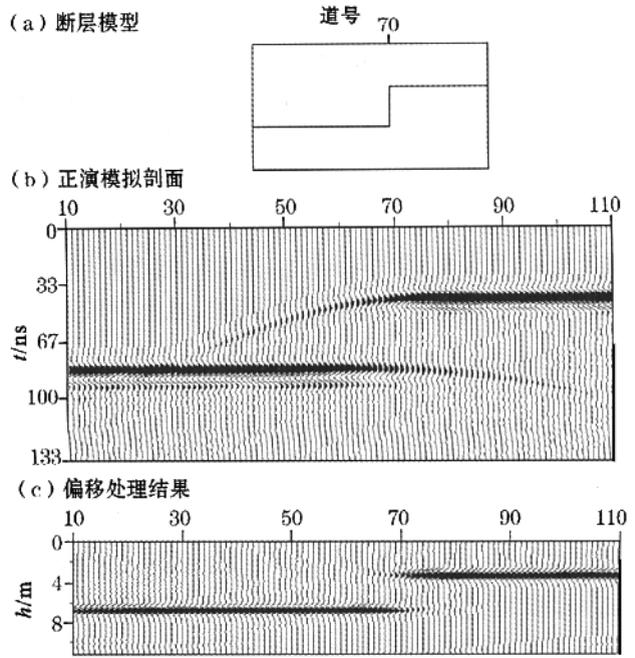


图 1 时域有限差分法断层正演模拟

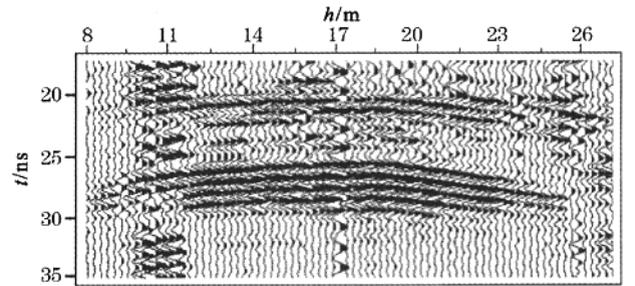


图 2 某洞状目标的实测雷达剖面

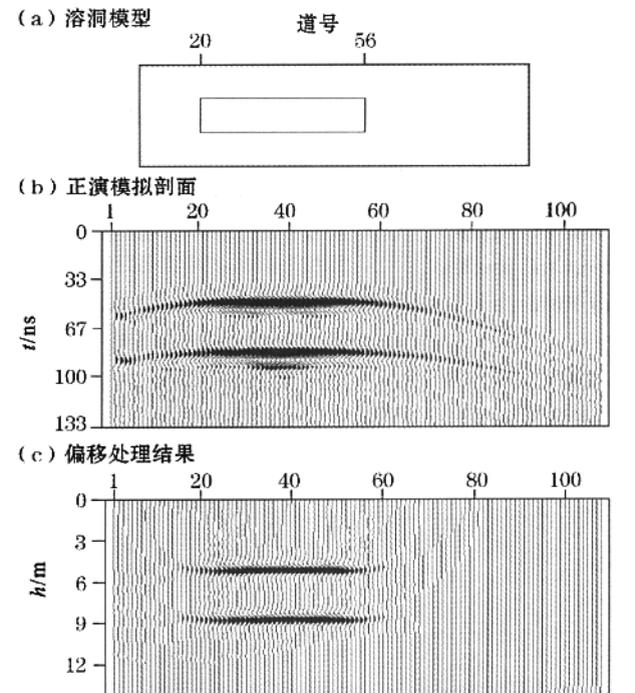


图 3 时域有限差分法溶洞正演模拟

3a 为正演模拟的地电模型,在 20 道与 56 道的正下方存在一溶洞,围岩介质的雷达波速度为 0.1 m/ns,溶洞内部介质的速度为 0.09 m/ns,正演剖面 120 道,道间距 0.2 m。图 3b 为正演结果,溶洞模型正演模拟的雷达图像在整体形态上与实测资料(图 2)相似。图 3c 是溶洞正演模拟的偏移结果。从实测剖面以及偏移结果可看出,利用时域有限差分方法进行雷达波的正演模拟是可行的,且精度较高。

3 结论

通过模拟剖面与实测剖面的比较,说明了时域有限差分法正演模拟的精确性,又通过对模拟结果进行偏移处理验证了正演模拟的正确性。探地雷达时域有限差分法正演模拟是以差分原理为基础,直接从概括电磁场普遍规律的麦克斯韦旋度方程出发,将其转换为差分方程组,在一定体积和一段时间内对连续电磁场的的数据取样,因此,它是对电磁场问题的最原始、最本质、最完备的数值模拟,具有最广泛的适应性。电磁场的时域有限差分法模拟目前在地球物理勘探领域被广泛应用于各种电磁勘探方法

的二、三维模拟,也是目前国际上在探地雷达剖面正演模拟中最广泛采用的数值模拟方法。因此进行探地雷达时域有限差分法的正演模拟具有一定的现实意义。

本文的完成得到了邓世坤教授的悉心指导,在此表示深深的感谢。

参考文献:

[1] Wang T L, Tripp A C. Simulation of electromagnetic wave propagation in three dimensional media by an FDTD method[J]. 1994, 247.

[2] Chen H W, Huang T M. Finite-difference time-domain simulation of GPR data[J]. Journal of Applied Geophysics, 1998, 40: 139.

[3] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994.

[4] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[5] 高本庆, 陈金元. 色散媒质中电磁场的时域有限差分算法[J]. 中国科学, 1994, 24(5): 538.

[6] 高本庆, 刘波. 电磁场时域数值技术新进展[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(4): 401.

THE APPLICATION OF THE FDTD METHOD TO GPR SIMULATION

XUE Gui-xia¹, WANG Peng²

(1. College of Civil Engineering and City Construction, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The sound wave equation simulation method has been traditionally used in forward simulation of GPR. Nevertheless, as the radar wave is a kind of electromagnetic wave and the spread of the wave accords with Maxwell equation, the result of simulation is not precise enough. To solve this problem, the authors adopted the finite difference time domain method to perform simulation on the basis of Maxwell equation. In addition, the migration processing was conducted for the simulation result. It is found out that this method is correct and feasible.

Key words: radar wave; Finite-Difference Time-Domain; forward simulation

作者简介:薛桂霞(1978-),女,河北省行唐县人,2004年毕业于中国地质大学(武汉)地球探测与信息技术专业,获硕士学位,主要从事探地雷达的数字信号处理工作。