道路铺砌层中探地雷达波传播的正演模拟及应用

沈　飚　石庆华　孙忠良

（东南大学毫米波国家重点实验室）

摘　要

沈飚，石庆华，孙忠良．道路铺砌层中探地雷达波传播的正演模拟及应用．石油地球物理勘探，1997，32(增刊 1)：135～140

本文详细介绍了中心频率为 1GHz 探地雷达脉冲波在道路铺砌层中传播的正演模拟技术。该模拟技术以实际发射的脉冲子波为基础，采用了更加符合实际的复介电常数，模拟合成了探地雷达脉冲波在层状铺垫介质中的反射曲线，并结合实际测得的探地雷达数据加以分析和解释。实例表明，该模拟方法为正确解释路面下结构提供了有效手段。

主题词　探地雷达　铺垫层　正演模拟

引　言

探地雷达系统作为高分辨率、高精度、非破坏性的探测技术，已广泛应用于民用工程领域和军事领域。特别是最近几年，人们越来越多地利用探地雷达系统来检测高速公路、桥梁、机场跑道等道路面下结构及铺垫质量。这种非破坏性的检测手段对工程界无疑具有重要意义。然而，由于测量结果是由地下铺垫物组成的各介质层面的反射波及其它杂散波组成的道集，因此单靠人工来解释测量剖面会带来一定的偏差。目前，还没有较成熟且方便实用的反演方法来自动识别、解释测量结果。本文提出了基于水平层面的道路铺砌层中中心频率为 1GHz 探地雷达波传播的正演模拟技术。该模拟技术以实际发射的脉冲子波为基础，采用了更加符合实际的复介电常数，模拟合成了探地雷达脉冲波在层状铺垫介质中的反射曲线，并结合实际测得的探地雷达(GPR)数据加以分析和解释。实例表明，该正演技术为正确判断道路路面下铺砌层结构提供了方便、实用且有效的手段。

基　本　理　论

探地雷达系统是根据电磁脉冲反射原理而设计的。在实际测量中，窄电磁脉冲通过天线发射并进入道路铺垫层中。在许多情况下，天线发射出的电磁脉冲波在到达道路路面时其波前可近似看作平面。在道路路面下的介质是由铺垫材料组成的有耗非均匀介质。然而，对中心频率

本文于 1996 年 2 月 6 日收到。
本项目由江苏省自然科学基金资助。

为1GHz的电磁脉冲波在常规铺砌材料组成的介质中，其波长约为8～12cm，因此在正演模拟和资料解释时，道路路面下各层介质可视为均匀介质。那么，当平面脉冲波垂直入射到路面沿z轴传播时，路面下铺垫材料中电磁场满足的Maxwell方程可写为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = -(\omega^2\mu\varepsilon - j\omega\mu\sigma)E \tag{1}$$

其中：$E=\mathrm{Re}[E_0\exp(j\omega t)]$为正弦时变电场矢量；$E_0$为电场矢量的振幅；$\omega$为角频率；$z$为沿传播方向的距离；$\mu$为磁导率；$\varepsilon=\varepsilon'-j\varepsilon''$，为复介电常数；$\sigma=\sigma'+j\sigma''$，为介质导电率。

由方程(1)，可得其解为

$$E = E_0 e^{-jkz} \tag{2}$$

其中k为传播常数，且

$$k = \sqrt{\omega^2\mu\varepsilon - j\omega\mu\sigma} \tag{3}$$

介质的损耗角可定义为介质总复数导电率的实部与虚部之比，即

$$\tan\delta = \frac{\sigma + \omega\varepsilon''}{\omega\varepsilon'} \tag{4}$$

如果将jk的实部和虚部分开，则介质中衰减因子α与相移因子β分别为

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{2}\left(\sqrt{1+\tan^2\delta} - 1\right)} \tag{5}$$

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon'}{2}\left(\sqrt{1+\tan^2\delta} + 1\right)} \tag{6}$$

由式(5)、(6)，式(2)可改写为

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \tag{7}$$

从上式可以看出，电磁脉冲波在介质中传播时，其幅度是衰减的，脉冲形状由于βz的非线性相位而引起畸变。

探地雷达单脉冲波在多层介质中传播时，在介质界面上会产生反射和透射，反射系数和透射系数分别由

$$R(n) = \frac{k_n - k_{n+1}}{k_n + k_{n+1}} \tag{8}$$

$$T(n) = \frac{2k_n}{k_n + k_{n+1}} \tag{9}$$

决定。式中k_n为n层介质的传播常数。因此，对多层介质中传播的电磁波，反射电磁场和透射电磁场可以表达成

$$E_R(n) = R(n)E_T(n) \tag{10}$$

$$E_T(n+1) = T(n)E_T(n) \tag{11}$$

上式中n是层状介质中第n层介质的序号。由式(8)～(11)可以计算出各反射波和透射波的振幅。在正演计算时，电磁脉冲在介质中反射时间由各介质层的厚度及速度决定。介质中电磁波

传播速度可写成

$$V = c\left\{\frac{\left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}\right)}{2\varepsilon_0}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon'' + \frac{\delta'}{\omega}}{\varepsilon' - \frac{\sigma'}{\omega}}\right)^2} + 1\right]\right\}^{-1/2} \tag{12}$$

由于式(12)中,ω 远大于 σ' 和 σ'',且 ε''远小于 ε',因此,式(12)可简化为

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'/\varepsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r'}} \tag{13}$$

式中,ε_r' 为介质的相对介电常数。我们知道,道路路面下铺垫材料主要由沥青、碎石、沥青混合料以及混凝土等组成,它们的相对介质常数分别为:沥青,2～6;碎石,3～9;沥青混合料,4～6;混凝土,6～9。

由以上的相对介质常数,可确定介质层中的传播速度以及反射时间。在实际正演计算时,根据介质的衰减、色散、反射系数、透射系数以及介质层中的传播速度,计算出脉冲电磁波经入射后,返回路面接收到的反射电磁波时间序列波形。

正　演　方　法

图 1 是根据电磁脉冲反射原理设计的道路铺垫层中探地雷达波传播的正演模拟步骤。我们知道,对同一探地雷达天线的发射信号将随周围介质介电常数的不同而不同。在模拟计算时,为与实际探测情形相吻合,软件中设计了可供选择的天线与路面的耦合系数。改变耦合系数,可以调整进入不同道路路面下入射波能量和频率成分,以仿真发射脉冲在不同路面的入射子波形状。

为了更正确地模拟雷达脉冲波在实际层状介质中的传播特性,在设计发射脉冲波形时,参考了 SIR-2 型探地雷达系统中中心频率为 1.2GHz 天线发射的脉冲波形。图 2 是正演模拟时采用的发射子波,中心频率为 1GHz。图中示出了天线与路面耦合系数分别为 1 和 1.7 时的发射子波波形。从图中可以看出,天线与路面耦合系数不同,进入路面中的脉冲形状不同。经 FFT 变换后,可得发射脉冲子波的频谱。图 3 中示出了天线与路面耦合系数分别为 1 时的发射子波的频谱。由于介质层中的衰减、频散、反

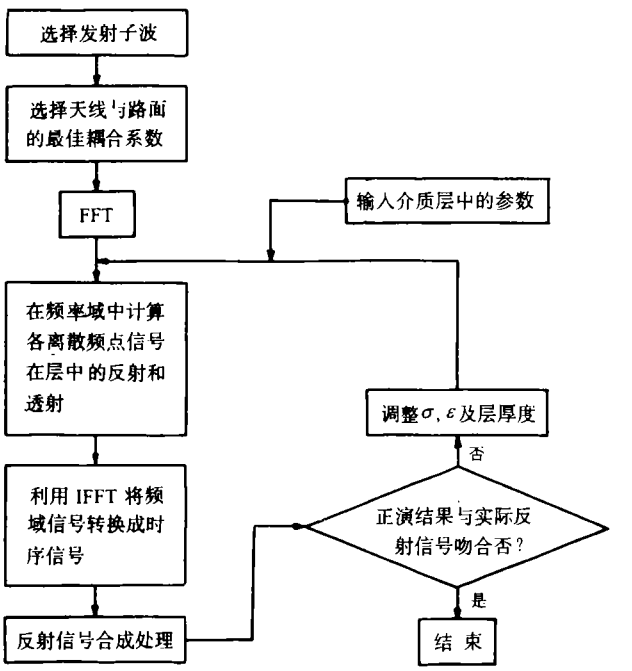


图 1　道路铺垫层中探地雷达波传播的正演模拟框图

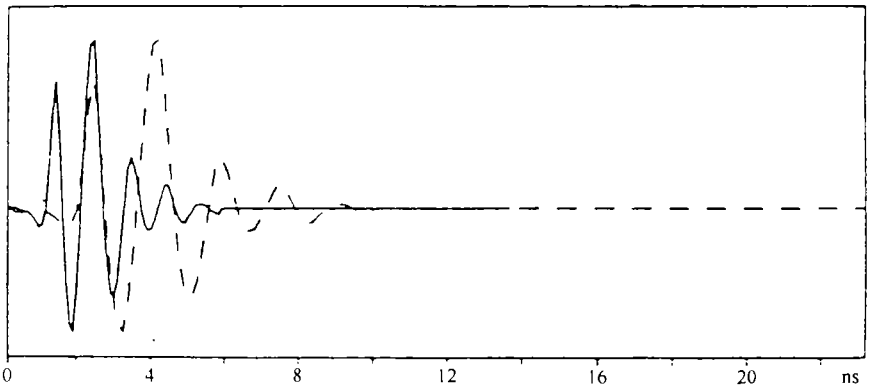


图 2 发射脉冲子波的时域波形

天线与地面的耦合系数:实线为 1.0;虚线为 1.7

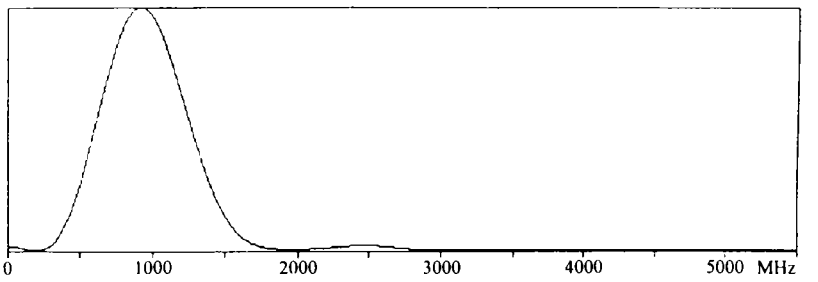


图 3 发射脉冲子波的频谱

射和透射系数均与频率有关,因此在正演计算时,将发射脉冲频谱中各离散频点都看作一连续正弦波的频率,根据式(5)～(11),计算出各离散频点在介质层中的衰减、频散、反射和透射系数,求得各离散频点返回路面的幅值。最后,利用IFFT 变换,将频率域反射信号变换成时域反射信号,并利用式(13),计算出层中的反射时间,在合成的反射时序曲线上确定单次反射波和多次反射波。然后,对比实际测得的雷达数据,修正介质模型参数,使合成的反射时序曲线尽可能地与实际测得的探地雷达曲线相吻合。

应 用 实 例

我们首先给出层状铺垫模型的中心频率为 1GHz 的脉冲雷达波传播的正演模拟。以此为基础,结合实际探地雷达数据,利用该正演模拟技术,分析并解释了实际路面下铺垫结构。为了使模型更接近实际地下结构,设置了复介电常数。另外,本文在正演模拟计算时,为使正演合成的雷达时序曲线更清楚、明了,不考虑第二层介质以下的多次反射。

图 4 示出了两层铺垫材料的道路铺砌层模型。第一层为水泥混凝土,其相对介电常数为 6.5,第二层为碎石层,其相对介电常数为 9.5,第三层为基底,即路基层,其相对介电常数为 20。正演模拟结果如图 5 所示,图中清晰地反映了各介质层界面的反射,同时在正演合成的曲线中,各反射信号对应的旅行时间均与模型理论值相吻合。因此,该正演模拟技术正确地反映

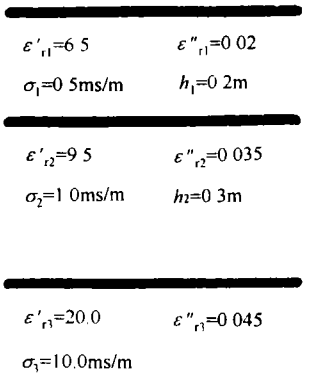


图 4 三层介质的地电模型

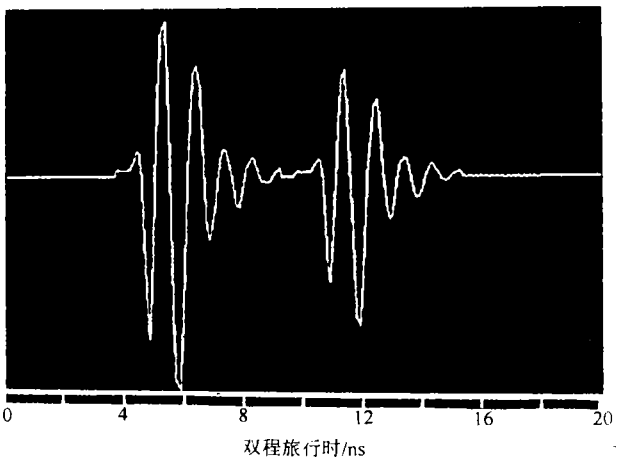


图 5 图 4 中脉冲雷达波传播的模拟结果

了脉冲雷达波在层状铺垫模型中的传播特性。

下面给出实测的探地雷达曲线,并结合本文提出的层状铺垫模型中脉冲雷达波传播的正演模拟技术来分析、解释实际数据,初步解释出道路路面下的铺垫结构及铺垫厚度。

图 6 是在南京东郊某段高速公路上测得的一实际探地雷达曲线。为了分析方便,在原始数据中剔除了脉冲波在空气中传播的直达波。从图中分析并参考该段高速公路的部分设计,我们初步判断路面下由三层介质组成,根据各反射波的旅行时间以及各反射波的振幅,估算出各层的速度和厚度。然后,以这些初步给出的物理参数为基础,利用本文提出的正演模拟软件进行试算。经反复计算并对比实际探地雷达曲线,最后找出最接近实际曲线的正演结果,其结果和所对应的介质参数如图 7 所示。由此,我们可推断出路面下铺垫材料如下:第一层为水泥层;第

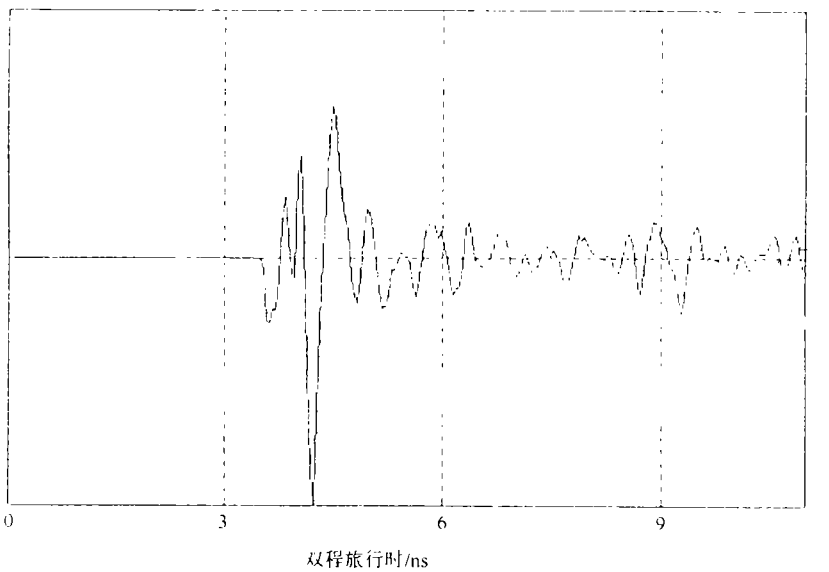


图 6 在某段高速公路上测得的探地雷达曲线

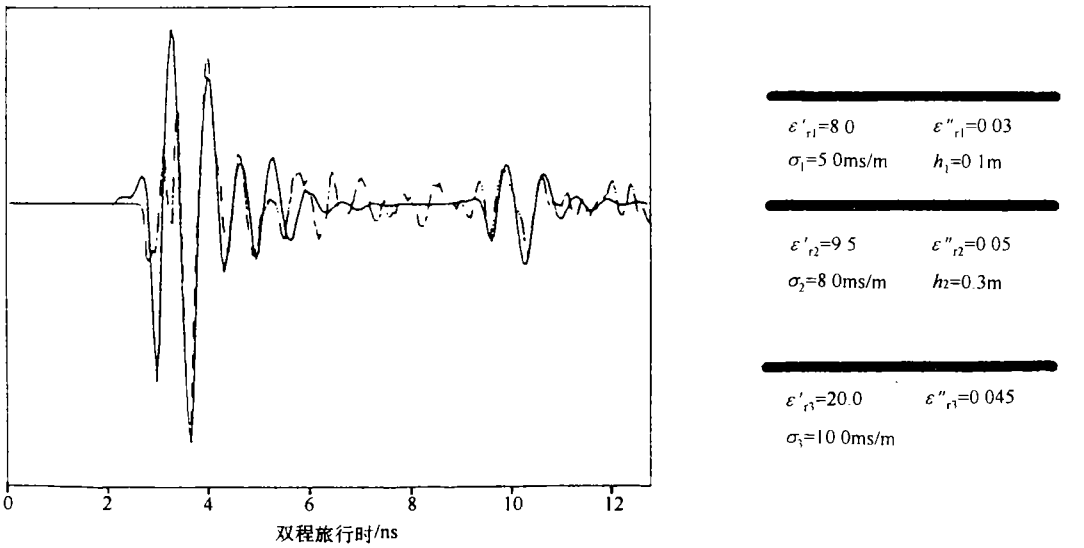


图7 据图6实测曲线，利用正演模拟解析得到的曲线(左)和地下铺垫结构(右)

左图中：实线为正演模拟曲线；虚线为野外扫描记录

二层为干细碎石；第三层为基底土层。经实地验证，解释结果正确。

结 束 语

本文研究了探地雷达脉冲波在层状介质中的传播特性，以实际发射的脉冲子波为基础，利用正演模拟技术，模拟合成了探地雷达脉冲波在层状铺垫介质中的反射曲线，并结合实际雷达曲线，分析、解释了与之对应的路面下的铺垫结构。所给出结果表明，该正演模拟技术采用贴近实际模型的复介电常数以及发射脉冲波形，使模拟结果更符合实际、更具真实性，为正确解释路面下结构提供了简便、可靠且有效的手段。但必须指出的是，在把该正演模拟技术作为解释手段时，若结合使用最小二乘法来拟合实际曲线，则其分析和解释的效率、精确度、可靠性将更高。这方面的研究我们会在以后的工作中做进一步的探索。

参 考 文 献

1 Gunton D J and Scott H F. Introduction to subsurface radar. *IEEE Proceedings, Part F, Communications, Radar and Signal Processing*, 1988, 135, 278～320

2 Liu C and Shen C. Numerical simulation of subsurface radar for detecting buried pipes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(5): 795～798

一项，辽河石油勘探局科技进步一、二、三等奖各一项，发表学术论文4篇。现在辽河石油勘探局勘探开发研究院从事储层特征研究工作。

王晓华 副教授，1963年生，1982年毕业于华东石油学院物探专业。毕业后一直从事应用地球物理专业的教学和科研工作。现在大庆石油学院从事地震资料处理方法研究工作。

李国林 工程师，1963年生，1986年毕业于长春地质学院地质专业。曾从事地震资料解释工作，参加了国家"八五"重点科技攻关课题"东部地区天然气藏识别与预测技术研究"工作，发表论文多篇。现在胜利石油管理局地质勘探处从事储量管理与研究工作。

林 宁 工程师，1949年生，1983年毕业于西南石油学院矿机专业。现在华北石油管理局从事野外采集和装备的管理工作。

沈 飚 副教授，1963年生，1992年毕业于中南工业大学应用地球物理专业，获博士学位。曾出版专著《电磁波伪脉冲成像及其波动理论》，发表论文20余篇，获部级奖3项。现在东南大学毫米波国家重点实验室从事脉冲探地雷达系统和步进调频探地雷达的开发、研制工作。

游 俊 博士生，1971年生，1994年毕业于江汉石油学院物探专业，1996年毕业于中国地质大学(北京)石油专业，获硕士学位。现在中国地质大学(北京)攻读博士学位，并从事"板桥—歧口凹陷深部储层特征及预测"的研究工作。

唐恩德 工程师，1964年生，1986年毕业于西南石油学院物探专业。毕业后一直从事三维地震资料的处理工作。现在新疆石油管理局地质调查处研究所从事物探方法研究工作。

常新伟 工程师，1965年生，1988年毕业于江汉石油学院物探专业，1992年毕业于长春地质学院地震勘探专业，获硕士学位。毕业后一直从事地震资料的处理工作，发表论文多篇。现在大庆石油管理局物探研究所从事高分辨率、高信噪比等方面的研究工作。

杨子建 工程师，1958年生，1980年毕业于南京工学院无线电系，后毕业于成都地质学院物探专业。曾从事大地电磁测深及其资料的处理、解释工作。现在地质矿产部第六物探大队从事大地电磁测深资料的处理、解释工作。

冯世民 工程师，1956年生，1976年毕业于陕西省煤矿学校物探专业。毕业后一直从事地震资料的野外采集、处理和解释工作，发表论文3篇，曾获天津市储委颁发的铜牌奖。现在河北煤田物测队从事地震资料的处理和解释工作。

崔若飞 副教授，1954年生，1977年毕业于中国矿业大学物探专业，1995年获博士学位。曾主持过多项煤炭系统的科研任务，获部级科技进步二等奖一项，发表论文30余篇。现在中国矿业大学从事地震勘探方面的教学、科研工作。