

# 小波变换在核爆电磁脉冲信号识别中的应用<sup>1</sup>

张旭荣 张妙兰 刘新中

(中国科技大学研究生院 北京 100039)

**摘要** 从大量的雷电干扰中识别出核爆电磁脉冲信号是核爆电磁脉冲探测的关键技术。传统的识别方法利用傅里叶变换的方法在频域范围内选择六个特征值,联合对信号进行逐一筛选。本文利用小波变换良好的时频局部化特性对两类信号分别进行了研究,只需利用三个特征值就可达到以前的识别精度,取得了较好的识别效果。这有可能使电磁脉冲探测手段进入核监测领域。

**关键词** Mallat 算法, 特征选择, 识别域

**中图分类号** TN911.7

## 1 引言

核爆信号的探测手段有多种,其中电磁脉冲探测占有很重要的地位。早在 50 年代,美苏专家就曾在日内瓦召开过有关电磁脉冲理论方面的研究会议,但由于雷电电磁脉冲的干扰,使识别遇到了很大的困难,许多国家相继停止了这方面的研究<sup>[1]</sup>。

我国对核电磁脉冲的研究始终处于世界的前列。几十年来,我们先后研制了第一代和第二代电磁脉冲探测设备。为了更好地进行核监测和核打击效果的侦察,对电磁脉冲手段的深入研究仍具有十分重要的战略意义。

传统的软件识别方法为归一谱特征值筛选法,即在傅里叶变换的基础上提取六个特征值,分别计算它们的识别域来对信号进行逐一筛选。由于傅里叶变换的局限性,使得特征值的误判率比较高,要想获得高的可靠性指标必须用多个不相关的特征参数来保证,这样计算量非常大,识别过程必然复杂。

小波分析或多分辨分析近年来在法、美、英等国成为众多学科共同关注的热点,它优于傅里叶变换的地方是,它在时域和频域同时具有良好的局部化性质<sup>[2]</sup>。因此将小波变换应用于核爆与雷电电磁脉冲信号的识别领域中,将会达到良好的效果。

## 2 Mallat 算法在核爆和雷电信号识别中的应用

**2.1 Mallat 算法的应用** 利用 Daubechies 小波基  $N=2$  时的小波函数分别对两类信号进行分析<sup>[3]</sup>,按 Mallat 算法将信号分解成了不同的频率通道成分。

**2.2 特征值的选择** 通过对两类电磁脉冲信号小波变换的波形图进行分析观察,发现有以下几个特点:(1)在某些频率通带内,核爆信号的极大值和极小值个数通常在固定的范围内,而雷电信号则或多或少。当分辨率为  $2^3$  时,这一特征变得尤为明显。(2)在小波域下核爆信号的纵向对称性比雷电信号的好,当分辨率为  $2^5$  时,核爆信号的第二个大于 0.2 倍最大峰值的极大值与其下一个极值的比值趋于 1,雷电信号则不具备这一特点。(3)特征值  $\Delta t$  表示  $0 \sim 400\mu\text{s}$  范围内最大峰值对应的时间值与第二大峰值对应的时间值的差。核爆信号经小波变换后,峰值变化到某一程度时所持续的时间为一固定值,而雷电信号则或长或短,当分辨率为  $2^1$  时,这一特征最为明显。

## 3 经验算法的讨论和结果分析

在传统的识别方法中,根据爆炸当量的不同,可以把核爆信号分成若干域,对不同区域进行分别讨论。由于  $Q_1$  域具有实用意义,因此作者仅对这一区域做重点讨论。

**3.1 经验值的讨论** 所谓经验值的产生过程是这样的:根据计算和观察发现,核爆信号的特征值的数值范围通常相对集中在一个区域内,我们可以暂不考虑它的置信区间,仅

<sup>1</sup> 1997-11-11 收到, 1998-06-05 定稿

将它们的最大值和最小值作为识别区域的边界值。实践证明,这样做具有一定的置信度。将这一方法引用到利用小波分析进行的研究中,并与 FFT 方法进行比较,可以得出一些有意义的结论。

表 1 为经傅里叶变换后核爆信号 ( $Q_1$  域) 在频域下五个特征值的取值范围,以及将上述特征值范围作为经验识别域对 100 个雷电电磁脉冲信号进行逐一筛选的识别错误率。其中,  $N_i$  为大于半峰值的极大值个数,  $K_{ij1}$  为归一谱前沿斜率,  $K_{ij2}$  为归一谱后沿斜率,  $L_i$  为归一谱偏斜,  $V_i$  为归一谱峭度。

表 1 频域下核爆信号的特征值取值范围

	$N_i$	$K_{ij1}$	$K_{ij2}$	$L_i$	$V_i$
特征值范围	1	0.198809~0.320221	-0.109790~ -0.085470	1.821068~2.082530	6.060271~7.783828
识别错误率	88%	20%	17%	6%	6%

由于这五个特征值是互不相关的,其识别可靠性可用下式表示:

$$P = 0.88 \times 0.2 \times 0.17 \times 0.06 = 0.9998. \quad (1)$$

利用 Daubechies  $N=2$  时的小波基分别对  $Q_1$  域的核爆电磁脉冲信号和 100 个雷电电磁脉冲信号进行分析,得出核爆电磁脉冲信号在不同分辨率下的取值范围,以及雷电电磁脉冲信号在不同分辨率下的经验识别错误率。由于在不同的分辨率下,三个特征值的识别精度均不相同,我们可以取不同分辨率下的错误率的最小值,从而也就决定了应该在哪一个分辨率下选取三个特征值,如表 2。

表 2 不同分辨率下特征值的错误率

	$N_i$	$n$	$\Delta t$
分辨率	$2^3$	$2^5$	$2^1$
核爆取值范围	5~6	-1.185908~ -1.430734	33~50
雷电识别错误率	6%	2%	13%

通过对三个特征值的分析,可以看出,它们在小波域下的工程意义是互不相关的,根据概率论的相关知识,系统的识别可靠性可用下式描述:

$$P = 1 - P_{N_i} * P_n * P_{\Delta t} = 1 - 0.06 \times 0.02 \times 0.13 = 0.9998. \quad (2)$$

将小波分析后的数据结果与傅里叶变换后的结果进行比较,得到:利用小波理论对信号进行分析得到的识别可靠性,与 FFT 方法利用五个特征值计算出来的识别可靠性相同。

### 3.2 小波变换在该应用中的结果分析

#### 3.2.1 小波分析特性在该应用中的体现

(1) 小波变换具有良好的时频局部化特性 小波域反应了信号在一定的频率通道内的场强特征,既包含了时域特性又包含了频域特性。在对信号进行小波分析后,我们寻找到的三个特征值中,有些特征值的物理意义与时域中的某些特征值相似。如特征值  $n$ ,它表示在某一频率通道内,从零时刻算起,第一个大于 0.2 倍极大值的峰值与其后第一个极小峰值的比值。特征值  $\Delta t$ ,表示到达第一极大峰值与到达第二极大峰值的时间差。可见小波域下的特征值同时具有明显的时域特性和频域特性。

(2) 小波变换的变焦距特性 有限正交小波分解的基本操作是滤波处理,每一步分解都使时间分辨率减半,而频率分辨率倍增,它们的乘积保持不变,该分解操作可以重复进行以便获得期望的频域细节<sup>[3]</sup>。

每个特征值在不同的分辨率下,具有不同的识别错误率,要想得到高的识别可靠性指标,必须在不同的分辨率下提取不同的特征值,这就充分显示了小波分析的变焦距特性。通过这一特性,我们可以把信号任意放大在任意区间,达到良好的识别效果。

### 3.2.2 小波分析下核爆和雷电电磁脉冲信号的物理特性分析

在对核爆和雷电电磁脉冲信号进行小波分析时,从寻找的特征值中可以看出核爆与雷电电磁脉冲信号的源区特性区别及其他特性。

(1) 特征值  $N_i$ : 即为  $0\sim 400\mu\text{s}$  范围内的极值个数。从实验的数据结果看出,核爆电磁脉冲在某一特定频率范围内具有特定值,而雷电电磁脉冲信号则不具有这一特征。从两种信号的源区特性来看,核爆电磁脉冲信号在起始部分有一个反映瞬发  $\gamma$  脉冲特点的窄脉冲<sup>[2]</sup>。而雷电的近区信号与其回击次数密切相关,当闪电出现一次回击时,信号为一单脉冲,当出现二次回击或多次回击时,脉冲的个数也就不同。由于这两类信号在地-电离层传播时,受到地波和天波的影响,使信号波形产生叠加。当核爆信号传到中远区时,远区天波的影响使信号波形的准半周个数增多。涉及到雷电电磁脉冲信号,源区特征为一个或多个独立脉冲,由于地波和天波的影响,雷电信号产生波形上的叠加,也使极值个数增加。

(2) 特征值  $n$ : 即从零时刻起,第二个大于 0.2 倍最大峰值的极大值与其下一个最小极值的比值。其物理意义为信号在某一频带范围内其局部场强振荡的对称性。由于核爆电磁脉冲信号源区呈光球状,其源电流具有纵向球对称分布。而雷电电磁脉冲信号源区的树枝状分布使得这种对称特性不明显。

(3) 特征值  $\Delta t$ : 即为信号在某一频带范围内,到达最大峰值与到达第二大峰值的时间差。由于电磁脉冲信号是地波与各跳天波的合成,对于核爆信号来说,一跳天波比二跳天波相对地波的延迟时间短,随着传播距离的变化,  $\Delta t$  的大小必然发生变化。因此,可以利用这一特征值,筛选掉那些与核爆电磁脉冲信号产生距离相似的雷电电磁脉冲信号。而与核爆事件发生在同一时间、同一距离上的雷电时间是有限的,因此该特征值的错误率具有可信度。

## 参 考 文 献

- [1] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [2] 刘新中. 核爆与天电脉冲波的识别方法及其可靠性估计. 核爆远区探测, 北京: 解放军出版社, 1985.
- [3] Daubechies I. Wavelets Transform: A Method for Time-Frequency Location, Vol.1, ED. by S.Haykin, 1991.

## STUDIES OF RECOGNITION METHODS OF NUCLEAR AND LIGHTNING IMPULSE SIGNALS WITH APPLICATIONS OF WAVELET TRANSFORM

Zhang Xurong    Zhang Miaolan    Liu Xinzong

(Graduate School, University of Science and Technology of China, Beijing 100039)

**Abstract** Recognizing of nuclear impulse from amounts lightning disturbance is the critical technology of nuclear electro-magnetism detection. The traditional algorithms based on Fourier transform require six parameters in frequency field. These methods also utilize the selection procedure of its parameters one by one to obtain high recognition probability. In this paper the superior partial properties in time and frequency fields of wavelet transform are used to classify these two kinds signals. The results are that only requiring three parameters, this algorithm can reach high recogniton probability. This method may introduce electro-magnetism detection to the field of nuclear monitor in the future.

**Key words** Mallat algorithm, Character parameter selection, Recognition field

- 张旭荣: 女, 1970 年生, 工程师, 从事专业为信号与信息处理.
- 张妙兰: 女, 1941 年生, 副教授, 从事专业为信号与信息处理.
- 刘新中: 男, 1941 年生, 高级工程师, 从事专业为核爆侦察与探测.