

超宽带探地雷达目标回波信号特征提取与材质识别

郁丽¹, 郭勇¹, 陈维锋², 彭晋川²

(1. 成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610059;

2. 四川省地震局, 四川 成都 610059)

摘要: 基于探地雷达信号传输机理, 建立了超宽带探地雷达宽带回波模型, 揭示了多谱分量对目标回波信号特征提取与材质识别的影响。超宽带探地雷达由于回波信号信息丰富的特点, 特征向量的选取成为目标识别的关键。利用子波变换在宽相关处理中的应用, 对回波信号进行滤波和典型数据提取。提取纵向和横向典型数据用于目标形状识别; 提取回波道数据进行 Welch 功率谱分析, 用于目标材质识别。

关键词: 超宽带探地雷达; 功率谱; 信息处理; 宽相关处理; 匹配滤波

中图分类号: TN959.1+7 TN911.7

文献标识码: A

Target echo signal feature extraction and material recognition of ultra-wideband ground-penetrating radar

YU Li¹, GUO Yong¹, CHEN Wei Feng², PENG Jin Chuan²

(1. Institute of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Earthquake Administration of Sichuan Province; Chengdu 610059, China)

Abstract: Based on the mechanism of radar signal transmission, the model of ultra-wideband ground-penetrating radar (UWB GPR) broadband echo was established, which revealed the effect of multi-frequency component on target echo signal feature extraction and material recognition. Because of abundant information in the signal echo of UWB GPR, signature extraction become the key of automatic target recognition. In this paper, the wideband correlation processing which is realized by wavelet transform was employed to filter and extract the typical data. The shape of target was recognized by extraction the longitudinal and transverse typical data, and the composition of target is classified by the power spectrum of the echo.

Key words: UW-GPR; power spectrum; signal processing; wideband correlation processing; matching filtering

超宽带雷达 UWBR (Ultra Wide-band Radar) 明确的概念形成于 1990 年 3 月在美国新墨西哥州 Los Alamos 国家实验室召开的雷达会议。UWBR 通常是指分数带宽大于或等于 25% 的雷达。超宽带探地雷达由于频谱中高频含量丰富, 可获得较高的时空分辨率, 最初主要是用于改善雷达系统的距离分辨率。然而, 随着研究工作的逐步深入, 人们很快发现, 除了极高的距离分辨力使得该雷达可分辨目标体上的微小结构外, 其获取目标和环境信息的能力在频域的大幅度扩展的同时, 激励目标瑞利区、谐振区及光学区散射特性, 进而使提取目标和环境更为丰富的电磁波谱信息成为可能^[1]。基于超宽带雷达信号目标的特性提取与识别近年来已成为国内外

透视成像探测技术发展中的一个新热点^[2]。

探地雷达主要由发射机、接收机、发射天线、接收天线, 信号处理及终端设备组成。探地雷达信号处理任务主要有: 滤波技术、信号检测、目标特征提取与识别等几个方面。探地雷达系统通过发射超宽带信号, 接收其反射回波, 并利用回波特性, 实现地下目标特征提取与识别。

1 超宽谱雷达系统原理

图 1 为超宽谱雷达的系统原理框图。脉冲振荡器产生脉冲信号, 该信号触发电磁脉冲发生器产生窄脉冲并通过发射天线辐射出去。反射信号经过接收天线送到接收机采样头, 由脉冲振荡器产生的信号经过扫描延时

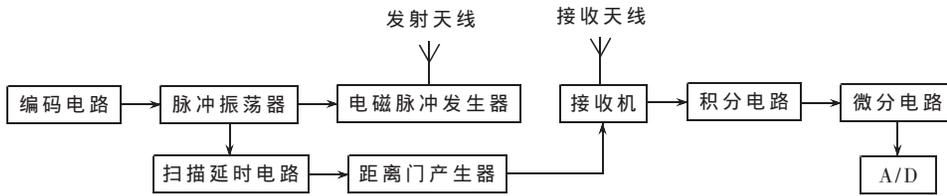


图1 超宽谱雷达的系统原理框图

电路产生距离门,对接收信号进行选择;接收到的信号通过积分电路,对成千上万个脉冲积累后检出微弱信号,放大电路对该信号进行放大,微分电路对放大后的信号进行微分,把由于目标运动引起的积累信号的变化检测出来;该信号经高速采集后送入计算机,由计算机对采集到的信号进行分析和处理。

超宽带信号产生:由线性反馈移位寄存器产生二进制序列,用伪随机码(PN码)对其作时间偏移调制(TH调制),使发射脉冲根据PN码做不同的延时后再发送出去,伪随机编码序列脉冲成为类似微波噪声的超宽带信号。

超宽带信号接收:相关接收机通过接收天线连接低噪声宽带放大器(LNA)、采样电路、放大器、滤波器等微波器件,此方案如图2所示^[3]。

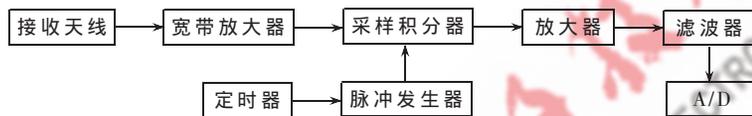


图2 接收机原理框图

2 信号处理用于目标特征的提取与材质识别

信号处理的目的是压制直达波,提高信噪比,以便于信号检测和参数估计。在超宽带信号照射下,从目标散射中心返回的回波信号有别于窄带雷达,接收机输入端的信号不再仅是发射信号的延迟和多普勒频移。雷达目标信息的提取与回波信号密切相关。通过信号检测和参数估计,估计对应目标点的时延和反射系统,进而通过一次反射波的时延确定地下目标的深度;通过一次反射波的反射系数确定目标的材质特性。

目标识别包括三个主要部分:数据处理、特征提取和识别。其中数据处理主要包括直达波剔除和信号滤波,用于提取典型纵向、横向切面数据和典型道数据,信号滤波采用宽相关处理方法实现。特征提取主要是针对典型道数据进行功率谱估计提取用于材质识别的数据,由于探地雷达回波信号的非平稳性,部分扫描的Welch平均重叠周期谱可以较好地用于目标特征的提取。

2.1 直达波剔除

探地雷达回波信号由收发天线间直接耦合波、地面反射波、地下介质不连续产生的后向散射波、随机干扰等构成。直接耦合波和地面反射波组成的直达波直接影响回波目标信号。由于直达波相对目标信号有一个较大的时间差,通过数据时间轴截断抑制直达波。将探地雷

达的三维回波数据进行横向和纵向方向的平均,获取垂直方向的平均回波数据。从中选择第二和第三个回波的连接点作为截断点进行数据截断,抑制直达波。剔除前面的回波数据部分,将余下的回波数据作为含信号的数据进行

后续处理。

2.2 超宽带探地雷达回波模型建模

由于相比于传统雷达体制,UWBR能够提供更为丰富的、可供目标识别资用的电磁波谱特征,其在目标识别方面的潜力受到众多学者的关注。经过几十年的深入研究,已经提出了大量新颖有效的特征抽取与识别方法。归纳起来,这些方法可分为基于模型的目标识别和无模型约束目标识别两类方法,而其中基于模型的目标识别方法又可分为基于极点特征的目标识别和基于散射中心的目标识别方法。

在基于UWBR的地下目标识别中,地下介质环境中目标散射特性与自由空间有所不同,目标散射回波通常受到穿透层的调制,这就使得对目标散射回波的描述和电磁特征的抽取更为困难,这种复杂的环境下有效抽取目标电磁特征并识别需要建立新的目标和环境散射模型。

针对超宽带探地雷达,基于信息融合的思想,建立了一种目标识别方法。首先基于宽相关处理进行信号滤波和典型数据提取。提取纵向和横向典型数据信息用于目标形状识别;提取典型回波道数据并进行Welch功率谱分析用于目标材质识别^[2]。

超宽带探地雷达回波信号主要由收发天线间直接耦合波、地面反射波、地下介质不连续产生的后向散射波、随机干扰等构成。脉冲信号具有非平稳性和非线性衰减等特点。目前常用的探地雷达回波模型是褶积模型,褶积模型主要反映了电磁波在地下传播中不同介质层的多次反射,而超宽带点目标回波模型则具体描述了回波的时延和频谱展宽。结合上述两种模型的特点,针对每一道测试数据,可建立超宽带探地雷达回波模型如下:

$$S(t) = S_0(t) + \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{\phi} K_{i,j} x(S_{i,j}(t - \tau_{i,j})) + \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{\theta} K_{i,j} x(S_{i,j}(t - \tau_{i,j})) + n(t) \quad (1)$$

经过直达波剔除后的回波信号可描述为:

$$S(t) = \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{\phi} K_{i,j} x(S_{i,j}(t - \tau_{i,j})) + \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{\theta} K_{i,j} x(S_{i,j}(t - \tau_{i,j})) + n(t) \quad (2)$$

针对超宽带窄脉冲探地雷达,在均匀介质条件下,目

标反射回波信号的能量远大于介质的反射能量。同时一次反射波的能量远大于多次反射波的能量,因此忽略介质和多次反射波的影响,则用于目标检测和参数估计的有效回波信号可近似描述为^[4]:

$$r_2(t) = \sum_i K_{i,T} x(S_{i,T}(t - \tau_{i,T})) + n(t) \quad (3)$$

由式(1)所刻画信号模型被称为宽带信号的时延参数估计模型。当式(1)中的 $S_{i,j}$ 等于 1 时,即退化为传统窄带信号的时延估计模型,对其估计所采用的基本方法是计算 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 的互相关:

$$G_{r_1 r_2}(\tau) = \int r_1 r_2(t + \tau) dt \quad (4)$$

通过求解式(4)取得最大值的 Σ 来确定估计值。详细算法可参考文献^[4]。

然而在许多实际背景下,如反射地震勘探、超宽带电磁波测距法等应用领域中,式(1)中的 $S_{i,j}$ 不等于 1,此时回波信号不单单是源信号的时间延迟,即 $r_1(t)$ 和 $r_1(t)$ 没有相关匹配关系,因而不能采用式(2)作估计量。在认识到传统相关模型的不足之后,A Ltes, Weiss, N aparst, Young^[5-6]等应用子波变换的方法,提出了宽带相关处理的概念。同时高静怀等人独立地把这种思想运用于地震信号处理领域,取得了良好的效果^[7]。受雷达信号估计理论的启发,该文运用宽带相关处理的概念,提出了适合于由式(1)所刻画信号模型,即宽带信号模型的时延参数估计方法^[8]。

2.3 宽带相关处理

设雷达发射超宽带信号 $f(t)$,当目标以速度 v 匀速运动时,回波信号的宽带模型为:

$$g(t) = \sqrt{s} f[s(t - \tau)] \quad (5)$$

式中, $s = \frac{c-v}{c+v}$ 为尺度变化因子(频移); $\tau = \frac{2R}{c}$ 为时移, R 为雷达与目标之间的距离; c 为光速。

采用宽带匹配相关处理时,其输出为:

$$WC_{fg}(s, \tau) = \sqrt{s} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) f^*[s(t - \tau)] dt \quad (6)$$

若发射信号 $f(t)$ 是允许子波,则其相关输出与子波交换之间有对应关系:

$$WC_{fg}(s, \tau) = CWTF_f\left(\frac{1}{s}, \tau\right) \quad (7)$$

因此宽带相关接收器的输出 $WC_{fg}(s, \tau)$ 等价于对回波 $g(t)$ 作 $f(t)$ 为母子波的连续子波变换。若选择母子波作发射信号,其相关处理与子波变换得到统一。

在实际雷达系统中,常采用线性调频(LFM)脉压信号作发射信号。由于矩形包络的 LFM 信号不满足允许条件,高斯包络的 LFM 信号满足允许条件,因此设雷达发射高斯包络的超宽带 LFM 信号为:

$$x(t) = \exp(-\alpha t^2) \exp[j2\pi(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2)] \quad (8)$$

式中, $\alpha = -3.8$, 载波基频 $f_0 = 800$ MHz, 信号带宽 $B = 250$ MHz,

分数带宽为 0.31, 如图 3 所示。对其作基于 Morlet 子波的相关处理,得到如图 4 所示结果,幅度为 A_w 。

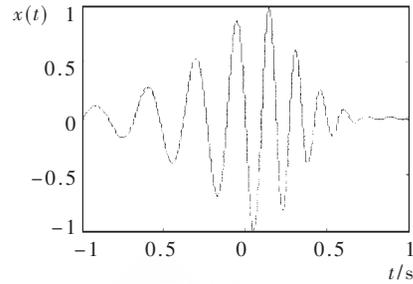


图 3 发射信号

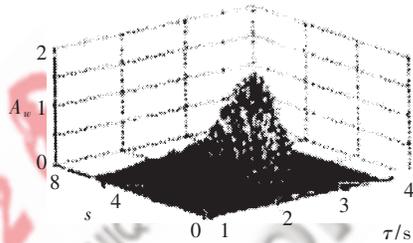


图 4 相关处理结果

在多散射中心情况下,每个点目标相对雷达的位置和速度不同,其回波参数 s 和 τ 也不同,所以整个回波信号为:

$$g(t) = \iint S(s, \tau) \frac{1}{\sqrt{|s|}} f\left(\frac{t - \tau}{s}\right) ds d\tau \quad (9)$$

式中,加权系数 $S(s, \tau)$ 表示各单点回波信号幅度。所以多散射点时的宽带相关输出为:

$$WC_{fg}(s', \tau') = \int g(t) \frac{1}{\sqrt{|s'|}} f\left(\frac{t - \tau'}{s'}\right) dt = S(s', \tau') * W_{ff}(s', \tau') \quad (10)$$

式中, $WC_{fg}(s', \tau')$ 是 $S(s', \tau')$ 与 $W_{ff}(s', \tau')$ 的卷积,信号幅值 $S(s, \tau)$ 与信号 $f(t)$ 的子波变换 $W_{ff}(s', \tau')$ 的卷积称为宽带卷积。可见宽带相关处理相当于基于子波的时间尺度域的匹配滤波^[9]。

宽相关处理作为宽带信号处理的主要数学方法,可以有效地检测和估计宽带回波信号的相关参数。通过引入伸缩因子后,补偿了 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 之间的尺度伸缩匹配关系。相关处理就是用具有不同尺度和时延的复本信号与接收信号作相关。宽带相关处理器的输出为^[11]:

$$WC(s, \tau) = \sqrt{s} \int r_1^*(s(t - \tau)) r_2(t) dt \quad (11)$$

基于上述分析,宽相关处理参数估计方法有:

(1) 峰点估计法:使 $WC(s, \tau)$ 达最大值的 (s, τ) 作为 (s_0, τ_0) 。

(2) 零点估计法:使 $\frac{\partial}{\partial \tau} WC(s, \tau)$ 和 $\frac{\partial}{\partial s} WC(s, \tau)$ 为零的 (s, τ) 作为 (s_0, τ_0) 。

两种处理方法的程序框图分别见图 5(a) 和图 5(b)。

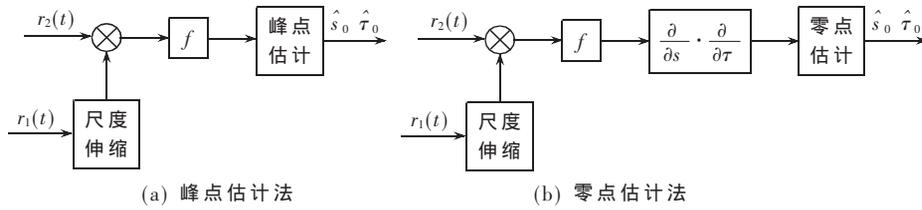


图 5 s_0 和 τ_0 的峰点估计法和零点估计法

实际过程中,介质多为非均匀情况。因此对于存在干扰点的介质通过多道数据平均实现参数的稳健估计。干扰噪声的一个特点是出现的时间和几率相对不连续,因此通过多道数据纵向或横向平均,以纵向或横向分辨率的降低为代价换取正确的匹配和参数估计。

经过宽相关处理后,可以得到 3 个典型切面,1 个是水平切面,显示目标反射面的形状信息,1 个纵向切面和 1 个横向切面,纵向切面的典型数据与横向切面的典型数据相结合用于目标形状的识别^[10]。

2.4 深度估计

通过多种方法对雷达信号进行处理,其目的就是为了解地下目标。目标所在层面的深度是辨识目标的一项重要参数。通过求解电磁波在介质中的传播速度,求解目标所在的深度。

设起点为零,每一格(对应 512 每个点)的实际深度为 $l = \Delta t \times v$, $\Delta t = (\text{timebase}) / (\text{pointnum}) \times (\text{第几个 of pointnum})$, v 为电磁波在介质中的传播速度。

速度估计可采用传统的方法进行,已知地下介质的相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r ,就可以计算出探地雷达电磁波在地下介质中的传播速度,即:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (12)$$

上式中,近似认为地下介质的相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ 。相对介电常数 ϵ_r 可以查表获得。

2.5 基于 Welch 法的目标材质识别方法

超宽带探地雷达中,由于回波信号具有信息丰富的特点,所以特征向量的选取成为目标识别的关键。首先利用实用宽相关处理进行典型信号的提取。基于 Welch 法的功率谱特征提取进行目标材质的识别。部分扫描 Welch 功率谱被证明可以用于目标材质的有效识别。

Welch 法的基本思想是:利用窗函数 $w(n)$ 对时域离散信号 $x_N(n)$ 截断,得到数据段 $x_N^i(n)$,对其进行谱估计后移动窗函数,重复上述过程直到 $x_N(n)$ 通过了所有的窗口,最后对各段信号的功率谱 $\hat{P}_{PEN}^i(\omega)$ 平均,得 $\hat{P}_{PEN}(\omega)$ 。详细算法可参考文献[11]。

Welch 功率谱估计的计算过程如下:设信号 $s(n)$ 的长度为 512,将其分成 $K=7$ 段,每段长度为 $N=128$,重叠 50%。对每个子集加上一个 hanning 窗 $w(n)(n=128)$ 。则 Welch 功率谱估计可按式计算:

$$P_w = \frac{1}{UK} \sum_{i=1}^k S_i(w) S_i^*(W) \quad (13)$$

$$S_i^*(W) = S_i(n) w(n) e^{-i \frac{2\pi}{m} wn} \quad (14)$$

$$U = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} w^2(n) \quad (15)$$

针对超宽带探地雷达,提出了一种目标识别方法。首先利用子波变换在宽相关处理中的应用,对回波信号进行滤波和典型数据提取。提取纵向和横向典型数据用于目标形状识别;提取典型回波道数据进行 Welch 功率谱分析用于目标材质识别。为超宽带探地雷达目标识别提出了一种全新的思路。

参考文献

- [1] 王党卫,王少刚,关鑫璞,等.超宽带雷达及目标识别技术研究进展.空军雷达学院学报,2007,21(3).
- [2] 李建勋,郑军庭.超宽带探地雷达自动目标识别研究.电波科学学报,2005,20(4).
- [3] 陈明,李阿楠.基于超宽带的隔墙探测二维成像雷达系统.探测与控制学报,2007(4).
- [4] 李建勋,肖艳军,张立栓.基于宽相关处理的超宽带探地雷达信号处理研究,2004,20(11).
- [5] WEISS L G. Wavelets and wideband correlation processing [J]. IEEE Signal processinMagazine,1994,11(1):13-32.
- [6] ALTES R A. Detection, estimation and classification with spectrogram[J]. JA SA,1980,67(4):1232-1246.
- [7] 高静怀,郭月飞,金国平.基于熵谱特征定量计算薄层厚度的方法研究.煤田地质与堪探,2005,22(2).
- [8] 詹毅,马长征,梁昌洪.宽带相关信号的参数估计问题[J].西安电子科技大学学报,1999,26(4):467-470.
- [9] 黎海涛,徐庆,徐继麟.子波变换在超宽带雷达中的应用.电子科技大学学报,2000,29(3).
- [10] 李建,鄧强,李建勋.超宽带探地雷达信号处理软件包.河南科学,2006,24(4).
- [11] 樊新海,安钢,邱绵浩.基于 Welch 法的一种目标识别方法.测试技术学报,2001,15(1).

(收稿日期:2008-11-04)