

# 相关检测在甚低频电磁信号检测中的应用

王兰炜<sup>1</sup>, 赵家骝<sup>2</sup>, 王子影<sup>1</sup>, 王燕琼<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085 2. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036)

摘要:介绍了在甚低频电磁接收机研制中如何利用有关软件以相关检测方法检测甚低频电磁信号的幅度信息,并给出了理论和实际的检测结果。

关键词:甚低频;信号检测;相关检测;信号幅度

中图分类号:P319.3+1 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2004)04-0339-04

## 0 引言

甚低频(Extremely Low Frequency,简称 ELF)是一种由远距离外人工发射的、经由地表和电离层之间波导传播、具有高稳定度的超低频电磁信号,其基本频率范围在0.1~300 Hz间。通过在地表高精度地观测甚低频电磁信号可以探测地下介质的电性结构和电离层变化。ELF技术与大地电磁(MT)技术具有相同的物理原理,但ELF技术采用的是人工场源,因此信号强度大,信号覆盖范围广,信号频率稳定度高,视电阻率计算误差小,是目前在地震监测预报和研究中一种很有潜力和发展前途的电磁观测方法。

甚低频电磁接收机是用来接收测量ELF发信台发射的单一频率正弦波。虽然ELF发射机的发射功率很大,但在经过远距离的传播后信号功率仍会变的很小,信号会被淹没在强烈的背景噪声中。为了准确提取这个正弦信号的幅度和相位信息,本文介绍在甚低频电磁接收机研制中采用基于互相关原理的相关检测技术的基本原理和方法。

## 1 相关检测原理

假设含有噪声的被检测信号  $x(t) = s(t) + n(t) = A\sin(\omega t + \theta) + n(t)$ ,其中  $s(t)$  是有用的纯正弦信号,  $n(t)$  是噪声信号。经过采样后得到被检测信号的数据序列  $x(k) = A\sin(2\pi kf/f_s + \theta) + n(k)$ 。  $S_1(K)$  和  $S_2(K)$  是由计算机自动产生的、要与检测的信号同频的两个参考信号,其相位差为  $90^\circ$ 。

通过计算接收信号与两个参考信号的互相关  $R_{xs1}(0)$  和  $R_{xs2}(0)$ ,得到

$$R_{xs1}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot S_1(n) = \frac{A}{2} \cos(\theta) \quad (1)$$

$$R_{xs2}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot S_2(n) = \frac{A}{2} \sin(\theta) \quad (2)$$

计算式(1)和(2),可以得到被检测信号的幅度和相位

$$A = 2 \sqrt{R_{xs1}^2(0) + R_{xs2}^2(0)} \quad (3)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{R_{xs2}(0)}{R_{xs1}(0)} \right) \quad (4)$$

## 2 采用 MathLab 的理论仿真计算结果

被检测信号  $s(t)$  通过 A/D 变换得到被测信号序列  $s(n) = A\sin(2\pi nf/f_s + \theta)$ 。其中:正弦信号的振

幅  $A = 1$  频率  $f = 80$  Hz, 初始相位  $\theta = 45^\circ$ ; 信号采样率  $f_s = 1024$  Hz。

为了同时能够检测信号的幅度和相位信息,参考信号采用两个相互正交的同频信号,分别为  $S_1(n) = \sin(2\pi nf/f_s)$  和  $S_2(n) = \cos(2\pi nf/f_s)$ , 信号频率  $f$  和采样率  $f_s$  也分别为 80 Hz 和 1 024 Hz。

噪声为服从正态分布  $(0, \sigma^2)$  的随机噪声。含有噪声的被检测信号  $x(t)$  的波形如图 1, 已经分辨不出正弦信号  $x(t)$ 。参考信号  $S_1(n), S_2(n)$  的波形如图 2。图中横坐标为数据点数, 采样率 1 024 Hz。

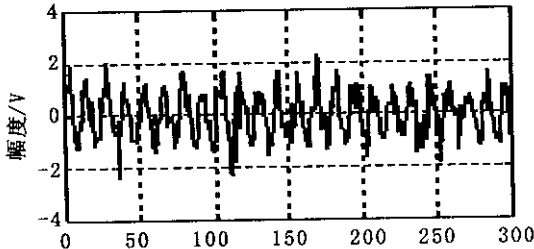


图 1 含有噪声的被检测信号波形  
Fig. 1 Waveform of signal with noise.

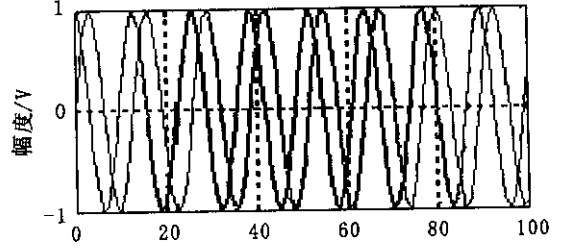


图 2 参考信号的波形  
Fig. 2 Waveform of reference signals.

利用公式 (3) 和 (4), 对于不同的噪声方差  $\sigma^2$ , 在采样长度为 102 400 点数据(采样时间长度 100 秒)时, 计算出要检测的正弦信号的幅度  $A$  和初始相位  $\theta$ , 并计算检测结果和实际值之间的相对误差。计算结果见表 1, 可以看到理论的检测结果很好。

表 1 相关检测结果

噪声方差 / V	检测结果		相对误差 / %	
	幅度 / V	检测相位	幅度	相位
0.50	1.000 5	44.84°	0.05	0.36
1.00	1.000 9	44.91°	0.09	0.19
2.00	1.001 8	45.11°	0.18	0.25
5.00	1.009 4	43.55°	0.94	3.23
10.00	1.003 9	47.46°	0.39	5.47

### 3 甚低频电磁接收机的实验结果

ELF 甚低频电磁接收机研制完成后, 我们分别在十三陵地震台和天津静海地震台进行了观测实验, 并采用相关检测的方法对观测数据进行处理, 从而获得被检测信号的幅度(相位信息未作处理)。由于没有人工场源, 我们通过一个自行研制的信号源进行了模拟观测试验。其设备由低频信号发生器、功率放大器和隔离输出组成。低频信号发生器的信号通过功率放大和输出隔离装置后对地供电, 在一定范围内的地表产生电场和磁场, 产生的场强大小与供电电流  $I$  成正比。

#### 3.1 十三陵地震台试验

十三陵地震台的试验布极图见图 3。图中 A、B 为供电电极(铅板)相距 47 m, 供电方向为南北方向。1、2、3、4 为固体不极化电极, 电极 1、3 和 2、4 相互垂直, 极距 20 m, 与供电方向成 45° 夹角。磁传感器 1、2 水平放置, 相互垂直, 且与供电方向成 45° 夹角。

实验步骤 (1) 首先对仪器和磁感应传感器进行标定。(2) 采用较大电流对 AB 供电, 保证接收到的电磁信号有足够大的信噪比。根据测值计算出每单位电流所产生的电场和磁场的大小, 以此计算出小电流供电时在供电区域中所能产生的场强的理论值。实验中的最大供电电流为 207.5 mA。(3) 在小电流的情况下将接收机接收的信号与理论信号进行比较, 检验接收机对小信号的接收能力。实验中的最小供电电流为 0.79 mA, 检测到最小电场约为 6 mV/km, 磁场大小为 0.004 nT。(4) 为计算方便, 所有的观测数据均以峰值计算。

采用相关检测的方法对数据进行处理, 得到的结果见表 2。可以看到实际的检测结果与理论值基本吻合, 能正确的检测出信号。检测的平均相

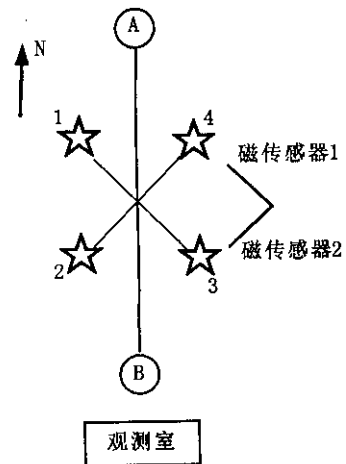


图 3 十三陵地震台试验观测布极图

Fig. 3 Configuration in Shisanling station.

对误差分别为：1.42%、1.44%、2.16%、1.45%。

表2 十三陵地震台试验结果

供电 /mA	理论计算结果 $V_1$				实际观测结果 $V_2$				相对误差%			
	电场/[mV·km <sup>-1</sup> ]		磁场/nT		电场/[mV·km <sup>-1</sup> ]		磁场/nT		电场		磁场	
	SN	EW	SN	EW	SN	EW	SN	EW	SN	EW	SN	EW
207.47				1418.178	1640.852	0.730	1.194					
27.619	188.790	218.433	0.097	0.159	188.604	218.361	0.097	0.159	0.099	0.033	0.106	0.081
14.649	100.135	115.857	0.052	0.084	100.546	116.389	0.052	0.085	0.410	0.459	0.177	0.291
7.717	52.753	61.036	0.027	0.044	51.813	59.799	0.027	0.043	1.782	2.027	2.382	2.124
3.083	21.076	24.386	0.011	0.018	20.730	23.911	0.011	0.017	1.645	1.946	3.042	2.094
1.580	10.801	12.497	0.006	0.009	10.732	12.055	0.005	0.009	0.640	3.533	3.151	2.027
0.789	5.397	6.244	0.003	0.005	5.182	6.115	0.003	0.004	3.978	2.064	6.231	3.498

图4为最小供电电流0.79mA时的观测数据曲线,图中横坐标为数据点数,采样率为1116Hz。

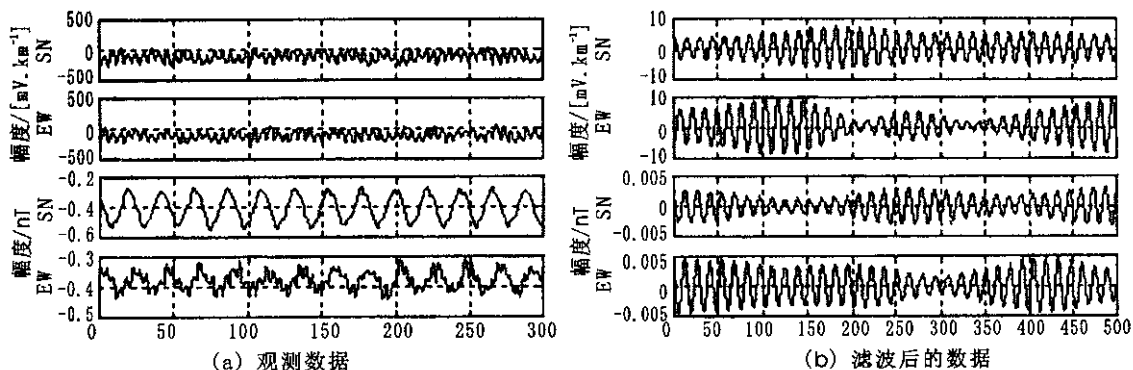


图4 十三陵台小电流供电( $I = 0.79 \text{ mA}$ )时的观测数据和滤波后的数据

Fig. 4 Waveforms of observation data and after-filter in small electric current( $I = 0.79 \text{ mA}$ ) at Shisnaling station.

### 3.2 静海地震台试验

静海地震台试验布极图见图5。图中供电电极(铅板)AB相距50m,供电方向为南北方向。电极1、3和2、4相互垂直,极距50m,与供电方向成45°夹角。磁传感器1、2水平放置,相互垂直,且与供电方向成45°夹角。

采用与十三陵地震台相同的试验方法进行试验,结果见表3。

实验中最大供电电流为172mA。在最小供电电流(0.03mA)时,检测到的磁场最小为0.001nT,电场信号太小而无法检出。在供电电流为0.15mA时,检测到的电场为0.3mV/km左右。图6为供电电流为0.15mA时的观测数据曲线和频谱图。图中的横坐标为数据点数,采样率为1116Hz。

可以看到实际的检测结果与理论值基本吻合,并且在电场和磁场信号强度分别仅有0.3mV/km和0.001nT时,采用相关检测的方法也可以检测到信号。

## 4 结论

由以上的理论和实际观测结果可以看到,采用软件实现相关检测获得被检测的ELF信号的幅值和相位信息,不仅可以充分发挥计算机的计算功能,节约大量的硬件成本,缩小ELF甚低频电磁接收机仪器主机的体积,采用此方法还能够检测到微小的甚低频电磁信号,具有较强的抗干扰能力。

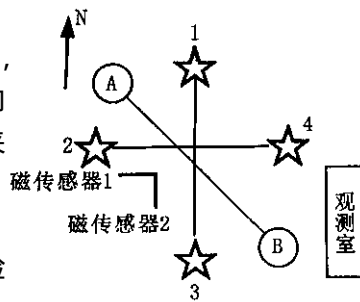


图5 静海地震台试验观测布极图

Fig. 5 Configuring in Jinghai station.

表3 静海地震台试验结果

供电 电流 /mA	理论计算结果 $V_1$				实际观测结果 $V_2$				相对误差%			
	电场/[ $\text{mV} \cdot \text{km}^{-1}$ ]		磁场/nT		电场/[ $\text{mV} \cdot \text{km}^{-1}$ ]		磁场/nT		电场		磁场	
	SN	EW	SN	EW	SN	EW	SN	EW	SN	EW	SN	EW
171.99					391.763	343.379	7.074	7.608				
56.818	129.422	113.438	2.337	2.514	127.865	111.180	2.309	2.481	1.203	1.990	1.197	1.317
23.997	54.661	47.911	0.987	1.062	56.254	49.209	1.014	1.090	2.914	2.710	2.729	2.687
12.946	29.489	25.847	0.532	0.573	29.666	25.992	0.536	0.576	0.602	0.561	0.568	0.508
2.755	6.276	5.501	0.113	0.122	6.432	5.687	0.117	0.125	2.493	3.382	3.063	2.627
1.389	3.163	2.773	0.057	0.061	3.186	2.901	0.060	0.064	0.709	4.634	4.697	3.783
0.697	1.588	1.392	0.029	0.031	1.637	1.468	0.030	0.032	3.074	5.448	5.112	2.586
0.149	0.339	0.297	0.006	0.007	0.409	0.463	0.007	0.007	20.797	55.732	9.469	0.961
0.028	0.064	0.056	0.001	0.001	0.069	0.059	0.002	0.001	8.298	6.024	41.560	10.377

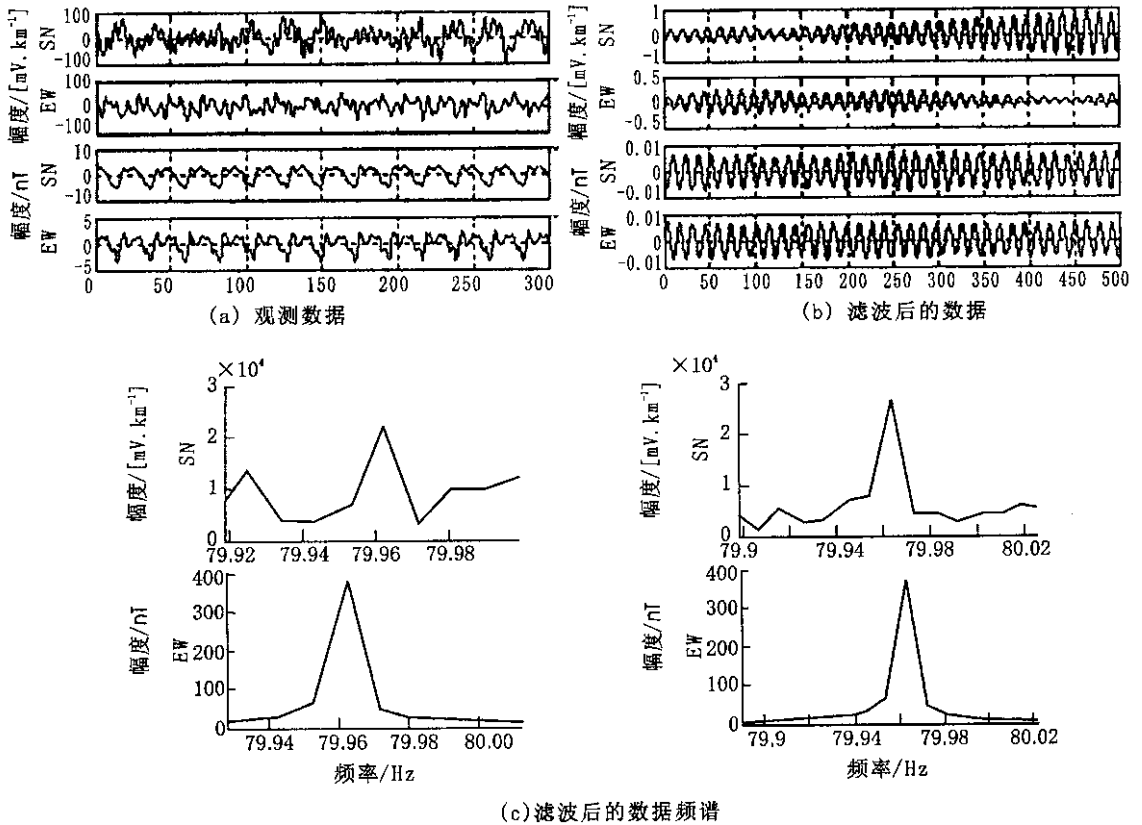


图6 静海台小电流供电( $I = 0.15 \text{ mA}$ )时的观测数据 滤波后的数据和频谱

Fig. 6 Waveforms of observation data and after-filter data ,spectrums of afet-filter data in small electric current ( $I = 0.15 \text{ mA}$ ) at Jinghai station.

[ 参考文献 ]

[ 1 ] 戴逸松. 微弱信号检测方法及仪器 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1994.  
 [ 2 ] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
 [ 3 ] 宗孔德, 胡广书. 数字信号处理 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1988.  
 [ 4 ] 邹鲲, 袁俊泉, 龚享铤. MATLAB6. X 信号处理 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

## STUDY ON APPARENT STRESS IN THE MIDDLE AND SOUTHERN PARTS OF SHAANXI PROVINCE

WANG Wei-dong<sup>1</sup>, ZHANG Yong-zhi<sup>1</sup>, SHAO Guang-zhou<sup>1</sup>,  
LIU Guo-hua<sup>1</sup>, ZOU Zhi-wei<sup>1</sup>, DI Xiu-ling<sup>2</sup>

( 1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang 'an University, Xi 'an 710054, China 2. Seismological Bureau of Shaanxi Province, Xi 'an 710068, China )

**Abstract** Using the digital seismic data recorded by xi 'an digital seismic network, the average value of apparent stresses of earthquakes in the middle and southern parts of Shaanxi province are calculated. The variation of the apparent stress before and after Jingyang M<sub>L</sub>5.2 earthquake and the relationship between apparent stress and magnitudes are then discussed.

**Key words** : Apparent stress ; Seismic moment ; Xi 'an digital seismic network

\*\*\*\*\*  
( 上接 342 页 )

## APPLICATION OF CORRELATION DETECTION TO ELF SIGNAL DETECTION

WANG Lan-wei<sup>1</sup>, ZHAO Jia-liu<sup>2</sup>, WANG Zi-ying<sup>1</sup>, WANG Yan-qiong<sup>2</sup>  
( 1. Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China ;  
2. Center for Analysis and Prediction, CEA Beijing 100036, China )

**Abstract** The application of correlation detection method to testing the signal amplitude of Extremely Low Frequency( ELF ) with some software in research of ELF Electro-magnetic Receiver is introduced. The theoretical calculate result and practical observation results at two stations are given also.

**Key word** Extremely Low Frequency ; Signal detection ; Correlation detection ; Signal amplitude