

## 时间域编码电磁勘探方法研究

张建国<sup>\*①②</sup> 武欣<sup>①</sup> 齐有政<sup>①②</sup> 黄玲<sup>①</sup> 方广有<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 为了抑制空气波干扰,该文提出时间域编码电磁方法,采用伪随机编码信号作为激励信号,基于同步记录的编码信号和接收电压信号,通过时间域反卷积信号复原方法获得含有异常体信息的大地冲激响应,同时分析了时钟频率与编码长度的选择依据。该方法进行了外场实验验证,对比实验结果表明:该方法通过降低时钟频率与增大编码长度可显著提高电磁数据的信号质量,抑制空气波干扰,有效识别地下异常体信息。

**关键词:** 电磁勘探; 伪随机编码; 反卷积信号复原; 大地冲激响应

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)02-0158-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13092

## Investigation on Time Domain Coded Electromagnetic Exploration Method

Zhang Jian-guo<sup>①②</sup> Wu Xin<sup>①</sup> Qi You-zheng<sup>①②</sup> Huang Ling<sup>①</sup> Fang Guang-you<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To suppress airwave interference, a time-domain coded electromagnetic exploration method is proposed with Pseudo-Random Binary Sequences (PRBS) code as the source signal. Based on the PRBS code and receiving voltages, which are recorded simultaneously, the impulse response of the earth can be obtained by the time-domain deconvolution signal recovery method, and the target information is effectively contained in the impulse response. The selection methods of clock frequency and code length were analyzed and field experiments were carried out, which demonstrated that the signal quality of the EM data could be improved by decreasing the clock frequency, or increasing the code length. The proposed method could greatly suppress the airwave interference and effectively identify underground anomalies.

**Key words:** Electromagnetic exploration; Pseudo-Random Binary Sequences (PRBS); Deconvolution signal recovery; Impulse response of the earth

### 1 引言

随着我国经济的快速发展,能源需求量急剧加大,油气资源勘探的攻关研究已经迫在眉睫。油田钻井代价高昂且只能确定钻井附近的地质参数,不适合大规模普查油气资源<sup>[1,2]</sup>;对于地表及地质条件复杂的地区,电磁勘探方法能从不同于地震方法的角度反映油气层的物理特性,可实现对油气藏的有效勘探。然而,由于空气波等外界干扰,如何提高信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)已然成为电磁

勘探方法的首要问题<sup>[3,4]</sup>。

长偏移距瞬变电磁测深法<sup>[5]</sup>(Long Offset Transient ElectroMagnetics, LOTEM)是一种典型的油气资源电磁勘探方法,它以电偶源瞬变测深理论为基础,对地下深部油气层有较强的勘探能力。为了实现大勘探深度,LOTEM采用长达几百甚至几千米的发射线将大功率激励信号注入大地,并在远区(早期)观测含有地电信息的大地电磁响应,通过加大发射能量来提高SNR。由于仪器设备以及地质条件限制,加大发射能量来提高SNR有较大的局限性。

文献[6]基于LOTEM方法,提出了MTEM(Multi-Transient ElectroMagnetics)方法,在实验后期为了提高SNR,将激励信号由双极性方波换成伪随机编码(Pseudo-Random Binary Sequences, PRBS)

2013-10-12 收到, 2014-01-14 改回; 2014-01-26 网络优先出版  
国家科技专项“深部探测技术与实验研究专项”(SinoProbe-09-02)  
资助课题

\*通信作者: 张建国 wudajianguo@126.com

信号。由于 PRBS 具有良好的相关性，能够提升 SNR。MTEM 方法能分辨出大深度下的油气层，实验结果达到了预期目标。然而，MTEM 方法只是在实验后期对编码信号进行了一次尝试，对于编码信号的诸多参数选择和实验分析等关键性问题，都未进行理论阐述和实验验证。

为了抑制空气波干扰，本文提出时间域编码电磁勘探方法，采用伪随机编码作为激励信号，基于同步记录的编码信号和接收电压信号，通过时间域反卷积信号复原方法(Time-domain Deconvolution Signal Recovery, TDSR)，获得含有地下异常体信息的大地冲激响应，同时分析了时钟频率与码元长度的选择依据，并进行了外场实验验证。PRBS 编码信号扩展了发射信号的频带宽度，提高了接收数据的 SNR。TDSR 方法能抑制空气波干扰，进而实现对地下异常体的有效勘探。

## 2 编码电磁勘探原理

### 2.1 层状大地模型的冲激响应

对于电磁勘探方法，如果地下异常体为导电性介质，如金属矿产，采用水平磁性源发射(水平闭合线圈作为发射源)最有利于电磁勘探；如果期望探测的地下异常体呈现高阻特性，如油气层，则最佳的激励源为水平电性源(两端接地的馈电导线)。针对地下高阻油气层勘探，本文采用水平电性源作为发射源。电磁勘探方法常用的水平层状大地模型如图 1 所示，地下各层介质的电阻率和厚度分别记为  $\rho_n$  和  $h_n$ 。由于在一般情况下发射源长度小于偏移距(发射机与接收机之间的距离)的 1/4，因此可把发射源当作水平电偶极子处理，如图 1 中 A, B 所示。在距发射源一定距离(图 1 中  $r$ )处，采用水平长导线(图 1 中 M, N)接收来自地下的水平感应电场电压。

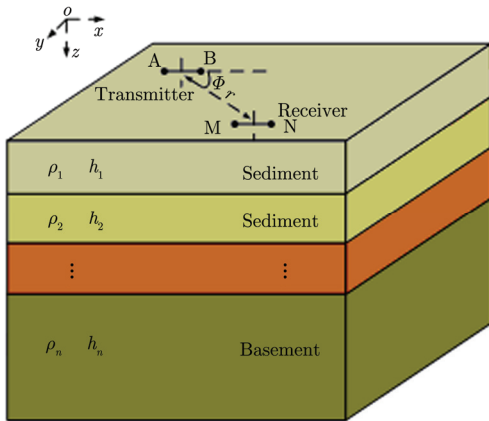


图 1 层状大地模型

Fig. 1 Layered earth model

把图 1 所示的大地模型看作一个大地系统，任意激励信号的系统响应均可分解为冲激响应之和。在忽略位移电流前提下，采用谐变电流作为激励信号，则大地冲激响应(对应于水平同线电场分量)的频率域表达式为<sup>[7]</sup>：

$$G(\omega) = \frac{P \cdot \mu}{2\pi} \int_0^\infty F_1(\lambda, r, \omega) \cdot J_0(\lambda, r) \cdot d\lambda + \frac{P \cdot \mu}{2\pi r} \int_0^\infty F_2(\lambda, r, \omega) \cdot J_1(\lambda, r) \cdot d\lambda \quad (1)$$

其中，积分核函数

$$F_1 = \sin^2 \Phi \cdot \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1^*} - \cos^2 \Phi \cdot \frac{\lambda u_1}{k_1^2 \cdot R_1}$$

$$F_2 = (2 \cos^2 \Phi - 1) \cdot \left[ \frac{1}{\lambda + u_1/R_1^*} - \frac{u_1}{k_1^2 \cdot R_1} \right]$$

变量

$$R_1^* = \coth \left[ u_1 h_1 + \coth^{-1} \left( \frac{u_1}{u_2} \right) \right] \cdot \coth \left\{ u_2 h_2 + \dots + \coth^{-1} \left( \frac{u_{N-1}}{u_N} \right) \right\}$$

$$R_1 = \coth \left[ u_1 h_1 + \coth^{-1} \left( \frac{u_1 \rho_1}{u_2 \rho_2} \right) \right] \cdot \coth \left\{ u_2 h_2 + \dots + \coth^{-1} \left( \frac{u_{N-1} \rho_{N-1}}{u_N \rho_N} \right) \right\}$$

$J_0, J_1$  分别为 0 阶和 1 阶 Bessel 函数， $P = I \cdot L$  为偶极矩， $I = I_0 \cdot \exp(-i\omega \cdot t)$  为谐变电流， $L$  为发射源长度， $\mu$  为真空磁导率， $\lambda$  为空间频率， $r$  为偏移距， $\omega$  为角频率， $u_n = \sqrt{\lambda^2 - k_n^2}$ ， $k_n = i\omega\mu/\rho_n$  为第  $n$  层的波数，角度  $\Phi$  为发射点和接收点的连线与  $x$  轴的夹角， $N$  为大地模型的总层数。

对式(1)进行傅里叶逆变换，得到大地冲激响应的时域形式  $g(t)$ ，其波形随时间变化曲线如图 2 所示。图中  $t_0$  是空气波到达接收点的时刻，也是数据的时间零点。空气波是全空间条件下发射源激励的电磁场在接收机产生的响应，它不带有任何地下信息。在发射瞬间出现，并在偏移距较大时掩盖来自地下的有用电磁响应。大地冲激响应是发射源激励的电磁场<sup>[8]</sup>，经大地系统作用后产生的电磁响应带有地下异常体信息，且响应持续时间较长，其峰值时刻为  $t_p$  ( $t_p = \mu \cdot r^2 / (10\rho)$ )。为了识别出地下异常体，必须将空气波从大地冲激响应数据中分离，即  $t_p$  和  $t_0$  之间的时间间隔必须足够大以满足数据解释的要求，下文将给出定量分析。

### 2.2 PRBS 编码信号特性

传统电磁勘探方法一般采用双极性方波作为激

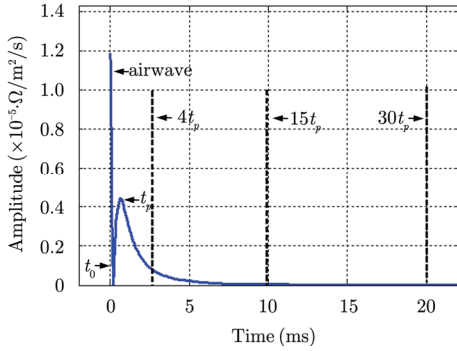
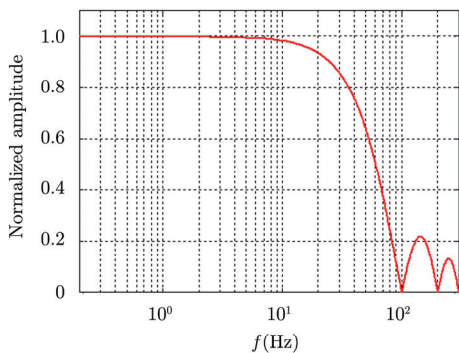


图2 时间域大地冲激响应波形  
Fig. 2 The impulse response waveform of the earth in time-domain

励信号，比如 CSAMT (Controlled Source Audio MagnetoTelluric) 和 CSEM (Controlled Source ElectroMagnetic)，双极性方波的特点为：频谱只含有基频和奇次谐波，且  $N$  次谐波的振幅是基频振幅的  $1/N$ 。此特点表明双极性方波的功率主要分布于 3 次谐波内的 3 个频点，其信号频带较窄，因此，双极性方波不是宽频带信号。

为了提高电磁勘探的分辨率，采用 m 序列 PRBS 编码作为发射信号来扩展信号频带宽度，进而提高信号分辨率和数据质量<sup>[9,10]</sup>。PRBS 编码信号的特点：(1)宽频带：信号能量在  $f_s/N_p$  ( $f_s$  为发射信号的时钟频率、 $N_p$  为 PRBS 编码的码长)至  $f_s/2$  频带内呈现出近似的均匀分布(如图 3(a))，采用 PRBS 编码信号作为激励源相当于频率域电磁法采用多个频点同时发射，可将更多信号能量注入地下；(2)良好的相关性：PRBS 编码信号的自相关函数(如图 3(b))呈近似的冲激函数特性，这表明 PRBS 编码信号具有良好的自相关特性。根据离散型的维纳-霍夫 (Wiener-Hopf) 方程：



(a) 时钟频率为100 Hz的PRBS编码频谱  
(a) The spectrum of the PRBS signal at a clock

$$\sum_{p=0}^N g^*(p) \cdot \varphi_{xx}(q-p) = \varphi_{yx}(q), \quad q = 0, 1, \dots, N \quad (2)$$

我们知道，如果输入信号  $x(n)$  的自相关函数(式(2)中  $\varphi$ )是冲激函数形式，那么输入信号  $x(n)$  和输出信号  $y(n)$  的互相关函数是系统冲激响应  $g^*(p)$  的最小均方估计，即在本文方法中，如采用 PRBS 编码信号作为激励源，则大地脉冲响应  $g(t)$  可以获得最佳近似值；因此，基于 PRBS 编码信号的良好相关性，采用 PRBS 编码信号作为电磁勘探的激励信号，同步记录 PRBS 编码信号和接收处的大地电磁响应，可获得精确的大地脉冲响应。

2.3 TDSR 方法

把时变的 PRBS 编码电流信号注入大地，激励大地产生电磁感应，同步记录发射电流信号  $i(t)$  和一定偏移距处的观测电压信号  $V(t)$ ，通过  $i(t)$  和  $V(t)$  的反卷积处理，可以获得带有地下异常体信息的大地冲激响应  $g(t)$ 。图 4 为大地系统的脉冲响应示意图，接收处的观测电压  $V(t)$  可表示为：

$$V(t) = i(t) * g(t) + n(t) \quad (3)$$

式中： $i(t)$  为 PRBS 编码发射电流， $g(t)$  为大地冲激响应， $n(t)$  代表没有相关性的噪声，\*表示卷积。

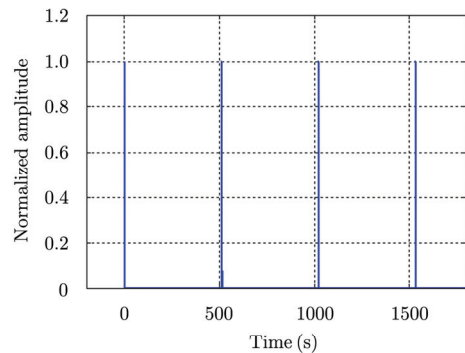
对于式(3)所示的反问题，通过反卷积方法进行求解，其主要处理步骤为：

(a) 利用傅里叶变换，将式(3)转换到频率域，略去频率域标记，得到：

$$V = I \cdot G + n \quad (4)$$

其中： $I, G, V$  和  $n$  分别是  $i(t), g(t), V(t)$  和  $n(t)$  对应的频率域信号。

(b) 由于在接收大地响应时，也同步记录了发射的 PRBS 编码信号；因此，可对式(4)两边同时乘以 PRBS 编码信号的复共轭  $I^*$ ：



(b) 周期长度为512的PRBS自相关函数  
(b) The autocorrelation function of the PRBS signal

图3 PRBS 编码信号特点

Fig. 3 The characteristics of the PRBS signal

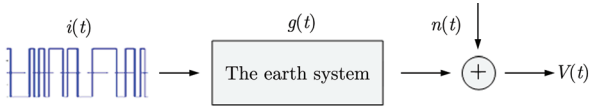


图4 大地系统的脉冲响应示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the impulse response of the earth system

$$I^* \cdot V = I^* \cdot I \cdot G + I^* \cdot n \quad (5)$$

(c) 通过傅里叶变换将  $I^* \cdot I$  转换到时间域, 在理论上可得到“类冲激信号”  $\delta(t)$ ; 但由于接收数据的长度有限及噪声的干扰, 类冲激信号的长度不是无限窄, 其长度由发射信号决定。因此, 将  $I^* \cdot I$  傅里叶逆变换后的表达式记为  $\tilde{\delta}(t) = F^{-1}(I^* \cdot I)$ , 则通过傅里叶逆变换得到式(5)的时间域表达式为:

$$g(t) \approx \tilde{\delta}(t) * g(t) = F^{-1}(I^* \cdot V) - n_1(t) \quad (6)$$

去除不相关噪声  $n_1(t)$  ( $I^* \cdot n$  对应的时间域噪声),  $\tilde{\delta}(t) * g(t) \approx g(t)$  即是含有地下异常体信息的大地冲激响应, 即 TDSR 方法的目标。由式(6)可知, TDSR 方法的核心思想是采用“类冲激信号”的近似值  $\tilde{\delta}(t)$  对大地冲激响应进行卷积; 由于  $\tilde{\delta}(t) = F^{-1}(I^* \cdot I)$ , 故  $\tilde{\delta}(t)$  的时间域长度由 PRBS 编码信号的时钟频率  $f_s$  决定;  $f_s$  越大, 编码信号  $I$  中的码元间隔  $\Delta t_s$  越小, 则  $\tilde{\delta}(t)$  的时间域波形越窄, TDSR 方法获得的大地冲激响应越精确。

因此, 对上述分析进行总结: TDSR 方法相当于采用 PRBS 编码的码元间隔  $\Delta t_s$  对大地冲激响应进行时间域采样, 以恢复大地冲激响应的真实值;  $\Delta t_s$  越小 ( $f_s$  越大), 图 2 中  $(t_p - t_0)$  时间段内的采样点越多, 则 TDSR 方法对空气波的抑制能力越强, 得到的结果越精确。

根据式(6)得到大地冲激响应的方式即为本文的时间域编码电磁勘探方法。

### 3 基于阵列式接收的编码电磁勘探系统

图 5 为基于阵列式接收的 PRBS 编码电磁勘探系统布置图。通过接地良好的发射电极, 将 PRBS 编码电流信号注入大地系统, 在其激发下, 地下介质中激励起的感应涡流将产生随时间变化的感应电磁场(即 2 次场)。在平行于发射源方向的测线上, 通过多通道接收机记录接收处的大地响应电压值, 同时由于 TDSR 方法的需要, 同步记录 PRBS 编码电流信号。根据获得的大地响应数据和 PRBS 编码信号, 通过 2.3 节所示的反卷积复原方法, 即可获得大地冲激响应。基于大地冲激响应, 通过后续的数据解释和反演计算, 可获得地下异常体的地电特性。

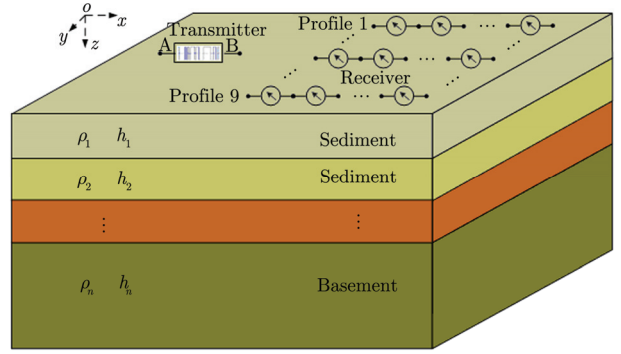


图5 基于阵列式接收的 PRBS 编码电磁勘探系统布置图

Fig. 5 The layout of the PRBS coded electromagnetic exploration system based on the array receivers

编码电磁勘探系统的发射部分采用大功率激电仪, 最大发射电压达 1000 V, 最大工作电流为 40 A。PRBS 编码的时钟频率在 0.022~8192 Hz 范围内可选, 编码长度可根据编码的阶数  $n$  (最大阶数为 15) 进行调节, 码长计算公式为  $2^n - 1$ , 时间基准由 GPS 模块提供。

接收部分采用阵列式接收方式, 如图 5 所示, 接收阵列由多条测线组成(图中为 9 条测线), 每条测线均平行于发射源方向, 并等间隔分布; 每条测线上有一定数量的测点, 每个测点布置一个多通道接收站采集大地响应产生的感应电压。接收站为一个 24 位的多通道接收机, 其动态范围为 212 dB, 最小接收电平为  $\pm 0.03 \mu\text{V}$ , 最大输入电压为  $\pm 32 \text{ V}$ 。

控制部分主要负责发射部分的参数选择, 如 PRBS 编码的时钟频率、编码阶数以及编码的周期重复次数。控制部分实现了发射信号和接收数据的时间同步, 保证大地脉冲响应数据解释的正确性。

## 4 系统参数优化方法

### 4.1 PRBS 编码时钟频率选取

如 2.3 节的分析, TDSR 方法相当于采用 PRBS 编码的码元间隔  $\Delta t_s$  对大地冲激响应进行时间域采样, 以恢复大地冲激响应的真实值;  $\Delta t_s$  越小 ( $f_s$  越大), 图 2 中  $(t_p - t_0)$  时间段内的采样点越多, 越有助于该方法去除空气波, 进而恢复大地冲激响应的真实值; 经过多次实验验证, 只要码元间隔  $\Delta t_s$  达到大地冲激响应峰值时刻与空气波到达时刻两者差值的 1/10,

$$\Delta t_s \leq \frac{t_p - t_0}{10} \quad \Rightarrow \quad f_s \geq \frac{10}{t_p - t_0} \quad (7)$$

则得到的大地冲激响应即可满足数据解释的需要, 式(7)确定了 PRBS 编码的时钟频率  $f_s$  的下限值。从去除空气波的角度考虑,  $f_s$  越大越有利于结果的准确性; 但是, 根据大地滤波效应, 随着  $f_s$  增大, 接

收处的接收电压(式(1))会相应降低,为了获得接收处的大地冲激响应,接收电压必须大于多通道接收机的最小分辨电平,这成为 PRBS 编码时钟频率  $f_s$  的上限值。 $f_s$  的下限值和上限值是时钟频率选择的依据。

由式(1)所示的大地冲激响应表达式可知,大地感应的 2 次场信号与偏移距的 5 次方成反比,如果发射源只采用一个固定的时钟频率  $f_s$  进行 PRBS 编码发射,那么各个测点的接收电压值会有较大数量级的差别。以图 5 中与发射线共线的测线 5 为例(中间位置与发射源同线的测线),假定勘探深度为  $d$ ,要分辨出深度  $d$  处目标的顶部和底部,最大偏移距  $r_{\max} = 4d$ ,最小偏移距  $r_{\min} = 0.1 \cdot r_{\max} = 0.4d$ ;那么最大偏移距和最小偏移距处的接收电压比值  $V_{\max} / V_{\min} = 10^{-5}$ ,二者相差 5 个数量级,不利于数据接收和实时处理。

因此,本文对偏移距进行分段,每个偏移距段选择一个时钟频率用于发射 PRBS 编码信号。采用相同时钟频率的接收点属于同一偏移距段,整个工区根据时钟频率划分为多个子分区,兼顾了各接收点的信号质量和分辨率。随着子分区与发射源之间距离的增大,时钟频率会相应降低,但每个子分区内部的时钟频率保持不变。

### 4.2 PRBS 编码码长选取

由 PRBS 编码信号的特性可知:在时钟频率  $f_s$  固定时,其码长越大,发射信号向地下传送的能量越多,反卷积数据处理后的 SNR 增益越高。确定了每个偏移距段的时钟频率后,选择码长较大的 PRBS 编码,有利于提高电磁勘探系统的数据质量。当时钟频率  $f_s$  为定值时,接收电压数据和记录的发射电流信号进行反卷积处理,在理论上 SNR 增益  $G_1$  等于 PRBS 编码码长  $N_P$ ;但是,由于噪声等因素干扰,实际操作中反卷积处理获得的 SNR 增益  $G_1$ :  $\sqrt{N_P} \leq G_1 \leq N_P$ 。

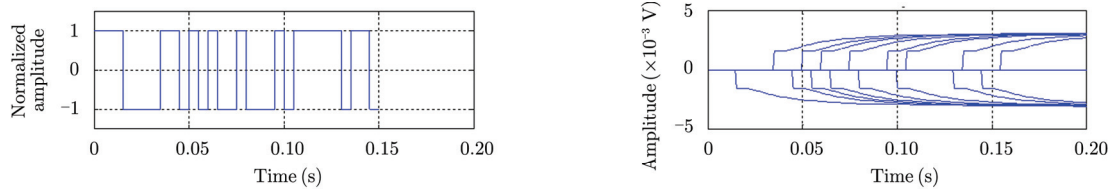
另外循环发射 PRBS 编码,再对得到的目标数据进行叠加也可以提高 SNR。循环发射 PRBS 编码  $N_C$  次,再对反卷积后的目标数据进行叠加,带来的 SNR 增益  $G_2 = \sqrt{N_C}$ 。

通过增大编码长度和循环发射编码两个操作,可以显著提高数据的 SNR,总的 SNR 增益为两个操作分别进行时 SNR 提升倍数的乘积,即  $G = G_1 \cdot G_2$ 。

$$\sqrt{N_P} \cdot \sqrt{N_C} \leq G \leq N_P \cdot \sqrt{N_C} \quad (8)$$

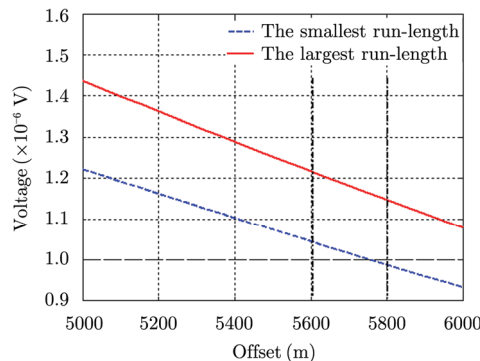
### 4.3 PRBS 编码游程选取

基于 PRBS 编码信号的接收信号,可以看作是编码信号的各个上升沿和下降沿激励的大地阶跃响应的组合,如图 6(a)所示。阶数为  $n$  的 PRBS 编码



(a1) PRBS编码信号波形示意图  
(a1) A schematic diagram of the PRBS signal waveform  
(a2) 对应接收点的阶跃响应组合  
(a2) The combination of the step responses at the corresponding receiver

(a) PRBS编码信号波形及对应接收点的阶跃响应  
(a) The schematic diagram of the PRBS signal and the step responses at the corresponding receiver



(b) PRBS关断后不同偏移距下的接收信号  
(b) The receiving waveforms at different points after the PRBS signal is turned off

图 6 PRBS 信号分析

Fig. 6 The analysis of PRBS signal

最大游程是  $n$ ，最小游程是 1, PRBS 编码以不同的游程结尾, 其对应的 2 次场数据 SNR 差别明显, 如图 6(b)所示, 红色实线和蓝色虚线分别表示 PRBS 编码以最大和最小游程结尾。当以最大游程结尾时, 发射信号关断后的 2 次场数据的 SNR 最优; 当 PRBS 编码信号以最小游程结尾时, 2 次场数据的 SNR 最差。因此, 在电磁勘探系统实际工作中, 可视工区所需的 SNR 条件, 选择以合适游程结尾的 PRBS 编码信号。

### 5 实验结果与分析

为了验证本文编码电磁勘探方法的有效性, 在河北省涿鹿县开展了外场实验, 如图 7 和图 8 所示。发射线长度取 500 m, 发射电流 10 A, 接收线长度取 200 m, 接收间距为 200 m。PRBS 编码时钟频率根据 4.1 节所述的方法在 32~8192 Hz 之间选择, 码元长度选取 4095(12 阶)和 16383(14 阶)两个较大的码长, 每次编码发射均让 PRBS 编码信号循环发射 5 个周期, 并同步记录编码发射电流信号和接收处电压信号, 接收机采样率为 24 kHz。

在不同时钟频率的对比实验中, 采用偏移距 1

km, 码元长度 16383(编码结尾游程为 8), 选择 1024 Hz 和 4096 Hz 两个频点作为编码信号的时钟频率, 在其它收发参数相同条件下, 进行了对比实验。根据 2.1 节中大地冲激响应的计算公式, 可求解出偏移距 1 km 的大地冲激响应的峰值时刻为 11 ms, 则根据式(7), 编码时钟频率应该大于 910 Hz, 对比实验选择的 1024 Hz 和 4096 Hz 符合要求。编码信号发射信号和相应的接收波形分别如图 9 和图 10 所示, 编码发射的数据信号质量较好, 能有效地抑制大地电磁噪声等干扰, 适合用于数据解释。基于图 9 和图 10 所示的数据, TDSR 方法得到的大地冲激响应波形如图 11 所示, 在两个不同时钟频率条件下, 得到的大地冲激响应的波形曲线基本一致, 均有效地抑制了空气波干扰, 且 4096 Hz 的大地冲激响应的峰值接近于 1024 Hz 峰值的 1/4, 与理论计算相符。从波形曲线中, 可清晰地分辨出大地冲激响应的峰值时刻便于后续的数据解释和反演计算。

在不同码元长度的对比实验中, 仍采用上述参数, 固定时钟频率为 1024 Hz, 分别采用 4095 和 16383 编码长度进行编码信号发射, 同步记录编码发射电



图 7 野外实验的工区位置

Fig. 7 The surveying area location of the field experiments

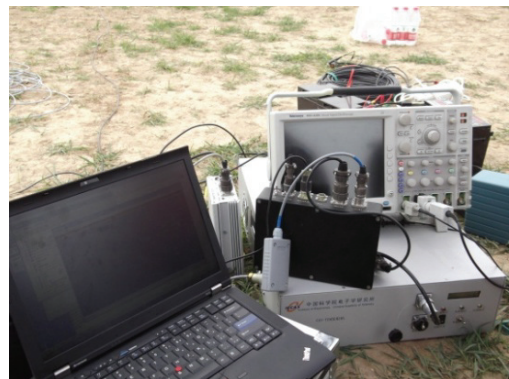


图 8 野外一个接收站的现场图

Fig. 8 The figure of a receiving station in the field

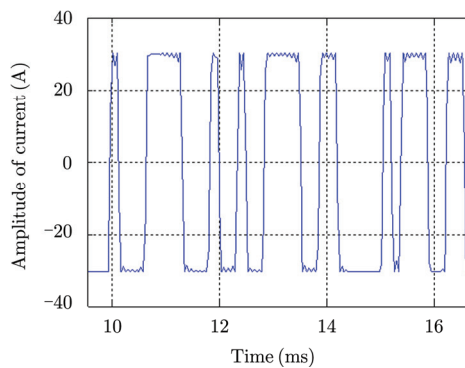


图 9 PRBS 编码发射信号波形(时钟频率为 1024 Hz)

Fig. 9 The transmitting waveform of the PRBS coded signal (clock frequency is 1024 Hz)

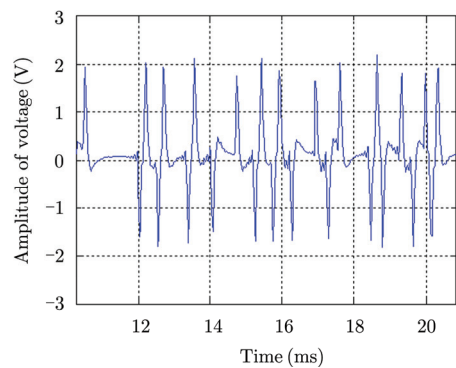


图 10 编码发射的接收波形(时钟频率为 1024 Hz)

Fig. 10 The receiving waveform corresponding to the PRBS coded signal (clock frequency is 1024 Hz)

流信号和接收处电压信号,通过 TDSR 方法获得大地冲激响应波形,如图 12 所示。采用两个不同码元长度,得到的大地冲激响应的波形曲线基本一致,均有效地抑制了空气波干扰,从波形中可清晰地分辨出峰值时刻,且 16383 码长的大地冲激响应的峰值与 4095 码长的峰值相比,有接近于两倍的提升,与理论计算基本一致。

对于图 11 和图 12 中大地冲激响应曲线,如果成倍增加时钟频率,波形将会变得光滑,但是,随着时钟频率的增加,接收机采样率也要成倍增加,这会给数据存储和实时处理带来诸多不便,如时钟频率为 1024 Hz、编码长度为 4095,编码循环发射 5 个周期,则单点的接收数据量达到 2.3 GByte。因此,采用目前编码时钟频率和接收机采样率,虽然恢

复的大地冲激响应曲线不是太光滑,但仍满足数据解释的需要,为综合考虑各方面因素后的折衷选择。

## 6 结论

本文针对如何抑制电磁勘探中的空气波干扰,提出了一种时间域编码电磁勘探方法,并进行了外场验证性实验。其具体方法是采用伪随机编码序列作为激励信号,基于发射信号与接收信号之间的相关性,通过 TDSR 方法,获得含有地下异常体信息的大地冲激响应。实验结果表明本文方法可抑制空气波干扰,能有效识别出地下异常体信息。对比实验证实,降低时钟频率与增大编码长度可显著提高电磁数据的信号质量。在未来的工作中将继续研究编码游程对勘探结果的影响。

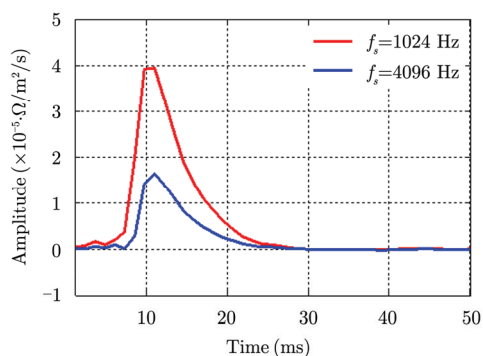


图 11 基于时钟频率的对比实验(码元长度为 16383)

Fig. 11 The comparative experiments based on the clock frequency (the code length is 16383)

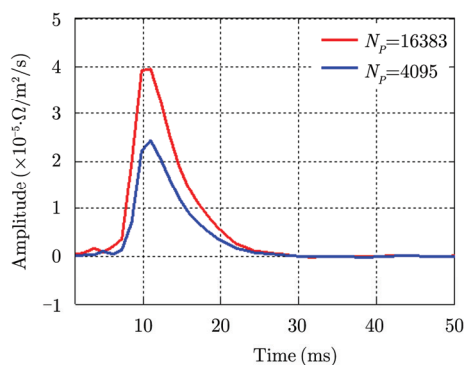


图 12 基于码元长度的对比实验(时钟频率为 1024 Hz)

Fig. 12 The comparative experiments based on the code length (the clock frequency is 1024 Hz)

## 参考文献

- [1] 何继善. 海洋电磁法原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 3-4.  
He J S. Marine Electromagnetic Principle[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 3-4.
- [2] Kaufman A A and Keller G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 144-152.  
Kaufman A A and Keller G V. Frequency and Transient Soundings[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 144-152.
- [3] Ziolkowski A and Carson R. Maximising signal-to-noise ratio in transient EM data[C]. EAGE 69th Conference & Exhibition, London, UK, 2007: E048-E053.
- [4] Ziolkowski A. Optimisation of MTEM Parameters[P]: International Patent WO 2007/104949 A1, 2007.
- [5] Strack K M. Exploration with Deep Transient Electromagnetics[M]. USA: Elsevier Science Publishers B.V., 1992: 21-24.
- [6] Ziolkowski A, Hobbs B A, and Wright D. Multi-transient electromagnetic demonstration survey in France[J]. *Geophysics*, 2007, 72(4): F197-F209.
- [7] 汤井田, 罗维斌, 刘长生. 海底油气藏地质模型的冲激响应[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1929-1935.  
Tang J T, Luo W B, and Liu C S. Impulse response of seafloor hydrocarbon reservoir model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1929-1935.
- [8] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 1-10.  
Niu Z L. Theory of Transient Electromagnetic Methods[M]. Changsha: Central South University, 2007: 1-10.
- [9] 汤井田, 罗维斌. 基于相关辨识的逆重复m序列伪随机电磁法[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1226-1233.  
Tang J T and Luo W B. Pseudo-random electromagnetic exploration based on Invert-Repeated m-Sequence correlation identification[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1226-1233.
- [10] Streich R, Becken M, and Ritter O. Robust processing of noisy land-based controlled-source electromagnetic data[J]. *Geophysics*, 2013, 78(5): E237-E247.

## 作者简介



张建国(1985-), 男, 2005 年进入武汉大学电子信息学院学习, 2009 年进入中国科学院大学攻读博士学位, 主要研究方向是多通道瞬变电磁勘探系统设计与方法。

E-mail: wudajianguo@126.com

武欣(1981-), 男, 2010 年毕业于德国斯图加特大学, 现为中国科学院电子学研究所助理研究员, 主要研究方向为瞬变电磁勘探方法与设计。

E-mail: wu\_xin18@163.com

齐有政(1988-), 男, 2009 年毕业于中国石油大学(华东)获得学士学位, 现为中国科学院大学博士研究生, 主要研究方法为时空展源时间域电磁法。

E-mail: qiyz\_china@163.com

黄玲(1980-), 男, 2010 年毕业于吉林大学地球物理科学与技术学院, 获工学博士学位, 现为中国科学院电子学研究所助理研究员, 主要研究方向为地球物理电磁勘探方法的数据处理。

E-mail: yiling@email.jlu.edu.cn

方广有(1963-), 男, 现为中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 中科院“百人计划”优秀人员, 主要从事地球物理电磁勘探技术与装备研制等方面的研究工作。

E-mail: gyfang@mail.ie.ac.cn