

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.34

白大为,杜炳锐,方慧,等.低频探地雷达探测冻土带天然气水合物正演模拟研究[J].物探与化探,2017,41(6):1248-1254.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.34

Bai D W, Du B R, Fang H, et al. Forward simulation and feasibility study of applying the low frequency ground penetrating radar to detecting gas hydrate in permafrost area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1248-1254. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.34

低频探地雷达探测冻土带天然气水合物正演模拟研究

白大为^{1,2,3}, 杜炳锐^{1,2,3}, 方慧^{1,2,3}, 张鹏辉^{1,2,3}, 仇根根^{1,2,3}, 裴发根^{1,2,3}, 何梅兴^{1,2,3}

(1. 国土资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000; 2. 国家现代地质勘查技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:通过对低频探地雷达在青藏高原冻土带环境下的探测深度、分辨率及反射特征分析的正演模拟来研究其在冻土带天然气水合物勘探中的可行性和关键参数。首先通过雷达测距方程计算确定了理论上探地雷达的最大探测深度与发射频率、地下介质电阻率、介电常数之间的关系,并根据电磁波反射理论计算满足冻土带天然气水合物探测深度所需的系统增益;随后通过低频探地雷达分辨率计算和仿真模拟来确定低频探地雷达在大尺度(200 m)范围的广义分辨率;最后参考已经发现天然气水合物的木里地区基本情况设计冻土及天然气水合物模型,利用时间域有限差分(FDTD)方法进行二维正演,获得了探地雷达信号在冻土带底界以及天然气水合物顶、底界的反射特征,为野外实测数据的处理及解释提供有用信息。研究结果表明,采用中心频率小于等于 15 MHz 且系统增益大于 165 dB 的低频探地雷达在地表电阻率较高的冻土区能够满足天然气水合物储层的探测深度要求;分辨率计算及仿真模拟表明低频探地雷达在满足一定条件下在 200 m 深度可以达到探测深度 1% 的广义分辨率;探地雷达信号在冻土底界、天然气水合物顶、底界均存在明显的强振幅和频率突变特征;理论计算结果认为应用低频探地雷达直接探测冻土带天然气水合物是可行的。

关键词: 低频探地雷达;探测深度;广义分辨率;反射特征;冻土带天然气水合物

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)06-1248-07

0 引言

天然气水合物是气体与水在一定温度和压力及储藏条件下形成的结晶状物质,主要产于海底沉积物和陆上永久冻土带,是一种新型的具有巨大潜力的潜在能源^[1-4]。2008 年中国地质调查局在青海省天峻县木里盆地聚乎更矿区钻获并检测出天然气水合物样品,是我国首次在陆域永久冻土区发现天然气水合物,使中国成为第一个在中纬度高山冻土区发现天然气水合物的国家^[5]。钻探和测井结果表明木里地区天然气水合物均赋存于冻土覆盖层下的

泥岩、粉砂岩裂隙中,或砂岩孔隙中,具有埋深浅、低饱和度、水平及纵向分布不连续等特点^[6-10]。由于木里地区天然气水合物储层多属于高电阻率薄层,常规地球物理勘探手段直接探测受到很大限制。而探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是利用超高频脉冲电磁波探测地下介质分布的一种地球物理勘探方法,它结合了电磁波技术和地震技术的长处,具有目标探测分辨率高、图像直观、真实、可靠、易辨认等优点^[11-12]。如能将探地雷达技术应用于天然气水合物探测,将极大提高天然气水合物储层的分辨能力。

探地雷达应用的物性前提是介质的介电常数及

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题(2012AA061403); 国家 127 专项项目(GZHL20110324, GZH201400305); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160224); 中央公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(AS2015P02, AS2014J09)

作者简介: 白大为(1985-),男,硕士,工程师,主要研究方向为电磁法方法研究、信号分析、数据处理等。Email: baidawei@igge.cn

电阻率。冻土是在土壤、水分、温度共同作用下形成的一种冻结状态的多相组分,其所表现出的电性特征(电阻率、介电常数)与未冻结状态下有很大的不同。由于水和冰的电阻率及介电常数存在巨大的差异,当温度下降到 0 ℃ 时,土壤的介电常数急剧减小,而电阻率则有显著的升高,且随温度降低而急剧增大^[13],针对青海木里地区,潘语录等通过测井数据统计表明该地区的冻土电阻率比非冻土高约三倍^[14],因此探地雷达信号在通过冻土层时的衰减较小,在一定技术手段下勘探深度可能达到天然气水合物储层深度。综上所述,应用探地雷达技术在木里地区直接探测水合物储层具备良好的物性前提和地质条件。

目前,在青藏高原永久冻土区进行的探地雷达研究主要集中在冻土层顶界面埋深的探测上,取得了良好的效果和显著的成果^[15]。杜二计等采用雷达探测资料寻找浅层地下冰深度来确定多年冻土上限的深度^[16];罗京等利用探地雷达和地温资料分析了青藏高原北麓河地区典型热融湖塘周边多年冻土特征^[17];胡俊等通过数值分析研究发现探地雷达能有效地勘察厚层地下冰的各种特征^[18]。然而这些研究采用的探地雷达发射中心频率较高(50 MHz 以上),时间窗口较小(多小于 1 000 ns),探测深度不能满足天然气水合物探测的要求。

为达到理想探测深度,需要采用非常规的低频大深度探地雷达。由于低频探地雷达天线受尺寸的影响不能加屏蔽,极大地限制了其应用范围和领域。目前的低频探地雷达研究多集中于大陆及南北极冰川探测方面^[19-20]。由于冰介质均匀,介电常数低,电磁波衰减慢,电磁波中心频率低(低至几 MHz),用于冰川探测的低频探地雷达最大探测深度可达 3 000 m 以上^[21]。

目前尚未有应用低频探地雷达直接探测冻土底界及天然气水合物储层的研究,可借鉴和参考的相关理论技术十分有限。本文从探地雷达基础理论出发,通过理论建模和数值仿真,研究探地雷达信号在冻土带和天然水合物中的传播特性,获得适应青藏高原冻土区天然气水合物勘探的低频探地雷达关键参数,为开展低频探地雷达探测天然气水合物的试验研究提供理论方法支撑。

1 探地雷达探测深度

为了解探地雷达在冻土带天然气水合物勘探中的有效性,首先应该明确的问题是在青藏高原冻土

环境下探地雷达究竟能探测多深,需探测的地下目标体(冻土底界、天然气水合物储层等)是否在雷达系统的有效测距范围之内,因此在进行探地雷达野外探测工作之前首先进行正演方面的一些工作,确定了理论上探地雷达的最大探测深度与发射频率、地下介质电阻率、介电常数之间的关系,从而为探地雷达在冻土带天然气水合物勘探中的应用提供了理论支持。探地雷达的探测深度是雷达系统设计时所关心的一个重要参数,从电磁波在介质中的传播特性知道,探地雷达的探测深度主要依赖于发射机辐射功率、电磁波传播路径所经过的电介质特性、天线特性、目标体的尺寸、目标体与周围介质的电性差异以及系统的探测灵敏度等因素。

探地雷达最大探测深度可以由雷达测距方程来确定。探地雷达的探测距离由两部分控制^[11],一是探地雷达系统本身设计所决定的系统增益(动态范围),二是地下介质的电阻率及介电常数。探地雷达系统的增益(动态范围)定义为最小可探测到的信号电压(功率)与最大发射电压(功率)的比值:

$$Q_s = 10\lg(W_T/W_{min}) \quad (1)$$

式中: Q_s 表示探地雷达系统的增益, W_T 表示最大发射功率, W_{min} 为最小可探测功率。不同探地雷达仪器 Q_s 值均有不同,常见范围在 100 ~ 200 dB 之间。

探地雷达信号的损失可由雷达测距方程描述:

$$Q = 10\lg\left(\frac{P_i P_r G_i G_r g \sigma v^2 e^{-4\alpha r}}{64\pi^3 f^2 r^4}\right) \quad (2)$$

式中: P_i 、 P_r 分别表示发射天线及接收天线的效率, G_i 、 G_r 分别表示入射方向及接收方向增益, g 为目标体散射增益, σ 为目标体散射面积, α 为衰减系数, v 为雷达信号速度, f 为探地雷达中心频率, r 为天线到目标体的距离。

满足方程

$$Q_s + Q > 0 \quad (3)$$

的距离 r 即为探地雷达的最大探测距离,在此范围内的目标体反射信号可以为探地雷达系统接收。当探地雷达系统确定后, P_i 、 P_r 、 G_i 、 G_r 以及发射信号的中心频率 f 这 5 个参数是已知的, σ 以及 g 取决于目标体的形态、表面的粗糙程度及目标介质与周围介质的电性差异(反射系数 R),一般将两项合起来表示(表 1),其中 α 表示点状目标体的半径。

在不考虑磁化率的情况下,探地雷达信号在地

表 1 不同形态目标体公式

目标形态	光滑界面	粗糙界面	点状
项公式	$\pi r^2 R$	$R \frac{\pi r}{2f}$	$\frac{64\pi^5 \alpha^6 f^4}{v^4}$

下介质中的速度 v 及衰减系数 α 可以由式(4)、式(5)确定:

$$\alpha = 2\pi f \left\{ \frac{\epsilon_r}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 \epsilon_r^2 \rho^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

$$\alpha = c \left\{ \frac{\epsilon_r}{2\epsilon_0} \left[\left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 \epsilon_r^2 \rho^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

式中: ϵ_r 表示介质中的相对介电常数, ρ 表示地下介质的电阻率, ϵ_0 表示真空中的介电常数, c 表示真空中的光速。可以看出地下介质中的速度 v 及衰减系数 α 由地下介质的介电常数、电阻率、雷达信号的中心频率决定。

通过以上内容就可以得到式(1)中的全部参数, 迭代距离使其近似满足式(3)就可以得到探地雷达理论最大探测深度与发射中心频率、地下介质电阻率之间的关系(图1)。从图中可以看出在常规探地雷达系统参数下, 地下介质为均匀介质且其介电常数固定及地下反射界面固定的情况下, 探地雷达的有效探测深度随着发射中心频率的减小而增加, 并随着地下介质电阻率的增加而增加。当发射信号的中心频率为 15 MHz, 电阻率为 2000 $\Omega \cdot m$ 时, 探测深度超过了 200 m, 当电阻率达到 10000 $\Omega \cdot m$ 时, 探测深度可达 400 m 以上。而我国冻土带天然气水合物主要分布在青藏高原地区, 在秋冬季或春季地表未开化的情况下, 地表电阻率较大, 探地雷达信号衰减较小, 采用发射中心频率小于等于 15 MHz 的低频探地雷达信号可以穿透冻土层, 理论上满足冻土分布及天然气水合物的探测深度要求。

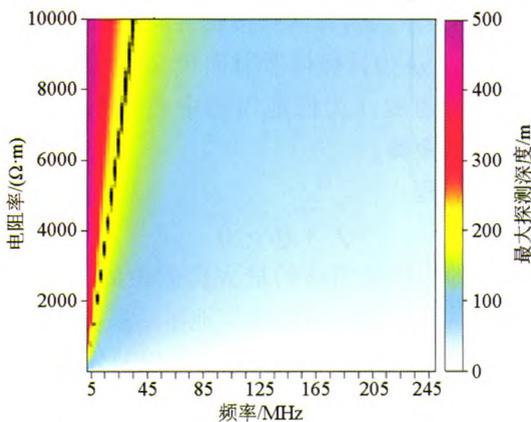


图1 探地雷达发射中心频率与介质电阻率、探测深度的关系

对于青海木里典型冻土区地下分层结构, 我们假设第1层介电常数为 4, 电导率为 0.01 mS/m, 厚度分别为 80、120、150 m; 第2层介电常数为 6, 电导率为 0.1 mS/m, 厚度分别为 20、30、50 m; 根据天然气水合物含量的不同, 第3层介电常数分别为 4.50、5.25、5.55、5.70, 如图2所示。

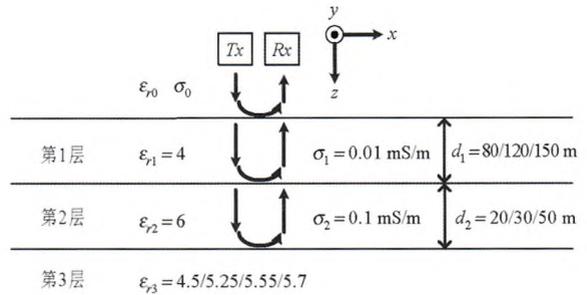


图2 青海木里典型冻土区地下3层结构模型

此时, 可求得各分界面反射系数为:

$$\gamma_0 = 1/3, \quad \gamma_1 = 0.101,$$

$$\gamma_2 = 0.0718/0.0334/0.0195/0.0128. \quad (6)$$

第2(3)层分界面接收到的回波信号功率可表示为:

$$P_2 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_k}{(4\pi)^3 R^4} \gamma_2 \left[\prod_{i=0}^1 (1 - \gamma_i^2) \right] e^{-2\eta_0 \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i d_i}{\sqrt{\epsilon_{r,i}}}}. \quad (7)$$

根据该地区地质条件, 应采用地下分层介质表面为粗糙表面的模型, 因此第2(3)层分界面处的回波功率衰减为:

$$P_2/P_t = \frac{G^2 \lambda^3 \gamma_2^3}{128(\pi)^2 R^3} \left[\prod_{i=0}^1 (1 - \gamma_i^2) \right] e^{-2\eta_0 \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i d_i}{\sqrt{\epsilon_{r,i}}}}. \quad (8)$$

电阻加载偶极子天线增益为 -10 dB, 因此收发天线增益共 -20 dB。考虑天线增益后, 分别计算探测 100、150、200 m 深度时, 回波功率相对于发射功率的衰减情况(表2)。为满足木里地区天然气水合物探测深度的需求, 探地雷达系统的增益至少要大于 165 dB, 这对应用低频探地雷达进行冻土带天然气水合物探测选取探地雷达系统提供重要参考。

表2 不同探测深度回波功率衰减情况

ϵ_3	4.50	5.25	5.55	5.70
$d_1 = 80 m, d_2 = 20 m$	-128 dB	-138 dB	-145 dB	-150 dB
$d_1 = 120 m, d_2 = 30 m$	-135 dB	-145 dB	-152 dB	-157 dB
$d_1 = 150 m, d_2 = 50 m$	-142 dB	-152 dB	-160 dB	-165 dB

2 有效探测分辨率

探地雷达的距离向分辨率是衡量探地雷达探测能力的重要参数, 一般表征的是探地雷达能够区分一个以上反射界面的能力, 人们通常定义雷达的距离向分辨率 Δd 为:

$$\Delta d = c / (2B \sqrt{\epsilon_r}). \quad (9)$$

式中: c 表示的是电磁波在真空中的传播速度, ϵ_r 为介质的相对介电常数, B 为雷达有效带宽。由于探地雷达的有效带宽同中心频率大致相等, 所以:

$$\Delta d = \frac{c}{2B\sqrt{\epsilon_r}} \approx \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

式中:λ表示的是探地雷达中心频率 f_c 在介质 ϵ_r 中对应的波长。

因为雷达子波在地下介质中的传播与地震子波相似,所以人们有时会参考地震勘探中的探测分辨率来定义探地雷达的探测分辨率。

地震勘探中,了解地震子波的形态对研究地震勘探的勘探分辨率很重要。在研究探地雷达探测分辨率前,我们也需要了解探地雷达天线辐射出来的雷达子波形态。目前常见的探地雷达系统通常采用调制的高斯脉冲源,但是该源每经过一次天线,其波形就相当于进行了一次微分运算,所以雷达子波的波形形式通常为:

$$f(t) = t^2 e^{-\alpha t} \sin \omega_c t \quad (11)$$

式中:α为衰减系数,ω_c为雷达子波的中心频率。对应的频谱为:

$$F(\omega) = \frac{2\omega_c [3(\alpha - i\omega)^2 - \omega_c^2]}{(\alpha - i\omega)^2 + \omega_c^2} \quad (12)$$

当介质层的厚度小于λ/2时,层的顶界面和底界面反射的雷达子波会相互叠加,形成一个复合波。随着介质层厚度的不断减小,复合波中反映独立反射界面的信息逐渐变少。当介质层的厚度逐渐减小到λ/4时,复合波的相对振幅会出现极大值,人们把这种现象称之为薄层的调谐效应,调谐效应对应的薄层厚度为调谐厚度。人们常把调谐厚度,即λ/4定义为垂直分辨率。

理论上我们把λ/4作为分辨率极限,层厚度大于λ/4则可分辨率,否则就不能分辨。但在实际应用中,由于各方面的原因,我们所得到的分辨率要小于此值。在天然气水合物探测中,天然气水合物储层较薄,以中心频率为15 MHz的探地雷达为例,其波长为20 m,垂直分辨率为5 m,即根据传统算法难以确定5 m以内天然气水合物储层的厚度值。我们在引入低频探地雷达的目的就是识别天然气水合物储层的反射信息,天然气水合物储层的厚度不需要用探地雷达来确定,在此情况下,分辨率可远远超过λ/4的限制。当然,这里所说的分辨率已经和前面所述分辨率有本质的区别,但在具体使用中有实用价值,可指导实际探测工作,不妨将此称为广义分辨率。

为了验证探地雷达在地下200 m深处的广义分辨率,建立如图3所示的模型,3层地下介质层厚分别为200、2、100 m,相对介电常数分别为4、6、5。第1层电导率为0.01 mS/m,第2层电导率为0.1 mS/

m。雷达天线中心频率为12.5 MHz。图4为上述模型得到的仿真回波信号,图5为图4中红色虚线框中信号的局部放大图。可以看到虽然第2层上下分界面处的反射发生了混叠,无法直接分辨第2层厚度,但仍然可以识别第2层的存在,证明天线中心频率为12.5 MHz的低频探地雷达在200 m深度处满足1%的广义分辨率。

3 反射特征分析

研究单一介质中异常块体的正演可以清晰直观地了解探地雷达信号在不同情况下的反射特征。鉴于冻土层、冻土层下砂岩及天然气水合物之间存在的物性差异,需要明确冻土与其下岩层界面以及天然气水合物与围岩之间的反射特征,通过二维正演可以研究剖面上的反射形态及单道信号的反射特征,从而为实际数据处理提供参考。我们假设冻土层介电常数为4,电导率为0.01 mS/m;砂岩层介电常数为6,电导率为0.1 mS/m;天然气水合物层介电常数为4.5,电导率为0.01 mS/m,二维正演方法采用已经成熟的时域有限差分(FDTD)方法。

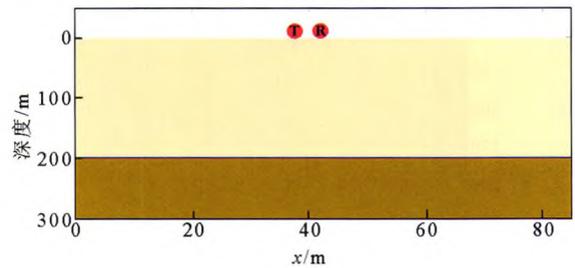


图3 仿真模型

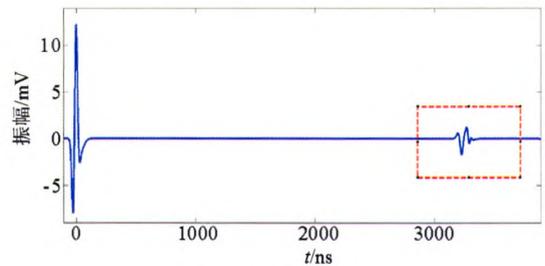


图4 仿真回波信号

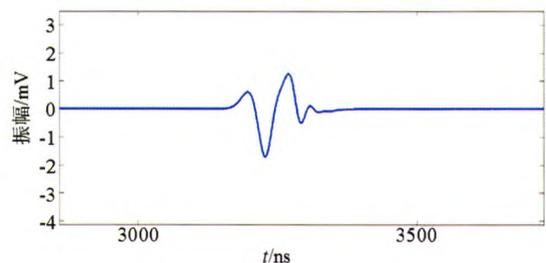


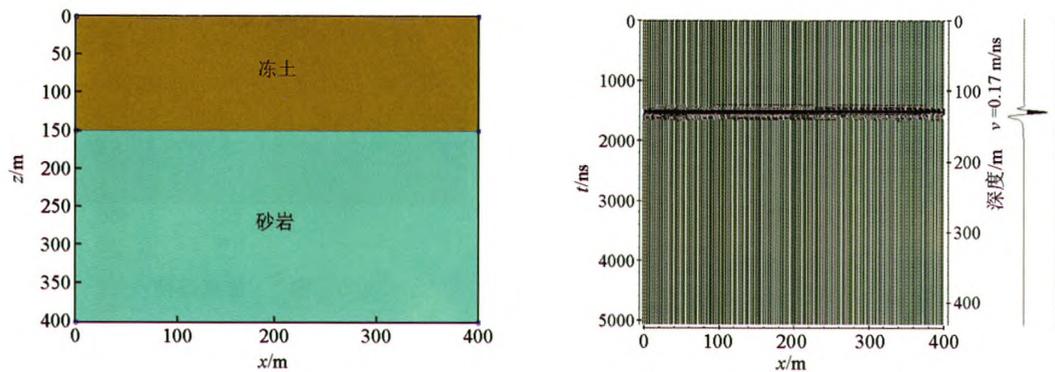
图5 回波信号局部放大

模型 1 为砂岩层上覆盖厚度为 150 m 的冻土层 (图 6 左)。二维正演结果显示在探地雷达探测剖面上,砂岩层与冻土层之间存在强反射信号 (图 6 右),从右侧的单道波形可以看出探地雷达信号由冻土层进入砂岩层的反射特征:探地雷达信号首先由零值附近进入一个小的负波峰,随后进入最大正波峰及最大负波峰,此段信号代表了探地雷达信号由高电阻率低介电常数介质进入低电阻率高介电常数介质时的反射过程,其对应的瞬时频率也存在由低频到高频再转向低频的突变特征。

模型 2 为砂岩层中含天然气水合物,天然气水合物储层为椭圆形,分布在深 15~30 m,水平方向 30~50 m 范围 (图 7 左)。此模型为验证探地雷达信号由低电阻率高介电常数介质进入高电阻率低介电常数介质时的反射特征。二维正演结果显示在探地雷达探测剖面上 (图 7 右),天然气水合物储层同样主要呈现两个明显的弧形反射,第 1 个弧形反射能量较强,第 2 个弧形反射能量相对减弱,期间还有天然气水合物顶底界面之间的多次反射。天然气水合物储层中心的单道探地雷达信号清晰地反应了探地雷达信号由砂岩体进入天然气水合物储层的反射

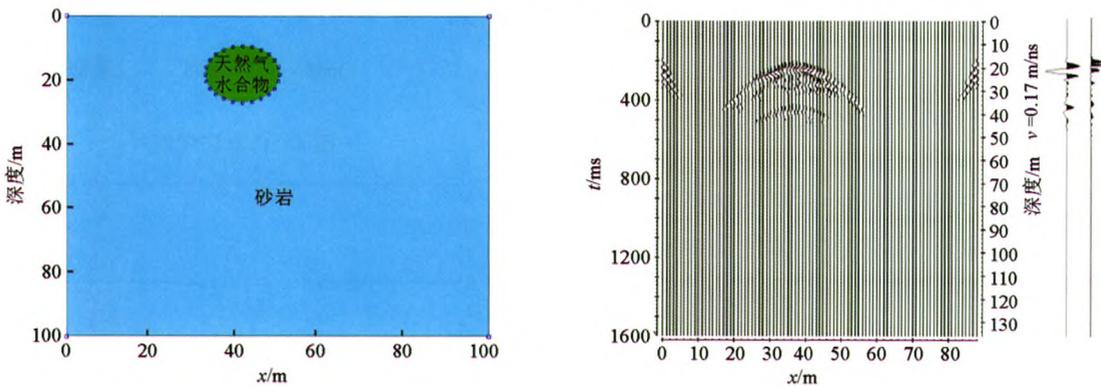
特征:探地雷达信号首先由零值附近进入一个小的正波峰,随后进入最大负波峰,此段信号与模型 1 正演时探地雷达信号由冻土进入砂岩时的信号呈反相,代表了探地雷达信号由低阻高介电常数介质进入高阻低介电常数介质时的反射过程。当探地雷达信号进入天然气水合物后信号能量衰减相对较小,到天然气水合物底部反射时,反射信号仍有很强的反射信号,该段反射信号特征与模型 1 正演时探地雷达信号由冻土进入砂岩时的信号呈同相,同样代表探地雷达信号由高阻低介电常数介质进入低阻高介电常数介质时的反射特征。其对应的瞬时频率在天然气水合物储层顶部位置则呈现高频—低频—高频的特征,受多次波及信号衰减等影响,频率变化在底部规律不明显。

模型 3 (图 8 左)为砂岩层上面覆盖有 140 m 厚度的冻土,天然气水合物块体在砂岩内深度 180~210 m,水平方向 170~220 m 范围内。由二维正演结果可以看出冻土与砂岩的界面有强烈的反射信号,天然气水合物与砂岩之间由于埋藏深度以及探地雷达信号在砂岩中衰减较快的影响,反射信号相对较弱,但还是可以分辨。由于边界效应的影响,砂



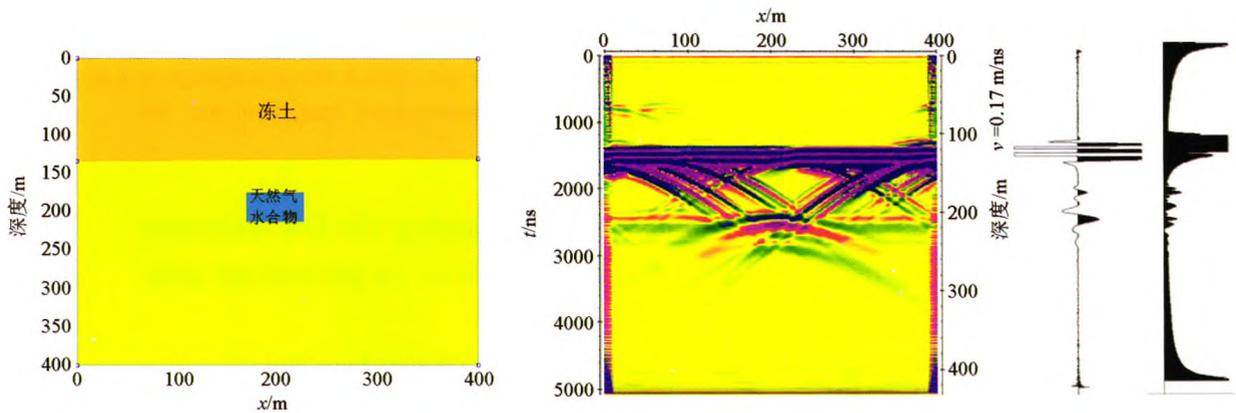
右侧第 1 条单道曲线为单道 GPR 信号放大后的反射波形,第 2 条为其对应的瞬时频率

图 6 冻土砂岩两层模型 (模型 1) (左) 及二维正演结果 (右)



右侧第 1 条单道曲线为单道 GPR 信号放大后的反射波形,第 2 条为其对应的瞬时频率

图 7 砂岩内有天然气水合物模型 (模型 2) (左) 及二维正演结果 (右)



右侧第 1 条单道曲线为单道 GPR 信号放大后的反射波形,第 2 条为其对应的瞬时频率

图 8 上有冻土层覆盖砂岩内有天然气水合物模型(模型 3)(左)及二维正演结果(右)

岩与冻土层间存在两条相交的斜线,属于干扰信号,并不影响天然气水合物信号的识别。在单道信号上,探地雷达信号由冻土进入砂岩呈现正波峰,由砂岩进入天然气水合物则呈现负波峰的特征。其频率变化规律也与前两个模型相同。

通过不同模型的正演研究,明确了冻土、砂岩以及天然气水合物之间反射信号的特征,这就为实际数据处理中反射信号的识别提供了参考依据,也验证了理论上探地雷达方法识别冻土下岩层内存在天然气水合物的可能。

4 结论

正演模拟试验表明中心频率在 15 MHz 以下且系统增益大于 165 dB 的低频探地雷达满足木里地区物性条件下勘探深度的要求,最大探测深度可以达到 200 m 以上。以 15 MHz 探地雷达为例,依据传统理论计算的垂直分辨率为 5 m,对天然气水合物薄层反射特征和滤波特性进行分析发现,可以通过反滤波的方法提高探地雷达信号分辨率。仿真模拟计算表明:12.5 MHz 低频探地雷达信号对 200 m 深、厚度为 2 m 的薄层仍有明显的反射信号,可以认为在满足一定条件下,能达到探测深度 1% 的广义分辨率。通过二维 FDTD 数值模拟发现:探地雷达信号在冻土底板处振幅由强变弱,频率由低变高再到低;而在天然气水合物顶板处均存在振幅由弱变强,频率由高变低再到高的特征,这些探地雷达信号响应特征可以用来标定和解释实测数据。

参考文献:

- [1] SLOAN JR E D. Clathrate hydrates of natural gases [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1998.
- [2] Michael D M. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments [M]. Kluwer Academic Publishers, 2000: 295 - 310.
- [3] Collett T S, Lee M W, Agena W F, et al. Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(2): 279-294.
- [4] Craven J A, Roberts B J, Bellefleur G, et al. Recent magnetotelluric measurements at the Mallik gas hydrate production research well site, Northwest Territories [J]. Proteomics, 2012, 12(12): 2045 - 2059.
- [5] 祝有海,张永勤,文怀军,等.青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J].地质学报,2009,83(11):1762-1771.
- [6] 郭星旺,祝有海.祁连山冻土区 DK-1 钻孔天然气水合物测井响应特征和评价[J].地质学报,2011,30(12):1869-1873.
- [7] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征[J].矿床地质,2010,29(1):182-191.
- [8] 祝有海,张永勤,文怀军,等.祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J].地球学报,2010,31(1):7-16,130.
- [9] 王平康,祝有海,卢振权,等.祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征[J].地质通报,2011,30(12):1839-1850.
- [10] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海祁连山冻土区天然气水合物的气源条件及其指示意义[J].矿床地质,2013,32(5):1035-1044.
- [11] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [12] 刘澜波,钱荣毅.探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具[J].地球物理学报,2015,58(8):2606-2617.
- [13] 李丽英,张立新,赵少杰.冻土介电常数的实验研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2007,43(3):241-244.
- [14] 潘语录,田贵发,栾安辉,等.测井方法在青海木里煤田冻土研究中的应用[J].中国煤炭地质,2008,20(12):7-9.
- [15] 王通,俞祁浩,游艳辉,等.物探技术在多年冻土探测方面的应用[J].物探与化探,2011,35(5):639-642.
- [16] 杜二计,赵林,李韧.探地雷达在祁连山多年冻土调查中的应用[J].冰川冻土,2009,31(2):364-371.
- [17] 罗京,牛富俊,林战举,等.青藏高原北麓河地区典型热融湖塘周边多年冻土特征研究[J].冰川冻土,2012,34(5):1110-1117.
- [18] 胡俊,俞祁浩,游艳辉,等.探地雷达在多年冻土区正演模型研究及应用[J].物探与化探,2012,36(3):457-461.

- [19] 何茂兵, 孙波, 杨亚新, 等. 天山乌鲁木齐河源一号冰川探地雷达测厚及其数据分析 [J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(3): 235 - 239.
- [20] 王璞玉, 李忠勤, 吴利华, 等. 探地雷达在冰川厚度及冰下地形探测中的应用 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(1): 393 - 400.
- [21] 崔祥斌, 孙波, 田钢, 等. 冰雷达探测研究南极冰盖的进展与展望 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 392 - 402.

Forward simulation and feasibility study of applying the low frequency ground penetrating radar to detecting gas hydrate in permafrost area

BAI Da-Wei^{1,2,3}, DU Bing-Rui^{1,2,3}, FANG Hui^{1,2,3}, ZHANG Peng-Hui^{1,2,3},
QIU Gen-Gen^{1,2,3}, PEI Fa-Gen^{1,2,3}, HE Mei-Xing^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Geophysical electromagnetic Exploration of Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, China; 2. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, China; 3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: In order to study the feasibility and key parameters of applying low frequency ground penetrating radar (GPR) to detecting gas hydrate in permafrost area, the authors used forward modeling of detection depth, resolution and reflection feature analysis of the low frequency ground penetrating radar in Tibetan Plateau permafrost environment modeling. Firstly, the relationship between the maximum detection depth of theoretical ground penetrating radar and the transmitting frequency, the resistivity of the underground medium and the dielectric constant of the GPR is determined by the radar range equation and, according to the theory of electromagnetic wave reflection, the system gain required for detecting the depth of gas hydrate in permafrost zone was calculated; Secondly, the resolution of low frequency GPR at large scale (200 meters) is determined by resolution calculation and simulation; Finally, two dimensional forward modeling experiments are carried out by time domain finite difference (FDTD) method, and the reflection characteristics of GPR signals at the bottom of the permafrost and the top and bottom boundaries of gas hydrate are obtained, which provide useful information for the processing and interpretation of field data. The results show that the low frequency GPR with a center frequency of less than or equal to 15 MHz and a system gain of more than 165 dB can meet the requirements of the detection of gas hydrate reservoirs in the permafrost areas with high surface resistivity. The resolution calculation and simulation results show that the low frequency ground penetrating radar can reach the generalized resolution of 1% at the depth of 200 meters under certain conditions, and that the GPR signals have obvious strong amplitude and frequency mutation characteristics on the bottom of permafrost and the top and bottom of gas hydrate. The theoretical calculation results show that low frequency ground penetrating radar is suitable for detecting natural gas hydrate in permafrost zone.

Key words: low frequency ground penetrating radar; detection depth; generalized resolution; reflection characteristics; gas hydrate in permafrost area

(本文编辑:叶佩)