

黄显良, 戚浩, 郁建芳, 等. Loran-C 信号中直达波与反射波的提取方法研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(4): 0662-0666. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0662

HUANG Xian-liang, QI Hao, YU Jian-fang, et al. A Study on the Extraction Method of Direct Wave and Reflected Wave in Loran-C Signal[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 0662-0666. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0662

Loran-C 信号中直达波与反射波的提取方法研究^①

黄显良^{1,2}, 戚浩^{1,2}, 郁建芳^{1,2}, 谢石文^{1,2}, 王琐琛¹, 杨波¹, 夏仕安^{1,2}

(1. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230031; 2. 大别山地震监测预报实验场, 安徽 六安 237001)

摘要: Loran-C 信号中直达波和反射波到时差的提取是利用其进行测距的关键所在。通过分析 Loran-C 信号实测波形与理论波形的特征, 认为两者所包含的直达波信号一致。基于此特征, 通过波形相减的方法从实测 Loran-C 信号中剔除理论直达波信号, 并结合互相关方法求解出直达波和反射波的到时差。

关键词: Loran-C 信号; 到时差; 互相关

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)04-0662-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0662

A Study on the Extraction Method of Direct Wave and Reflected Wave in Loran-C Signal

HUANG Xian-liang^{1,2}, QI Hao^{1,2}, YU Jian-fang^{1,2}, XIE Shi-wen^{1,2},

WANG Suo-chen¹, YANG Bo¹, XIA Shi-an^{1,2}

(1. Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, Anhui, China;

2. Dabieshan Earthquake Experiment Field, Lu'an 237001, Anhui, China)

Abstract: Determining the difference in arrival time between direct waves and reflected waves in the Loran-C signal is crucial for effectively using it for ranging. Based on the analysis of waveform characteristics of the measured waves and theoretical waves in Loran-C signal, it is considered that the direct wave signal included in the measured Loran-C signal is consistent with that in the theoretical signal. Therefore, the theoretical direct wave signal can be removed from the measured Loran-C signal via waveform subtraction, then the difference in arrival time between direct waves and reflected waves can be calculated by using cross-correlation method.

Key words: Loran-C signal; arrival time difference; cross-correlation

0 引言

国际上几十年的观测研究表明, 地质学、地球物

理学和地球化学等多种地震前兆表现中, 电磁异常的反应是最敏感的。多年的观测实践与大量的震例也证明了这种监测原理的正确性和监测方法的实效

^① 收稿日期: 2017-07-07

基金项目: 地震科技星火计划(XH15021); 安徽省自然科学基金面上项目(1708085MD93); 中央引导地方专项资金科技惠民项目(2016080802D117)

作者简介: 黄显良(1972-), 男, 安徽东至人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震活动性研究、数字地震学研究、地震监测管理等工作。
E-mail: hxl818@sina.com.

通信作者: 戚浩(1980-), 男, 安徽淮北人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震资料分析处理和地震台网技术系统维护工作。
E-mail: qihao8888@126.com.

性。越来越多的研究人员认为,电磁场观测可能成为实现短临地震预测的突破点。最新研究表明,地震前信号在明暗界线时间(早晨和傍晚)处有显著变化,并且早晨变化发生在明暗界线时间之前几小时,而傍晚则错后几小时。这意味着地震前后几天低电离层甚低频信号出现的白天时间被延长,并且理论计算表明地震前低电离层更低。

地震预报在专业上被划分为长、中、短、临 4 类,其中人们最关心的是短临预报,因为它直接关系着万千性命的安危。项目通过对电离层 D 层的监测,分析低空电磁场变化与地下介质运动的关系,尝试寻找其与地震活动的对应规律。研究拟利用远距离传输的闪电 VLF 信号和海军 Loran-C 信号波形反演电离层 D 层密度廓线,深入揭示大空间尺度电离层 D 层特征及时空变化;分析观测网及附近区域地震发生前后电离层各参数的变化情况,以期地为地震短临预报提供丰富的数据和有效的建议。

常用 Loran-C 信号的单个脉冲是由 100 kHz 载波对钟形脉冲调制而成,其形态为钟型脉冲。在测量过程中所需要的主要参数是直达波和反射波之间的时间差。但是实际接收的信号中常常包含了噪声信号,而在有噪声干扰的情况下,对直达和反射信号进行分离就变得十分困难。但是对该信号处理方

$$i(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau_d \\ A(t - \tau_d) \exp[-2(t - \tau_d)/65] \sin(0.2\pi t + P_c) & \tau_d \leq t \leq 65 + \tau_d \end{cases} \quad (1)$$

其中: A 为天线电流峰值幅度的归一化值,单位为安培(A); t 为时间,单位为 μs ; τ_d 为包周差(ECD),单位 μs 为相位编码,等于 0 或者 π 弧度。其波形图如图 1 所示。

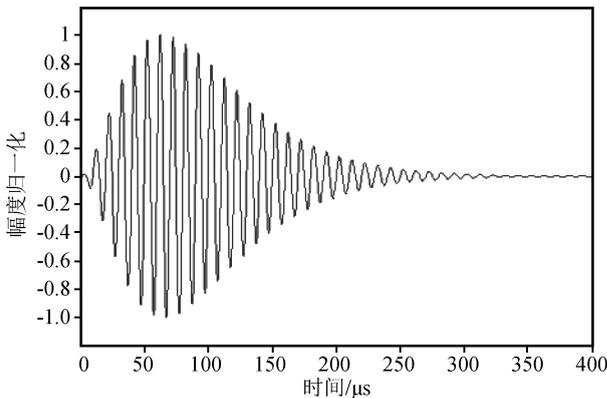


图 1 Loran-C 理论波形

Fig.1 The theoretical waveform of Loran-C signal

脉冲组是指每个 Loran-C 地面发射台在每个重复周期中发射的一组脉冲。Loran-C 信号以多脉

法的研究却有十分重要的现实意义。笔者基于实际接收的 Loran-C 信号,采用波形相减的方法对直达波和反射信号进行分离。

1 Loran-C 信号

1.1 理论信号

Loran-C 系统是一种脉冲-相位双曲线无线电导航系统。它由 1 个主台和 2~4 个副台组成一个导航台链,每个台站由时频系统、发射系统和同步监控系统等多个部分组成。同一台链的各台具有相同的组重复周期,而不同的台链有不同的组重复周期。在同一台链内,采用时间分割的方式依次发射主台和各副台信号。系统的工作频率是 90~110 kHz。首先通过脉冲包络重合进行粗测,然后用脉冲载波相位重合进行精测,从而获得被测点的位置。

Loran-C 信号的单个脉冲是由 100 kHz 载波对钟形脉冲调制而成,钟形脉冲的前沿经过严格控制,具有陡峭的上升特性;其后沿与各发射机和发射天线的特性有关,且有一定的要求。采用这种特殊设计的目的是为了提高测量精度和抗天波干扰能力。脉冲波形是以发射天线底部的电流波形定义的,天线底部电流 $i(t)$ 的时域表达式为:

脉冲组形式发射,每个 Loran-C 台链的副台都发射 8 个为一组的脉冲信号,每个单脉冲的延续时间约为 260 μs ,其脉冲间隔为 1 ms。主台除发射与副台性质相似的 8 个为一组的脉冲信号之外,还发射第 9 个脉冲,第 8 个和第 9 个脉冲的间隔为 2 ms,如图 2 所示。主台增发的第 9 个脉冲仅用于识别主副台或故障、同步超时告警,不做导航信号使用。

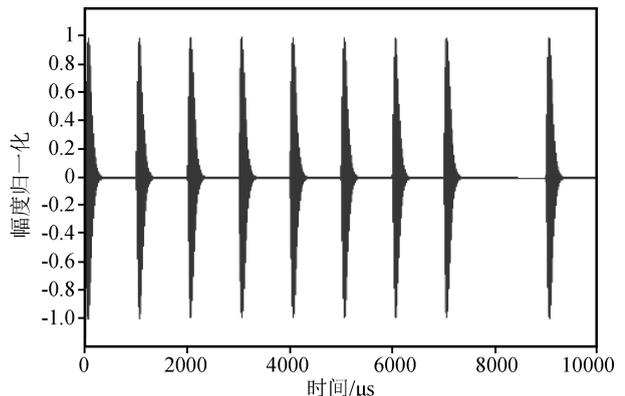


图 2 主台脉冲组结构

Fig.2 The pulse group structure of main station

1.2 实测信号

图1和图2给出的是一组标准 Loran-C 信号,而实测 Loran-C 信号包含直达波、反射波和噪声成分,其中直达波能量最强,容易识别,反射波能量较弱,易被淹没在噪声中,不易识别,如图3所示。实测信号的形态和标准信号一致,其最大振幅 A_1 的

到时位置 t_1 即为直达波振幅最大位置。

2 信号处理

2.1 处理方法

从原始 Loran-C 波形信号中减去(剔除)理论 Loran-C 波形信号,相当于将能量较强的直达波“滤

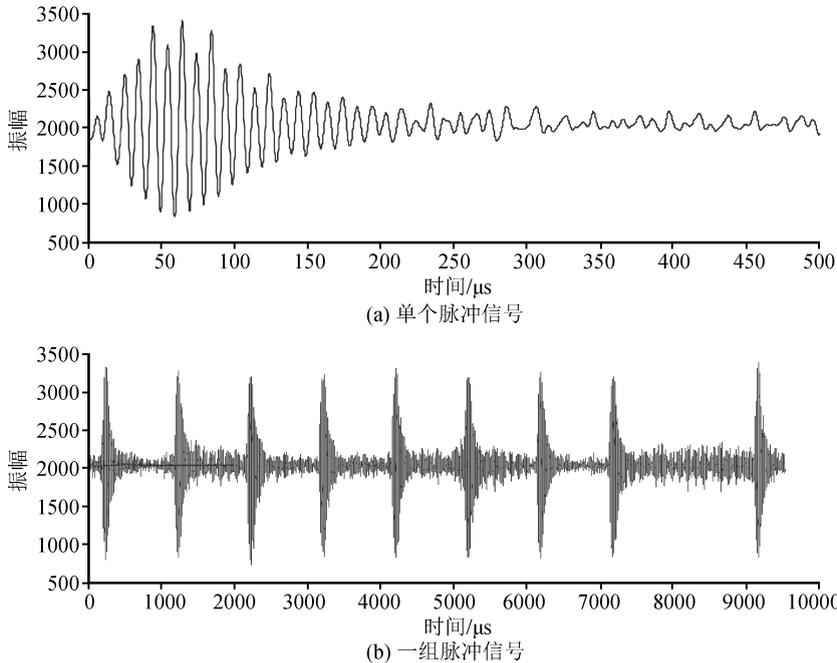


图3 实测 Loran-C 脉冲信号

Fig.3 The measured Loran-C pulse signal

掉”,余下的波形信号主要包含反射波和噪声,此时反射波能量最强,取此时信号振幅的最大值 A_2 ,其所在位置即为反射波振幅最大值到时 t_2 。

同时因为 Loran-C 信号的直达波和反射波除能量不同外,周期、包络等其他属性全部一致,因此取其振幅最大值所在位置时间差即为两者走时之差,即

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2)$$

按照搜索算法的思路“剔除”直达波,主要是将理论波形和实测波形的起点位置对齐。首先将理论波形移动到和实测波形相位基本重合的位置,得到一个起始点位置变化范围。在此范围内通过搜索算法,对理论波形和实测波形逐个进行差值运算,将所得差值均值最小时的时间视为起点对齐时间,认为此时理论波形和实测波形吻合最好。这一过程可通过计算机编程完成。

2.2 处理结果

用原始记录的 Loran-C 信号数据减去理论的 Loran-C 信号,这样做相当于消去了记录信号中直达波的部分,剩余的部分就是反射波和背景噪声的信

号。研究剩余的部分可以求出所需要的直达波-反射波的到时差。为了得到这一“剩余的部分”,需要对理论波形进行调整,调整的最终目的是使得理论信号和实测信号具有相同的起点位置。作者通过搜索算法将理论波形与实测波形起点对齐。图4包含了实测波形、理论波形及相减后波形的单个 Loran-C 脉冲。

在实测波形和理论波形相减之前需要将实测和理论波形的起点保持一致,相减后的曲线(蓝色)振幅明显减小。分析相减后曲线的极大值出现时间即可得到反射波极值出现的时间(t_2)。图5是实测波形和理论波形相减后所得波形。

分析图5可知,“剔除”直达波之后的 Loran-C 信号中包含了反射波和噪声。相比于噪声,反射波的能量更大,因此可以认为“剔除”直达波之后波形中的极值点即为反射波的极值点。图5中在 $500 \mu\text{s}$ 附近出现了极值,但要计算出到时差 Δt ,需要找出精确的极值出现时间。通过剔除直达波后的波形和原始波形互相关可以求出精确的极值出现时间,这一目标可通过程序实现(图7)。

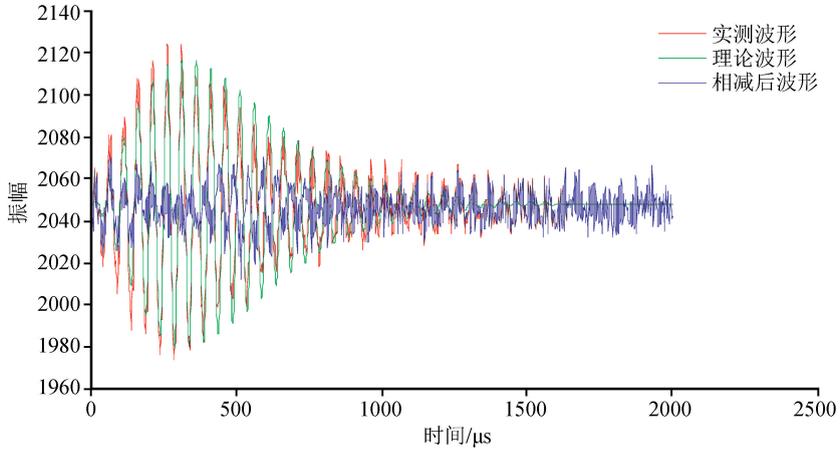


图 4 包含了实测波形、理论波形及相减后波形的单个 Loran-C 脉冲
 Fig.4 The single Loran-C pulse waveform containing measured waveform, theoretical waveform, and pulse waveform after subtraction

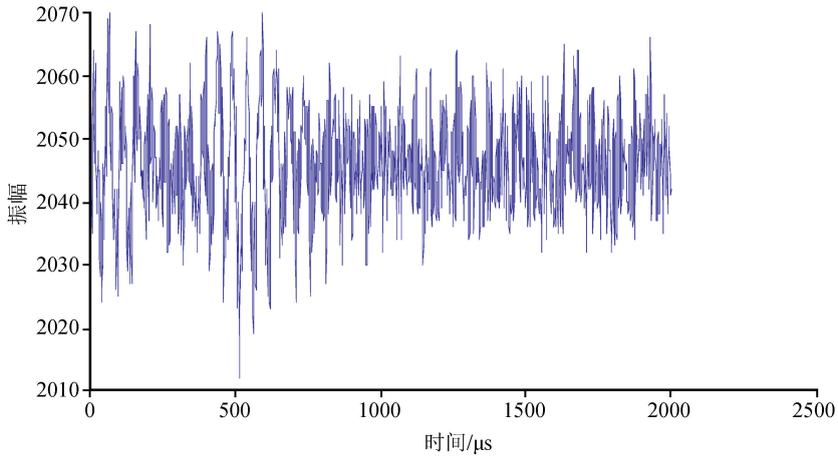


图 5 剔除直达波后的实测 Loran-C 波形

Fig.5 The measured Loran-C waveform after removing the direct wave

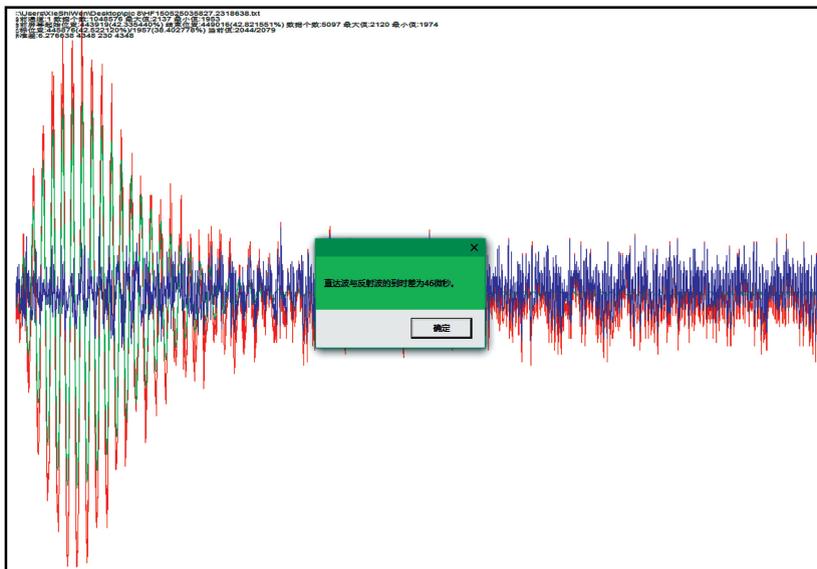


图 6 程序实现界面

Fig.6 Program realization interface

3 结 论

本文通过对理论和实测 Loran-C 信号进行特征分析,认为实测 Loran-C 信号的直达波特征和理论 Loran-C 完全一致。因此提出了采用波形相减的方法求解直达波、反射波到时差的思路。处理过程中,通过 VC++ 程序语言将二者起始位置对齐并寻找振幅极值点对应的的时间。该方法可以快速准确地计算出到时差 Δt ,这对于使用 Loran-C 系统测距及导航有着重要意义。

参 考 文 献 (References)

- [1] Bickel J, Ferguson J, Stanley G. Experimental Observation of Magnetic Field Effects on VLF Propagation at Night[J]. Radio Science, 1970, 5: 19-25.
- [2] Charles Kitchin, Lew Counts. A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers[M]. Analog Devices Inc, 2006.
- [3] Evans J. Theory and Practice of Ionosphere Study by Thomson Scatter Radar[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(4): 496-530.
- [4] M Hayakawa. VLF/LF Radio Sounding of Ionospheric Perturbations Associated with Earthquakes [J]. Translated World Seismology, 2007, 7(7): 1141-1158.
- [5] Hargreaves J K. The Solar-terrestrial Environment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [6] Inan U S, Cummer S A, Marshall R A. A Survey of ELF and VLF Research on Lightning-ionosphere Interactions and Causative Discharges[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: A00E36. doi: 10.1029/2009JA014775, 2010.
- [7] Kumen Blake. Driving Capacitive Loads With Op Amps[R]. Microchip Technology Inc, 2003.
- [8] Mathews J, Breakall J, Ganguly S. The Measurement of Diurnal Variations of Electron Concentration in the 60-100 km Ionosphere at Arecibo[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1982, 44: 441-448.
- [9] Morfitt D. Effective Electron Density Distributions Describing VLF/LF Propagation Data[R]. Research and Development Report, 1977.
- [10] Sechrist C. Comparisons of Techniques for Measurement of D-region Electron Densities[J]. Radio Science, 1974, 9: 137-149.
- [11] 曹正文, 罗锐, 朱晖, 等. 对罗兰 C 信号处理方法的探讨[J]. 导航, 2003, 39(2): 78-80.
CAO Zheng-wen, LUO Rui, ZHU Hui, et al. Discussion on Loran-C Signal Processing Methods[J]. Navigation, 2003, 39(2): 78-80. (in Chinese)
- [12] 陈建峰. 罗兰 C 信号处理算法的研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2009.
CHEN Jian-feng. Research on Loran-C Signal Processing Algorithm[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2009. (in Chinese)
- [13] 刘睿, 朱银兵, 张婷. 中国南海区域罗兰 C 单台链双曲线的 GDOP 研究[J]. 船电技术, 2011, 31(1): 30-33.
LIU Rui, ZHU Yin-bing, ZHANG Ting. Research on Loran-C South China Sea Region Single Chain of Hyperbola GDOP [J]. Marine Electric and Electronic Engineering, 2011, 31(1): 30-33. (in Chinese)
- [14] 石云中. 基于 DDS 技术的 Loran-C 信号发生器的设计与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
SHI Yun-zhong. Design and Implementation of Loran-C Signal Generator Based on DDS Technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [15] 吴从伟, 宁民. 数字信号处理技术应用及研究[J]. 导航, 2003, 39(2): 93-99.
WU Cong-wei, NING Min. Application and Research of Digital Signal Processing Technology [J]. Navigation, 2003, 39(2): 93-99. (in Chinese)
- [16] 熊伟. Loran-C 数字信号处理的关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
XIONG Wei. Research on the Key Technologies of Loran-C Digital Signal Processing[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)