

文章编号:1671-8879(2014)04-0104-05

# 探地雷达信号的最小平方反褶积处理效果

石 刚<sup>1</sup>, 谢永利<sup>2</sup>, 杨晓华<sup>2</sup>, 李晓婷<sup>1</sup>

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了压制雷达超宽频带记录中的多种干扰和噪声,提高信噪比,提出最小平方反褶积应用于探地雷达信号的后处理,并基于误差能量最小原理,在反射系数和干扰都为白噪声的基础上给出了最小平方反褶积的具体实现步骤;为了验证该方法的合理性,设计在室内塑料筐中用晾干的沙土埋设铜板为标定物的模型试验。研究表明:雷达图像内的异常得到了归位,边界和界线变的非常清晰,效果明显得到改善,对于降低噪声干扰和提高分辨率有一定的优势,可作为雷达信号处理方法一种很好的补充。

**关键词:**岩土工程;探地雷达;最小平方反褶积;雷达记录;模型试验;数据处理

**中图分类号:**U411 **文献标志码:**A

## Effect of GPR signal processing based on least square deconvolution

SHI Gang<sup>1</sup>, XIE Yong-li<sup>2</sup>, YANG Xiao-hua<sup>2</sup>, LI Xiao-ting<sup>1</sup>

(1. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to suppress the multiple wave interference and noise which are recorded by the ground penetrating radar receiving antenna with ultra-wide band, and improve signal to noise ratio. The least square deconvolution was applied in the post processing of ground penetrating radar signal, and based on the theory of minimum energy of the error and on the basis of reflection coefficient and interference are white noise, the concrete implementation steps of the least square deconvolution were provided. To testify this method, a model test, in which cooper plate was used as calibration which was embedded in dry sandy soil, was conducted in indoor plastic basket. The results show that the corresponding anomalies in the radar image are in position, the boundaries and dividing lines become very clear, and the effect is obviously improved. This method has a certain advantage to reduce the interference of the noise and improve resolution. Therefore this method can be used as a good compliment to radar signal processing. 1 tab, 6 figs, 7 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; ground penetrating radar (GPR); least square deconvolution; radar record; model test; data processing

## 0 引 言

探地雷达技术从 20 世纪 70~80 年代引入中国

以来,得到了快速的发展,已经在工程各个领域得到了广泛应用,由于其具有快速、高效、无损、分辨率高、抗干扰、受勘察场地条件限制小等优点,成为浅层勘

收稿日期:2013-07-26

基金项目:陕西省工业攻关计划项目(2013K06-27);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2009JC076,CHD2011JC020);

广西科学研究技术开发计划项目(10124006-10)

作者简介:石 刚(1972-),男,陕西富平人,副教授,工学博士,E-mail:shigang\_xa@126.com。

探的有力工具<sup>[1-2]</sup>。随着软、硬件设备的发展,探地雷达技术在中国经过几十年的发展,科技工作者已积累了一定的经验。目前关于探地雷达的应用报道较多,如刘传孝等把探地雷达技术应用于采矿工程<sup>[3]</sup>;陆礼训等把该技术应用于隧道施工过程中的超前预报等<sup>[4]</sup>。但深入的理论研究比较少,表现在关于雷达资料的解译方法还不成熟,现代化信息技术的应用水平较低<sup>[5-7]</sup>。为此,本文提出最小平方反褶积应用于探地雷达信号的后处理,从雷达记录中精确地求得反射序列,消除了子波的影响,可以进一步提高雷达数据的解释质量。通过试验证明,进一步对探地雷达信号进行后处理,从不同的角度探讨雷达信号的质量,增强目标信号特征,提高信噪比,对提高雷达资料的后续解译质量具有重要的意义。

## 1 基本原理

$\Delta$  为采样间隔,滤波器的输入为雷达记录  $y(j\Delta)$ ,设计的反滤波因子为  $h(j\Delta)$ ,  $\xi(j\Delta)$  为反射系数,  $d(j\Delta)$  为雷达子波  $b(j\Delta)$  经过  $h(j\Delta)$  滤波后的希望输出,则实际输出  $c(j\Delta)$  见式(1),希望输出  $z(j\Delta)$  见式(2)。

$$c(j\Delta) = h(j\Delta)y(j\Delta) = \sum_{s=-m_0}^{-m_0+m} h(s\Delta)y((j-s)\Delta) \quad (1)$$

$$z(j\Delta) = d(j\Delta)\xi(j\Delta) = \sum_{k=0}^m d(k\Delta)\xi((j-k)\Delta) \quad (2)$$

式中:  $m_0$  对应起始位置;  $m$  对应于末位置。

实际输出与希望输出之间的误差能量  $Q$  为

$$Q = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} [c(j\Delta) - z(j\Delta)]^2 = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \left[ \sum_{s=-m_0}^{-m_0+m} h(s\Delta) \cdot y((j-s)\Delta) - \sum_{k=0}^m d(k\Delta)\xi((j-k)\Delta) \right]^2 \quad (3)$$

最小平方反褶积的基本原理是误差的能量最小,根据函数取极值的条件

$$\frac{\partial Q}{\partial h(\eta\Delta)} = 0 \quad \eta = -m_0, -m_0+1, \dots, -m_0+m \quad (4)$$

把式(3)代入式(4),可以得到

$$\sum_{s=-m_0}^{-m_0+m} r_{yy}((s-\eta)\Delta)h(s\Delta) = r_{zy}(\eta\Delta) \quad (5)$$

式中:  $r_{yy}((s-\eta)\Delta)$  为雷达记录  $y(j\Delta)$  的自相关函数在  $(s-\eta)\Delta$  处的值;  $r_{zy}(\eta\Delta)$  为雷达记录  $y(j\Delta)$  与希望输出  $z(j\Delta)$  的互相关函数在  $\eta\Delta$  处的值。

假设反射系数序列  $\xi(j\Delta)$  为白噪声,它满足

$$\begin{cases} E(\xi(t)) = 0 \\ E(\xi(t)\xi(t+\tau)) = \delta(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau=0 \\ 0 & \tau \neq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

干扰波  $n(j\Delta)$  与反射系数序列不相关,它们满足

$$E(n(j\Delta)\xi(j\Delta)) = 0 \quad (7)$$

这时,雷达记录的自相关函数  $r_{yy}(l\Delta)$  为

$$r_{yy}(l\Delta) = E(y(j\Delta)y((j+l)\Delta)) = E\left[\sum_{\lambda=0}^{\infty} b(\lambda\Delta)\xi((j-\lambda)\Delta) + n(j\Delta)\sum_{k=0}^{\infty} b(k\Delta)\xi((j+l-k)\Delta) + n((j+l)\Delta)\right] = r_{bb}(l\Delta) + r_{nn}(l\Delta) \quad (8)$$

式中:  $r_{bb}(l\Delta)$  为雷达子波  $b(t)$  的自相关函数;  $r_{nn}(l\Delta)$  为干扰波  $n(t)$  的自相关函数。

假设干扰  $n(l\Delta)$  是白噪声,则有

$$E(n(j\Delta)n(s\Delta)) = \begin{cases} e & j=s \\ 0 & j \neq s \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $e$  为随机干扰水平的 1 个常数。

则式(9)还可以表示为

$$r_{nn}(l\Delta) = \begin{cases} e & l=0 \\ 0 & l \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入到式(8)可以得到干扰为白噪声情况下雷达记录自相关函数的表达式为

$$r_{yy}(l\Delta) = \begin{cases} r_{bb}(0) & l=0 \\ r_{bb}(l\Delta) & l \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$r_{zy}(l\Delta) = E(z(j\Delta)y(j-l)\Delta) = E\left[\left(\sum_{\lambda=0}^m d(\lambda\Delta)\xi(j-l-\lambda)\Delta\right)\left(\sum_{k=0}^m b(k\Delta)\xi((j-k-l)\Delta) + n(j-l)\Delta\right)\right] = \sum_{\lambda=0}^m d(\lambda\Delta)b((\lambda-l)\Delta) = r_{db}(l\Delta) \quad (12)$$

式中:  $r_{db}(l\Delta)$  为子波与其滤波后的希望输出  $d(j\Delta)$  之间的互相关函数。

令式(8)中的  $l = s - \eta$ , 式(12)的  $l = \eta$ , 代入式(5), 得到反射系数为白噪声时, 含干扰的雷达记录的最小平方反滤波方程为

$$\sum_{s=-m_0}^{-m_0+m} [r_{bb}((s-\eta)\Delta) + r_{nn}((s-\eta)\Delta)]h(s\Delta) = r_{db}(\eta\Delta) \quad (13)$$

把式(13)写成矩阵形式, 并且  $r_{yy}((s-\eta)\Delta)$  代替  $r_{bb}((s-\eta)\Delta) + r_{nn}((s-\eta)\Delta)$ , 得到

$$\begin{bmatrix} r_{yy}(0)r_{yy}(\Delta) & \cdots & r_{yy}(m\Delta) \\ \vdots & & \vdots \\ r_{yy}(m\Delta)r_{yy}((m-1)\Delta) & \cdots & r_{yy}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(-m_0\Delta) \\ \vdots \\ h((-m_0+m)\Delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{db}(-m_0\Delta) \\ \vdots \\ r_{db}((-m_0+m)\Delta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

若反射系数序列为白噪声, 且干扰也为白噪声, 将式(10)代入式(14), 得到这种情况下的最小平方

反滤波方程为

$$\begin{bmatrix} r_{bb}(0) + e r_{bb}(\Delta) & \cdots & r_{bb}(m\Delta) \\ \vdots & & \vdots \\ r_{bb}(m\Delta) r_{bb}((m-1)\Delta) \cdots r_{bb}(0) + e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(-m_0\Delta) \\ \vdots \\ h((-m_0+m)\Delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{db}(-m_0\Delta) \\ \vdots \\ r_{db}((-m_0+m)\Delta) \end{bmatrix} \quad (15)$$

如果子波  $b(j\Delta)$  经过反滤波后的希望输出  $d(j\Delta)$  选为冲激函数  $\delta(j\Delta)$ , 则

$$r_{db}(l\Delta) = \sum_{\lambda=0}^m \delta(\lambda\Delta) b((\lambda-l)\Delta) = b(-l\Delta) \quad (16)$$

雷达子波是物理可实现信号, 将式(16)代入到式(15)可得到子波的希望输出为  $\delta(j\Delta)$ 、反射系数为白噪声的最小平方反滤波方程。

## 2 反滤波的实现

实际求解式(15)的解往往不理想, 表现为解  $h(j\Delta)$  摆动剧烈, 不具有  $j \rightarrow \pm\infty$  时  $h(j\Delta) \rightarrow 0$  的特点; 另外, 解  $h(j\Delta)$  与子波  $b(j\Delta)$  的褶积结果与希望输出  $\delta(j\Delta)$  相差很远, 从数学角度分析, 产生这些缺点的原因是: 求反滤波因子的问题是一个不适定问题, 方程式是病态的, 但可以用正则算子的问题来解决这个问题。

当  $h(j\Delta)$  为无限长时, 式(15)可以写成  $h(j\Delta) \cdot r_{bb}(j\Delta) = b(-j\Delta)$ , 与之对应的频率域方程为

$$H(\omega) R_{bb}(\omega) = \overline{B(\omega)} \quad (17)$$

式中:  $H(\omega)$  为反滤波因子  $h(j\Delta)$  的频谱;  $R_{bb}(\omega)$  为雷达子波自相关函数  $r_{bb}(j\Delta)$  的频谱;  $B(\omega)$  为雷达子波  $b(j\Delta)$  的频谱;  $\overline{B(\omega)}$  为雷达子波  $b(-j\Delta)$  的频谱。

则式(17)可得

$$H(\omega) = \frac{\overline{B(\omega)}}{R_{bb}(\omega)} = \frac{\overline{B(\omega)}}{|B(\omega)|^2} \quad (18)$$

从式(18)可知, 当子波的频谱有 0 点或者某些频率成分接近于 0 时, 对相应的频率  $H(\omega)$  不存在或取值非常大, 解的这种特点反映在时间域上就是当  $j \rightarrow \pm\infty$  时  $h(j\Delta)$  衰减很慢, 而且变化剧烈。基于上述分析, 解决问题的方法应该是使式(18)的分母不为 0, 那么, 只要在分母上加 1 个很小的常数  $\lambda$  即可, 使得

$$\hat{R}_{bb}(\omega) = R_{bb}(\omega) + \lambda r_{bb}(0) = |B(\omega)|^2 + \lambda r_{bb}(0) \quad (19)$$

式中:  $\hat{R}_{bb}(\omega)$  为改造了的子波自相关函数频谱;  $r_{bb}(0)$  为雷达子波自相关函数在 0 点的值。

用  $\hat{R}_{bb}(\omega)$  代替式(19)中的  $R_{bb}(\omega)$  可以得到

$$H(\omega) = \frac{\overline{B(\omega)}}{|B(\omega)|^2 + \lambda r_{bb}(0)} \quad (20)$$

式(20)的分母不会等于 0, 也不会趋近于 0, 对于式(19)求反付氏变换, 得到

$$\hat{r}_{bb}(j\Delta) = r_{bb}(j\Delta) + \lambda r_{bb}(0) \delta(j\Delta) \quad (21)$$

式中:  $r_{bb}(j\Delta)$  为子波自相关函数;  $\hat{r}_{bb}(j\Delta)$  为被改造的子波自相关函数;  $\lambda$  为数值很小的正数, 称白噪声因子。

在频率域中用  $\hat{R}_{bb}(\omega)$  代替  $R_{bb}(\omega)$ , 以便于求  $H(\omega)$  与在时间域中用  $\hat{r}_{bb}(j\Delta)$  代替  $r_{bb}(j\Delta)$ , 则最小平方反滤波方程变为

$$\begin{bmatrix} (1+\lambda)r_{bb}(0)r_{bb}(\Delta) & \cdots & r_{bb}(m\Delta) \\ \vdots & & \vdots \\ r_{bb}(m\Delta)r_{bb}((m-1)\Delta) \cdots (1+\lambda)r_{bb}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(-m_0\Delta) \\ \vdots \\ h((-m_0+m)\Delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b(m_0\Delta) \\ \vdots \\ r_{db}((m_0-m)\Delta) \end{bmatrix} \quad (22)$$

## 3 应用实例

### 3.1 模型试验设计

模型试验设计在室内进行, 在长、宽、高分别为  $1.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$  的塑料箱中埋置目标体, 介质采用晾干的沙土, 目标体设计在距表面垂直深度 30 cm, 水平间距 10 cm, 大小  $10 \text{ cm}^2$ , 厚度为 1 cm 的 2 个铜板, 如图 1、下页图 2 所示。

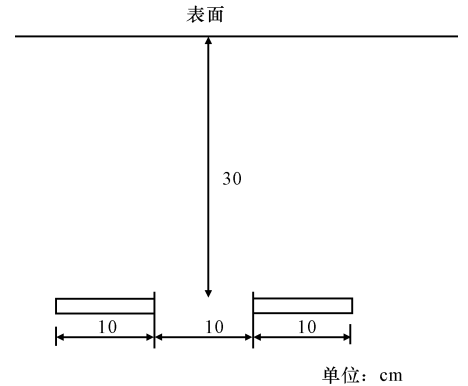


图1 目标体的设计

Fig. 1 Design of targets

### 3.2 试验测试

#### 3.2.1 准备工作

(1) 测试设备: 采用中国电波研究所开发的 LTD-2100 型探地雷达仪, 雷达天线采用 900 MHz 天线。



图 2 模型试验的制作  
Fig. 2 Model test

(2)雷达主要参数:现场调试过程中采用的雷达参数见下页表 1。

表 1 雷达主要参数指标  
Tab. 1 GPR main parameters

采样点数/个	迭加次数/次	采样时窗/ns	触发方式	天线频率/MHz
512	10	20	连续	900

3.2.2 数据采集

模型试验制作完成后,进行数据采集,为了保证测试数据的可靠性,排除周围的电磁干扰,在尽可能理想的环境下进行,如图 3 所示。



图 3 现场试验  
Fig. 3 Field experimentation

4 处理结果及分析

4.1 数据处理

采集的数据应用 DSP6.0 软件进行读取和显示。图 4 是用二维伪彩灰度图显示的雷达剖面,在

雷达剖面上目标体显示为一组混合双曲线,两目标体对电磁反射信号形成混迭干扰,使得目标体的图像混为一体。

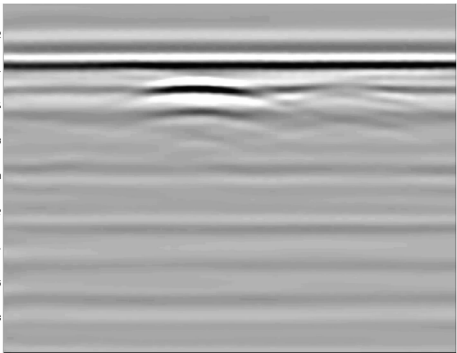


图 4 目标体在二维图像上的显示  
Fig. 4 Target displayed on two dimensional image

在 DSP6.0 软件上对原始雷达图像进一步处理,首先进行直达波去除,然后进行道间均衡、滤波、增益等一系列的常规处理,处理后的雷达剖面见图 5。图 5 与图 4 相对比,雷达剖面的效果得到一定程度的改善,目标体信号得到增强,但 2 个铜板的目标体图像仍然混迭在一块。

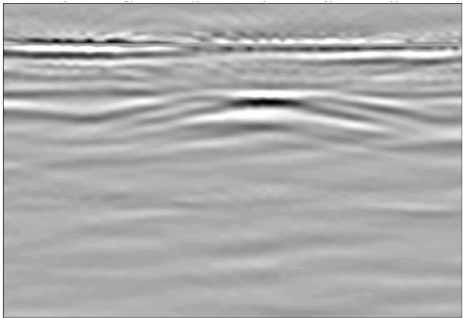


图 5 处理后的雷达剖面  
Fig. 5 Radar profile after treatment

4.2 反褶积处理

4.2.1 数据的读取

探地雷达数据存储格式普遍参考地震勘探中 SGY 数据存储模式,前面为文件头,主要用于存储采集参数、地址等,文件头的后面为实测的记录数据,数据计录的顺序按通道排列,首先是通道 I 的数据 1,然后是通道 I 的数据 2,……,等。LTD-2100 型探地雷达仪数据存储是以 ltd 为扩展名的数据文件,文件头的存储顺序和其他类型的雷达稍有差别,在 MATLAB7.2 上对采集到的数据进行读取和存储转换。

4.2.2 参数的选取

为了克服雷达数据转换到频域采样造成的域叠

混现象,在对数据记录截取长度时,应取2的幂次,并在记录的后半段,充以足够多的0。由于雷达子波为最小延迟信号,在这种情况下,子波的能量集中在前面,它的 $Z$ 变换多项式的根在单位圆外;因此在式(22)中,取 $m_0=0, m=512$ 。白噪因子 $\lambda$ 的大小要根据子波 $b(j\Delta)$ 的振幅谱特点确定,当 $|B(\omega)|$ 越接近于0, $\lambda$ 就要取得相对大一些;相反,当 $|B(\omega)|$ 越远离0, $\lambda$ 就要取得相对小一些,通过尝试,最终确定白噪因子 $\lambda=0.01$ 比较合适。

#### 4.2.3 效果分析

在MATLAB7.2对雷达数据进行2次读取和算法实现,处理后的数据再转换成ltd格式,在DSP6.0显示,结果如图6所示。与图4、图5相比,图6的雷达图像中多次波和随机干扰明显得到压制,目标信号得到了增加,效果明显得到改善;混迭的抛物线得到收敛,目标体的形状得到了归位,分辨率得到了进一步提高,2个铜板目标体在雷达图像上能清楚地分辨出来。

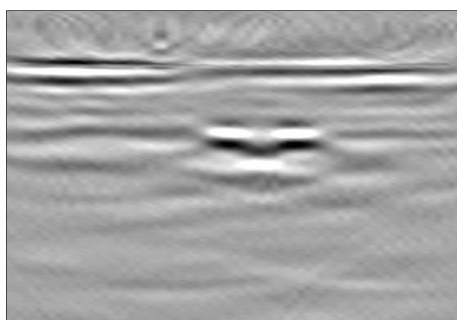


图6 最小平方反褶积处理后的雷达剖面

Fig. 6 Radar profile after least square deconvolution  
fuzzy fractal treatment

## 5 结 语

(1)把最小平方反褶积方法应用于探地雷达信号的后处理,从理论上给出算法实现的具体过程。

(2)最小平方反褶积的处理效果与输入雷达记录信号和参数 $m, \lambda$ 的选取有直接关系,避免在频率域出现叠混现象,要求输入的雷达记录长度应为2的幂次;实现的过程中 $m_0=0, m=512$ ,白噪因子 $\lambda$ 取0.01。

(3)最小平方反褶积方法不仅能压制噪声,增强目标信号,同时能实现目标体图像的收敛、聚焦,提高分辨率。

(4)结果验证中的试验数据是在室内理想的条件下采集,文中提出的最小平方反褶积是在反射系数序列和干扰都为白噪声的基础上进行讨论的,其

他情况将在后续进一步讨论。

## 参考文献:

### References:

- [1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.  
LI Da-xin. Method and application of ground penetrating radar [M]. Beijing: Geological Press, 1994. (in Chinese)
- [2] 崔阿李,刘康和. 探地雷达技术在岩溶探测中的应用[J]. 地球科学与环境学报,2008,30(2):197-199.  
CUI A-li, LIU Kang-he. Application of ground penetrating radar (GPR) technology in karst survey [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30 (2):197-199. (in Chinese)
- [3] 刘传孝,杨永杰,蒋金泉. 探地雷达技术在采矿工程中的应用[J]. 岩土工程学报,1998,20(6):99-101.  
LIU Chuan-xiao, YANG Yong-jie, JIANG Jin-quan. Technique of the ground penetrating radar used in coal mining engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6):99-101. (in Chinese)
- [4] 陆礼训,邓世坤,冉 弥. 探地雷达在隧道施工超前探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2010,7(2):201-206.  
LU Li-xun, DENG Shi-Kun, RAN Mi. The application of GPR in the advanced detection for tunnel excavating [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(2):201-206. (in Chinese)
- [5] 张 良. 频率控制线性预测最小平方反褶积[J]. 石油物探,1993,32(2):70-80. (in Chinese)  
ZHANG Liang. The least square deconvolution of frequency-controlled linear prediction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1993, 32(2):70-80. (in Chinese)
- [6] 苏茂鑫. 减少吸收衰减影响的高分辨率探地雷达技术研究[D]. 长春:吉林大学,2007.  
SU Mao-xin. Study on high-resolution GPR technique through reducing the influences of absorption and attenuation [D]. Changchun: Jinlin University, 2007. (in Chinese)
- [7] 申家全,闫怀志,胡昌振. 基于主成分自动选择准则的探地雷达杂波抑制[J]. 电波科学学报,2010,25(1):83-87.  
SHEN JIA-quan, YAN Huai-zhi, HU Chang-zhen. Auto-selected rule on principal component analysis in ground penetrating radar signal denoising [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(1):83-87. (in Chinese)