

应用小波包识别宁夏及邻区的地震和爆破^{*}

曾宪伟^{1,2}, 赵卫明¹, 盛菊琴¹, 莘海亮²

(1. 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要: 将小波变换理论应用于宁夏及邻区的地震和爆破的识别。利用小波包变换系数与射线能量的关系, 计算了射线所包含的低频成分和低频成分的能量之比。结果表明, 当分解尺度 $j=1$ 时, 对于地震信号, $\ln(\Omega_0^1/\Omega_1^1)$ 的值一般小于 3。对于爆破信号, $\ln(\Omega_0^1/\Omega_1^1)$ 的值一般大于 3。

关键词: 小波包; 变换系数; 能量; 地震; 爆破; 识别

中图分类号: P315 TD235 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)02-0142-07

0 引言

自 20 世纪 50 年代以来, 国内外在天然地震与非天然地震识别方面进行了广泛而深入的研究, 特别是对核爆破与天然地震的识别, 提出了很多有效的识别判据 (吴忠良等, 1994)。由于经济建设的发展, 小当量爆破事件日益增多, 但目前并未进行深入研究。随着我国数字化地震台网的建成, 地震监控能力进一步提高, 可监测到的爆破事件显著增多, 若不能正确、快速识别爆破事件, 将直接影响到地震的分析预报工作。因此, 对如何识别天然地震与爆破显得尤为重要。在实际工作中, 人们通常以对波形特征的直观分析来识别爆破事件, 本文中我们采用小波变换方法对宁夏及邻区的地震和爆破进行了分析识别, 以期提高识别的有效性。

小波分析是 20 世纪末发展起来的一种新的时频分析方法, 现已广泛应用于数字信号处理领域 (杨选辉等, 2005), 在地球物理信号处理方面也展现出了广阔的应用前景。在常用的 Mallat 二进小波分析中, 信号在频率域按二分法向低频方向进行分解, 但高频部分也包含了某些细节的信息, 从中寻找信号的细节特征有时也是必不可少的。而小波包分解法不仅对信号的低频部分进行分解, 对信号的高频部分也进行二进方法分解, 也就是说, 小波包分解法可以把信号按频带分解得更细,

从而提高了信号在整个频带内的分辨能力。小波分解在处理像爆破信号和地震信号这样的非稳态信号时, 有着独特的优势 (曹晖等, 2004)。笔者采用小波包变换这一工具, 对宁夏及邻区地震和爆破的识别进行了研究。

1 理论与方法

1.1 小波分解与小波包分解

对信号进行小波变换, 即实现信号的小波分解, 小波分解仅对信号的低频部分进行分解。图 1 中粗实线为信号空间 S 在 $j=4$ 尺度下进行的小波分解示意图。随着分解尺度的增加, 低频信号按频带分解越来越细, 如果对信号进行 m 层小波分解, 则可得到 $m+1$ 个分解信号。

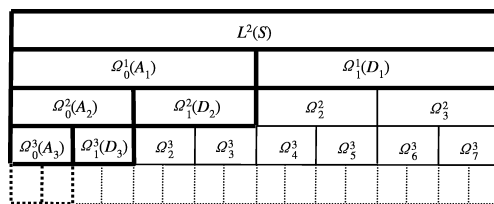


图 1 小波 (包) 信号空间分解示意图

小波包分解是小波分解的一个发展, 分解过程中不仅对分解得到的近似信号进行再分解, 对分解得到的细节信号也进行二进方法分解, 所以小波包分解增加了信号的细化程度, 使得信号的细节特征更加明显。图 1 为信号空间 L^2 在 $j=4$ 尺

* 收稿日期: 2007-08-21.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划 (2006BAC01B03-04-02) 资助。

度下进行的小波包分解示意图。 $A(i=0, 1, 2, \dots)$ 表示小波分解下的近似 (低频) 信号空间; $D_i(i=0, 1, 2, \dots)$ 表示小波分解下的细节 (高频) 信号空间; $\Omega_n^j(i=0, 1, 2, \dots; n=0, 1, 2, \dots, 2^j-1)$ 表示小波包分解下的信号空间。随着分解尺度的增加, 信号在整个频带内分解得更细, 如果对信号进行 m 层小波包分解, 则可得到 2^m 个分解信号, 且各分解信号频段互不重叠。

1.2 小波包变换系数与信号能量的关系

连续小波变换能量守恒公式为

$$\int_{\mathbb{R}} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbb{R}^2} \left| \int_{\mathbb{R}} W_f(a, b) \right|^2 \frac{da db}{a^2} \quad (1)$$

式中 $C_\psi = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega$, 把公式左边的积分看作信号的能量, 则 (1) 式就可表示小波谱与信号能量之间的关系。

在尺度 m 对应频带内地震波的能量和 (曹晖等, 2004) 为

$$\int_{\mathbb{R}} |Y^m(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2^m} \sum_k \Delta W_m(b_k)^2. \quad (2)$$

为了与前面的书写符号一致, 将 (2) 式写为

$$\int_{\omega_j} |F^j(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2^j} \sum_k \Delta b \left[W_f(b_k) \right]^2. \quad (3)$$

取规范正交小波包基为 $\left\{ 2^{j/2} W_n(2^j t - k), n \in \mathbb{Z}_+, k \in \mathbb{Z} \right\}$ (李弼程等, 2003), 则以该小波包基为基函数, 信号 $f(t)$ 可展开为

$$f(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}_+} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_k^{n,j} 2^{j/2} W_n(2^j t - k). \quad (4)$$

式中 $C_k^{n,j} = \int_{\mathbb{R}} f(t) 2^{j/2} \overline{W_n(2^j t - k)} dt$. 此时, (3)

式可变为

$$\int_{\omega_n} |F^n(\omega)|^2 d\omega = \sum_k \left[C_k^{n,j} \right]^2. \quad (5)$$

即某频带内的小波包变换系数的平方和等于

该频带内的信号能量。

1.3 计算方法

首先将信号按二进尺度在频域中进行小波包分解, 得到信号的频谱分布, 然后计算各频带内谱系数的平方和, 以表示信号在该频带范围内所携带的能量, 再以某个频带内的能量为基准, 计算信号在其它频带内的能量与基准频带能量之比 (杨选辉等, 2005)。

2 资料选取与处理

我们选取宁夏数字地震台网记录到的地震和爆破事件进行研究。由于爆破位置多集中在台网边缘的山区, 其震中相对比较固定, 而宁夏测震台网目前仅有 7 个数字台站, 可收集到的爆破事件的数量随震中距的变化差别很大。同时, 由于爆破当量一般不大, 且产生的波主要在地表传播, 传播过程中衰减较快, 因此震中距越大, 记录也越不清晰, 不便于研究。为了方便比较, 我们选取震中距在 55 km 左右的地震和爆破事件, 事件参数取自宁夏地震观测报告^①, 事件记录选取信噪比较高的台站记录。记录采样率为 50 Hz, 研究数据取 P 波段垂直向记录的 256 个点, 选取的震中距可以满足所取数据均在 P 波段内。

采用 11 阶 Daubechies 小波基, 对地震记录进行小波包分解, 当尺度 $j=1$ 时, 以 $\Omega_0^1 \sim \Omega_1^1$ 表示 0 ~ 12.5 Hz 频带内的能量与 12.5 ~ 25 Hz 高频带内的能量之比; 当尺度 $j=2$ 时, 以 $\Omega_0^2 \sim \Omega_1^2$ 表示 0 ~ 6.25 Hz 频带内的能量与 6.25 ~ 12.5 Hz 频带内的能量之比, 以 $\Omega_0^2 \sim \Omega_2^2$ 表示频带 0 ~ 6.25 Hz 内的能量与 12.5 ~ 18.75 Hz 频带内的能量之比, 以 $\Omega_0^2 \sim \Omega_3^2$ 表示 0 ~ 6.25 Hz 频带内的能量与 18.75 ~ 25 Hz 频带内的能量之比。

3 分析处理结果

3.1 地震事件分析处理结果

选取震中距在 50 ~ 70 km 范围内具有良好台站记录的 28 个地震事件, 地震目录取自宁夏地震观

^① 宁夏地震局. 2007. 宁夏地震观测报告.

测报告^① (表 1)。对表 1 中的地震事件 P 波段垂直向记录的 256 个数据点采用 11 阶 db 小波基进行尺度 $j=1$ 和 $j=2$ 的小波包分解, 并分别计算相应的 Ω_0^1/Ω_1^1 、 Ω_0^2/Ω_1^2 、 Ω_0^2/Ω_2^2 、 Ω_0^2/Ω_3^2 的值, 计算结果见表 2。可以看出, 对地震信号进行尺度 $j=1$ 的小波

包分解时, Ω_0^1/Ω_1^1 的值均小于 25 或除第 25 号地震事件外均小于 ϵ ; 对地震信号进行尺度 $j=2$ 的小波包分解时, Ω_0^2/Ω_2^2 的值除第 24 号地震事件外均小于 ϵ , Ω_0^2/Ω_3^2 的值均小于 149 或除第 25 号地震事件外均小于 ϵ 。

表 1 地震事件目录

序号	发震时间	震中位置			深度 / km	震级 (M _L)	台站名称	震中距 / km
	年—月—日 时 : 分	北纬 / (°)	东经 / (°)	地点				
1	2003—10—25 20 : 13	38. 03	106. 27	宁夏灵武	21	1. 6	银川台	70
2	2003—10—26 21 : 20	38. 15	106. 07	宁夏青铜峡	26	1. 7	银川台	53
3	2003—10—30 13 : 46	38. 05	106. 28	宁夏灵武	14	2. 1	银川台	70
4	2003—11—01 20 : 37	38. 15	106. 05	宁夏青铜峡	29	2. 2	银川台	53
5	2003—11—27 18 : 01	39. 07	106. 02	内蒙古阿拉善左旗	20	1. 9	银川台	52
6	2004—01—24 09 : 02	39. 10	106. 00	内蒙古阿拉善左旗	15	2. 0	银川台	54
7	2004—02—01 03 : 52	37. 28	105. 73	宁夏中宁	14	2. 0	中卫台	64
8	2004—02—23 08 : 43	38. 05	106. 32	宁夏灵武	14	2. 4	银川台	70
9	2004—03—12 07 : 27	36. 02	106. 32	宁夏固原	16	2. 6	泾源台	60
10	2004—04—20 00 : 30	38. 60	105. 63	宁夏中宁	10	2. 2	中卫台	50
11	2004—07—23 06 : 29	38. 15	106. 20	宁夏永宁	28	1. 8	银川台	56
12	2004—07—24 14 : 52	38. 15	106. 23	宁夏灵武	16	1. 7	银川台	57
13	2004—10—19 12 : 46	39. 10	106. 37	宁夏石嘴山	21	2. 5	银川台	67
14	2004—12—01 10 : 57	38. 07	106. 32	宁夏灵武	12	2. 5	银川台	67
15	2005—01—13 03 : 45	38. 15	106. 25	宁夏灵武	14	2. 2	银川台	59
16	2005—06—25 16 : 59	39. 12	106. 03	内蒙古阿拉善左旗	30	2. 1	银川台	58
17	2005—11—11 09 : 17	39. 10	105. 98	内蒙古阿拉善左旗	21	2. 3	银川台	55
18	2005—12—27 09 : 08	38. 95	106. 42	宁夏平罗	18	1. 8	银川台	57
19	2006—04—18 21 : 14	39. 00	106. 50	宁夏平罗	23	1. 9	银川台	67
20	2006—04—26 15 : 23	39. 03	106. 45	宁夏石嘴山	19	2. 1	银川台	67
21	2006—06—19 19 : 19	39. 15	106. 00	内蒙古阿拉善左旗	30	2. 1	银川台	61
22	2006—07—19 18 : 46	38. 87	106. 55	宁夏平罗	10	1. 5	银川台	62
23	2006—07—22 08 : 15	38. 10	106. 12	宁夏青铜峡	20	2. 0	银川台	65
24	2006—07—29 21 : 11	38. 18	106. 15	宁夏青铜峡	19	3. 7	银川台	51
25	2006—08—16 01 : 51	39. 15	105. 97	内蒙古阿拉善左旗	17	2. 3	银川台	60
26	2006—09—18 23 : 15	36. 07	106. 27	宁夏固原	30	2. 1	泾源台	65
27	2006—11—18 14 : 17	38. 22	106. 45	宁夏灵武	10	1. 9	银川台	63
28	2007—05—17 22 : 38	38. 13	106. 15	宁夏青铜峡	29	2. 2	银川台	59

3. 2 爆破事件分析处理结果

选取震中距在 50 ~65 km 范围内具有良好台站记录的 28 个爆破事件, 其中第 24 ~28 号事件为经过落实后确认的爆破, 第 1 ~23 号事件为测震分析人员对记录波形进行直观分析识别出的爆破, 爆破事件目录见表 3。与对地震事件的分析处理方法

相同, 其计算结果见表 4。可以看出, 对爆破信号进行尺度 $j=1$ 的小波包分解时, Ω_0^1/Ω_1^1 的值均大于 25 或均大于 ϵ ; 对爆破信号进行尺度 $j=2$ 的小波包分解时, Ω_0^2/Ω_2^2 的值除第 16、20 和 22 号爆破事件外均大于 ϵ , Ω_0^2/Ω_3^2 的值除第 7 号爆破事件外均大于 ϵ 。

表 2 地震事件 P 波段垂直向记录的低频段与高频段能量比值

序号	尺度 j=1		尺度 j=2		序号	尺度 j=1		尺度 j=2	
	Ω_0^1/Ω_1^1	Ω_0^2/Ω_1^2	Ω_0^2/Ω_2^2	Ω_0^2/Ω_3^2		Ω_0^1/Ω_1^1	Ω_0^2/Ω_1^2	Ω_0^2/Ω_2^2	Ω_0^2/Ω_3^2
1	0.365 6	0.200 2	0.085 8	0.211 9	15	4.142 2	4 528 9	5.136 9	10.655 7
2	0.525 5	2.069 6	0.632 7	0.987 9	16	13.378 4	1 134 3	7.394 1	67.374 0
3	5.965 0	4.690 1	5.753 1	47.375 1	17	10.518 5	8 268 6	11.537 2	70.516 0
4	4.325 8	11.404 4	5.692 8	32.866 2	18	0.264 3	0 610 6	0.131 5	0.538 6
5	1.160 4	5.559 3	0.988 9	13.779 7	19	0.354 4	0 425 9	0.127 6	1.516 1
6	1.773 8	4.888 3	2.058 9	13.074 6	20	0.220 6	0 772 2	0.120 8	0.684 7
7	9.597 8	14.957 2	19.055 1	59.935 7	21	3.706 7	1 923 3	2.255 2	19.708 3
8	0.983 3	2.795 3	1.029 0	5.693 5	22	0.300 9	0 316 3	0.091 4	0.657 2
9	10.656 2	0.885 0	8.952 8	15.260 8	23	0.743 1	1 816 9	0.851 0	1.512 9
10	4.103 9	2.712 8	4.679 1	15.150 3	24	18.309 9	59.359 0	30.507 7	107.357 5
11	0.763 4	1.134 7	0.483 6	1.642 5	25	23.552 3	6 297 5	18.729 5	148.853 9
12	1.075 7	2.955 8	1.062 4	4.053 3	26	10.827 3	0 450 2	4.119 5	19.012 2
13	11.174 4	4.400 9	11.453 8	76.403 2	27	7.610 1	4 020 2	7.511 8	31.331 8
14	1.858 2	3.118 0	2.027 8	10.137 7	28	4.254 8	2 797 8	4.666 7	14.065 9

表 3 爆破事件目录

序号	发震时间		震中位置			震级 (M _L)	台站	震中距 / km
	年-月-日	时 : 分	北纬 /(°)	东经 /(°)	地点			
1	2005-03-12	18 : 00	39.07	106.03	内蒙古阿拉善左旗	2.2	银川台	51
2	2005-03-15	15 : 27	39.07	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.5	银川台	52
3	2005-03-26	16 : 06	39.08	106.03	内蒙古阿拉善左旗	2.3	银川台	54
4	2005-03-29	18 : 36	39.12	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.3	银川台	58
5	2005-04-03	13 : 42	39.07	106.05	内蒙古阿拉善左旗	2.5	银川台	52
6	2005-04-06	01 : 54	39.23	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.6	石嘴山台	51
7	2005-04-08	08 : 40	39.15	106.10	内蒙古阿拉善左旗	2.4	银川台	61
8	2005-04-10	18 : 29	39.10	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.4	银川台	56
9	2005-04-12	14 : 09	39.13	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.2	银川台	60
10	2005-05-15	10 : 09	39.07	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.6	银川台	53
11	2005-07-15	12 : 16	37.86	106.13	宁夏中卫	1.9	同心台	64
12	2005-07-23	16 : 55	39.17	106.13	内蒙古阿拉善左旗	2.6	银川台	64
13	2005-07-26	17 : 03	39.10	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.3	银川台	55
14	2005-07-28	11 : 34	39.12	106.13	内蒙古阿拉善左旗	2.2	银川台	59
15	2005-07-29	15 : 01	39.08	106.05	内蒙古阿拉善左旗	2.6	银川台	55
16	2005-08-11	01 : 13	38.13	105.57	内蒙古阿拉善左旗	1.9	银川台	61
17	2005-08-25	16 : 53	39.05	106.05	内蒙古阿拉善左旗	2.4	银川台	51
18	2005-08-28	14 : 14	37.15	105.40	宁夏中卫	2.3	中卫台	51
19	2005-08-28	16 : 57	39.07	106.12	内蒙古阿拉善左旗	2.4	银川台	54
20	2005-08-29	21 : 20	38.13	105.62	内蒙古阿拉善左旗	2.2	银川台	59
21	2005-10-04	14 : 30	39.10	106.10	内蒙古阿拉善左旗	2.4	银川台	56
22	2005-10-12	19 : 24	38.15	105.55	内蒙古阿拉善左旗	2.2	银川台	61
23	2005-11-12	13 : 38	39.08	106.12	内蒙古阿拉善左旗	2.3	银川台	54
24	2005-11-16	11 : 31	39.13	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.7	银川台	60
25	2005-11-16	14 : 22	39.10	106.17	内蒙古阿拉善左旗	2.5	银川台	58
26	2005-11-24	12 : 50	39.12	106.08	内蒙古阿拉善左旗	1.8	银川台	54
27	2005-11-24	16 : 25	39.10	106.08	内蒙古阿拉善左旗	2.3	银川台	56
28	2005-11-25	13 : 20	37.13	105.37	宁夏同心	2.1	中卫台	58

表 4 爆破事件 P波段垂直向记录的低频段与高频段能量比值

序号	尺度 $\beta=1$		尺度 $\beta=2$		序号	尺度 $\beta=1$		尺度 $\beta=2$	
	Ω_0^1/Ω_1^1	Ω_0^2/Ω_1^2	Ω_0^2/Ω_2^2	Ω_0^2/Ω_3^2		Ω_0^1/Ω_1^1	Ω_0^2/Ω_1^2	Ω_0^2/Ω_2^2	Ω_0^2/Ω_3^2
1	545.04	43.457	625.9	10.118	15	301.81	17.145	340.72	13.728
2	179.49	7.9371	179.81	4.831.9	16	28.127	1.365.1	19.913	312.58
3	3.504.5	24.667	4.479.9	80.052	17	449.72	56.33	488	176.820
4	556.69	34.307	725.9	58.616	18	306.02	7.388.4	379.56	3.020.9
5	86.552	10.786	98.453	1.578.8	19	2.161.6	46.429	3.817.2	7.680.4
6	8.247.6	18.084	8.421.7	85.052	20	25.207	1.183.8	17.17	2.664.8
7	38.923	2.057.1	26.967	138.73	21	28.579	9.521.3	31.576	76.301
8	678.69	30.341	682.06	100.950	22	27.05	0.920.1	14.04	276.41
9	25.758	13.308	31.24	208.19	23	1.486.8	284.1	3.194	3.584
10	36.448	5.120.8	37.823	935.56	24	57.675	12.848	76.855	646.56
11	50.871	2.929	44.867	438.27	25	310.41	18.895	349.21	22.730
12	5.231.5	72.637	7.089	126.450	26	69.554	8.299.5	84.18	679.15
13	99.092	308.22	173.180	233.500	27	1.374.1	21.501	1.267.9	91.054
14	13.895	32.81	19.815	92.359	28	115.97	19.625	139.56	804.27

3.3 地震和爆破的识别

以地震事件和爆破事件的序号 n 为横坐标，两种事件所激发的能量之比 (Ω_0^1/Ω_1^1 、 Ω_0^2/Ω_2^2 、 Ω_0^2/Ω_3^2) 的自然对数为纵坐标绘图，尺度 $\beta=1$ 时的结果见图 2，尺度 $\beta=2$ 时的结果见图 3。取识别阈值见表 5。除尺度 $\beta=2$ 时 Ω_0^2/Ω_1^2 的识别率为 80.3%，其它都达到 90% 以上，特别是已确认的第 24~28 号爆破事件，采用该方法均被识别为爆破事件。

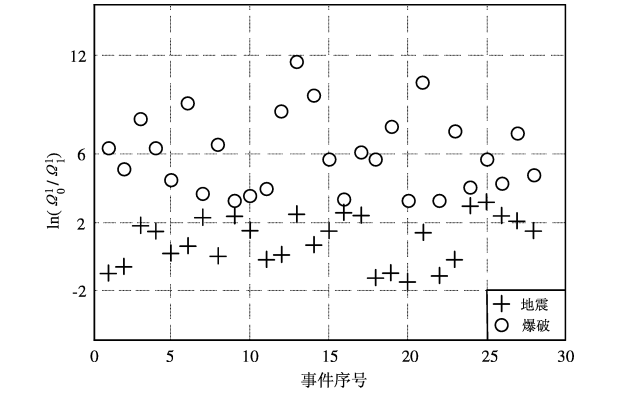


图 2 尺度 $\beta=1$ 时地震和爆破的 $\ln(\Omega_0^1/\Omega_1^1)$ 对比图

表 5 识别地震和爆破的阈值

事件	尺度 $\beta=1$	尺度 $\beta=2$		
	$\ln(\Omega_0^1/\Omega_1^1)$	$\ln(\Omega_0^2/\Omega_1^2)$	$\ln(\Omega_0^2/\Omega_2^2)$	$\ln(\Omega_0^2/\Omega_3^2)$
地震	小于 3	小于 2	小于 3	小于 5
爆破	大于 3	大于 2	大于 3	大于 5
识别率	98.2%	80.3%	92.8%	96.4%

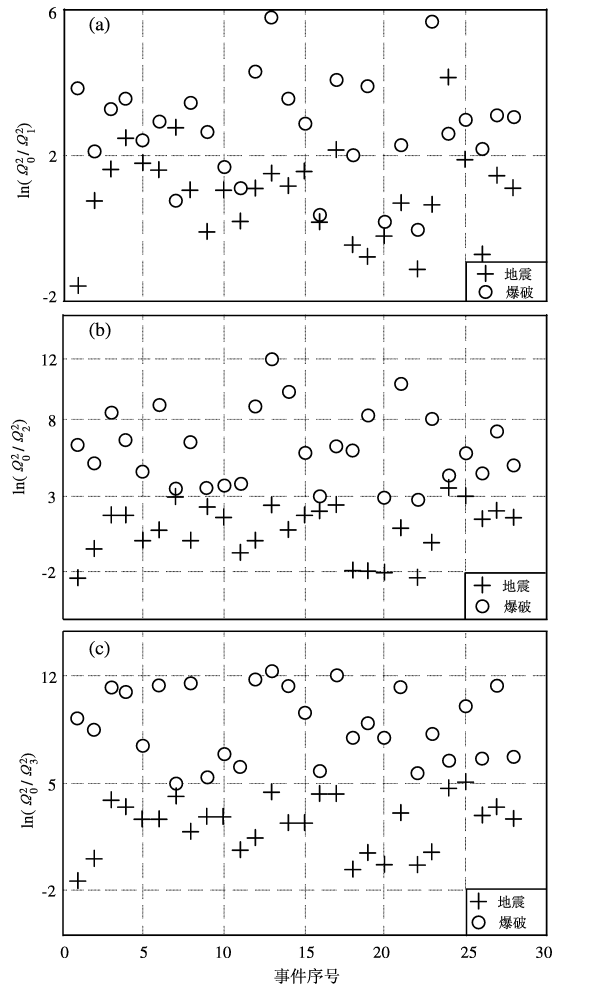


图 3 尺度 $\beta=2$ 时地震和爆破的 $\ln(\Omega_0^2/\Omega_1^2)$ 、 $\ln(\Omega_0^2/\Omega_2^2)$ 、 $\ln(\Omega_0^2/\Omega_3^2)$ 对比图
(a) 阈值取 2 (b) 阈值取 3 (c) 阈值取 5

3. 4 同一事件不同台站的记录

由于多数爆破的当量较小，不同震中距的台站不可能都记录到清晰的记录波形，也无法计算、分析不同震中距爆破与地震信号频谱成分的差异，故在此仅选择一次当量较大的爆破，与一次震级相当、有相当震中距的台站、能记录到清晰波形

的地震，依旧采用 11 阶 db 小波基对各台站 P 波段垂直向记录的 128 个数据点进行尺度 $j=1$ 和 $j=2$ 的小波包变换，计算不同尺度下不同频带间的能量比值（表 6），以探讨不同震中距记录的爆破和地震频谱成分的差异。

表 6 同一事件不同台站记录的能量比值

类别	发震时间	震中位置		震级	台站	震中距 / km	尺度 $j=1$		尺度 $j=2$	
	年-月-日 时:分	北纬 $/(^{\circ})$	东经 $/(^{\circ})$	(M_L)			Ω_0^1/Ω_1^1	Ω_0^2/Ω_1^2	Ω_0^2/Ω_2^2	Ω_0^2/Ω_3^2
地震	2005-08-20 08:25	38.28	106.0	2.7	银川台	24	0.286 1	0.490 1	0.762 4	0.09
					石嘴山台	86	1.631	0.209 4	4.780 2	0.352 9
					同心台	144	14.456	0.460 2	89.2	5.486 5
爆破	2005-08-08 20:30	39.2	106.32	2.5	石嘴山台	31	13.765	1.518 5	10.552	395.96
					银川台	74	187.31	21.362	236.38	536.94
					盐池台	185	265.05	5.877 3	211.53	5 451.8

由表 6 可以看出，在给出的这一对地震和爆破事件中，同一事件不同台站间的同一能量比值有很大差异，说明地震波的频谱特性与震中距、接收台站场地响应、震源到接收台站之间的射线路径上地球介质的非均匀性有关。对于震中距相近的台站记录波形的同一能量比值，地震信号的能量比值总小于爆破信号的能量比值，且同一个能量比值均随震中距增大而增大（尺度 $j=2$ 时的 Ω_0^2/Ω_1^2 值除外）。可见，地震信号和爆破信号随震中距增大而相应衰减，其高频成分比低频成分衰减要快，相对而言爆破信号的高频成分衰减要比地震信号快得多。由于样本数量所限，这一结论还有待进一步的分析和研究。

4 结论与讨论

我们采用 11 阶 db 小波基对宁夏及邻区震中距为 55 km 左右的地震信号和爆破信号 P 波段垂直向记录的 256 个数据点进行多尺度小波包分解，得到不同频带上的能量分布，据此计算了不同频带能量之间的比值。结果表明，地震信号和爆破信号在不同频带上的能量比是不同的，由此可以给出地震和爆破的识别阈值。在仅给出的一对地震和爆破事件中，二者的能量比在不同震中距上也显示出了明显的差别。

地震的发生是岩石破裂过程的结果（陈运泰

等，2004），其能量的释放比爆破要缓慢得多，所以相对而言地震信号能量多集中于低频段，而爆破信号能量多集中于高频段。再者，爆破信号的一个特点是距离爆源较近时地震波的高频成分较为丰富，且持续时间较短（阳生权，2002），爆破地震波在岩土介质体内从爆源向四周传播的过程中，介质体的内阻尼使地震波幅值衰减，且对于高频振动阻尼作用较大，因此远距离范围的质点振动高频成分衰减得非常快，低频成分则相对增大。

本文研究范围仅为宁夏及邻区，因宁夏数字测震台网现在还未完全建成，目前仅有 7 个台站进行观测，故可收集到的爆破事件的数量随震中距的分布很不均匀。如果有记录清晰且数量足够的样本量，就有可能得到更多有意义的结果。另外，随分解尺度的增加，信号在频率域分解得更细，同一事件不同频带内的能量比值差异性也会更大，可能会得到更多有意义的信号细节特征信息，这还有待今后做进一步分析和研究。

参考文献：

曹晖，赖明，白绍良. 2004 a 地震地面运动的局部谱密度描述及其估计方法 [J]. 世界地震工程, 20 (2): 43—49.
曹晖，赖明，白绍良. 2004 b 地震地面运动的局部谱密度的小波变换估计 [J]. 工程力学, 21 (5): 109—115.
陈运泰，顾浩鼎. 2004. 震源理论基础（上册）[M]. 北京：中国地震局地球物理研究所.

国家地震局地球物理研究所. 1977. 近震分析 [M]. 北京: 地震出版社.

李弼程, 罗建书. 2003. 小波分析及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社.

吴忠良, 陈运泰, 牟其铎. 1994. 核爆炸地震学概要 [M]. 北京: 地震出版社.

阳生权. 2002. 爆破地震累积效应理论和应用初步研究 [D]. 长沙: 中南大学.

杨选辉, 沈萍, 刘希强, 等. 2005. 地震与核爆破识别的小波包分量比方法 [J]. 地球物理学报, 48 (1): 148—156.

郑治真, 沈萍, 杨选辉, 等. 2001. 小波变换及其 MATLAB工具的应用 [M]. 北京: 地震出版社.

Using Wavelet Packet to Discriminate Earthquakes and Explosions in Ningxia and Neighboring Areas

ZENG Xianwei², ZHAO Weiming, SHENG Juqi¹, XIN Haijiang²
(1. Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)
(2. Lanzhou Institute of Seismology, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

We calculated the energy ratio of low frequency to high frequency of ray based on the relation between ray energy and wavelet packet transform coefficients. The result shows that while decomposition scale is 1, the value $\ln(\Omega_0/\Omega_1)$ is generally less than 3.0 for earthquakes, but more than 3.0 for explosions. It is suggested that wavelet transform theory can be applied to the discrimination of the earthquakes and explosions in Ningxia and neighboring areas.

Key words: wavelet packet; transform coefficient; energy; earthquake; explosion; discrimination



王福昌 中国地震局防灾科技学院副教授。1997年毕业于曲阜师范大学数学系,获学士学位;2000年毕业于大连理工大学应用数学系应用数学专业,获硕士学位。主要从事多元统计分析和现代最优化方法的应用研究。



郭晓 中国地震局兰州地震研究所助理研究员。2005年毕业于中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业,获硕士学位。主要从事卫星遥感应用及地震预报研究工作。



赖加成 福建省地震局泉州地磁台助理工程师。1994年毕业于防灾技术高等专科学校(现为防灾技术学院)。主要从事地震地磁监测工作。



曾宪伟 中国地震局兰州地震研究所在读硕士研究生。2005年毕业于青岛大学物理系,获学士学位。主要从事数字化观测数据的处理和分析工作。



莘海亮 中国地震局兰州地震研究所在读硕士研究生。2005年毕业于河北大学物理科学与技术学院,获学士学位。研究方向为地震精定位与地壳三维速度结构。

注:陈立德、刘翔、叶建庆、常祖峰的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol.30 No.1 Vol.28 No.4 Vol.30 No.3 Vol.29 No.2