

短文

北京地震台网数字地震波形记录的波谱分析

1. 引言

为了扩充北京地震台网的实用功能,为研究地震提供更多的有用资料,我们在北京台网利用数字地震波形记录,开展了常规的近震波谱分析,编辑出版了“北京地震台网地震波谱和震源参数观测报告”,并开展了一些应用研究。我们在赵仲和^[1]、王凌南^[1]等编制的有关程序的基础上,对波谱分析程序作了补充和修改,使其达到了常规处理的要求。

我们的波谱分析的内容,包括中小地震波谱计算和校正、用波谱方法计算Q值、震源参数的计算以及波谱分析误差。本文只是波谱分析方法的总结,至于用波谱分析数据研究地震的一些结果,以后将陆续发表。

2. 地震波谱的计算和校正

圆盘位错模式的理论远场位移振幅谱^[2]为:

$$u_{\bar{\rho},\bar{\rho}}(\omega) = \frac{M_0}{4\pi\rho V_{\bar{\rho},\bar{\rho}}^3 R} R_{\bar{\rho},\bar{\rho}} e^{-\frac{i\omega R}{V_{\bar{\rho},\bar{\rho}}}} \cdot S_{\bar{\rho},\bar{\rho}}(\omega) \quad (1)$$

震源发出的地震波经过地壳传到地面,由设置在地面的仪器接收并传送到记录室,由磁带机记成数字地震波形记录,我们假定这样一个系统是线形系统,最后得到的地震波谱是各个部分的系统函数的乘积:

$$u_{\bar{\rho},\bar{\rho}}(\omega) = \frac{M_0}{4\pi\rho V_{\bar{\rho},\bar{\rho}}^3 R} \cdot S_{\bar{\rho},\bar{\rho}}(\omega) \cdot R_{\bar{\rho},\bar{\rho}} e^{-\frac{\omega R}{2QV_{\bar{\rho},\bar{\rho}}}} \cdot p \cdot g \cdot H(\omega) \quad (2)$$

式中, ρ 为介质密度, R 为震源距, $V_{\bar{\rho},\bar{\rho}}$ 为P波或S波波速, M_0 为地震矩, $R_{\bar{\rho},\bar{\rho}}$ 为P波或S波的辐射图型因子, Q 为介质品质因子, $e^{-\frac{\omega R}{2QV_{\bar{\rho},\bar{\rho}}}}$ 为传播路径上的衰减, $H(\omega)$ 为仪器频率响应, p 为入射波振幅在水平方向和垂直方向的分配比例系数, g 为自由表面的影响, $S_{\bar{\rho},\bar{\rho}}(\omega)$ 为波谱的形状函数,其低频渐近趋势接近一常数,而高频渐近趋势则与 ω^{-2} 成比例,低频趋势和高频趋势的交点为拐角频率。

计算时,选用波形清晰、无限幅、背景噪声小的记录。采用矩形窗,从直达P波或S波开始采样,采样率取50次/秒,由采样率决定的波谱频率上界为25赫兹。经试验证明,采样长度取10.24秒为最好,由此得到频率下界为0.1赫兹,波谱分辨率为0.1赫兹, $m=9$ 。由数字地震波形记录经FFT直接得到记录波谱。

为简化计,取 $P = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $g = 2$, 取辐射图型因子在震源球上的平均值,为0.6, 这样 $p \cdot g \cdot R_{\bar{\rho},\bar{\rho}} = 0.85$ 。

1) 赵仲和、朱碧辉, 北京台网数字地震波形分析, 1984.

数字记录仪器系统的频率响应 $H(\omega) = 1.25 \times \beta \times H_0(\omega) \times 10^2$ 数/厘米, 式中 β 为记录笔的衰减倍率。经仪器频率响应校正后得到地动波谱。

传播路径的校正采用 $H_A(\omega) = e^{-\frac{\omega R}{2QV_p}}$, 关键是 Q 值的选用。我们用 Q 值的三种不同取值方法进行了对比试验。根据试验结果, 采用了本地区由尾波方法得到的 Q 值公式²⁾,

$$Q = 189f^{0.654}$$

经过这样的校正之后, 实测波谱与理论波谱符合较好。校正后, 就得到了波谱图型和波谱的三要素—低频高度 Ω_0 、高频衰减率 r 和拐角频率 f_c 。图1给出了计算和校正的地震P波波谱实例。在北京地区, 取 $V_p = 6.0$ 公里/秒, $V_s = 3.5$ 公里/秒。

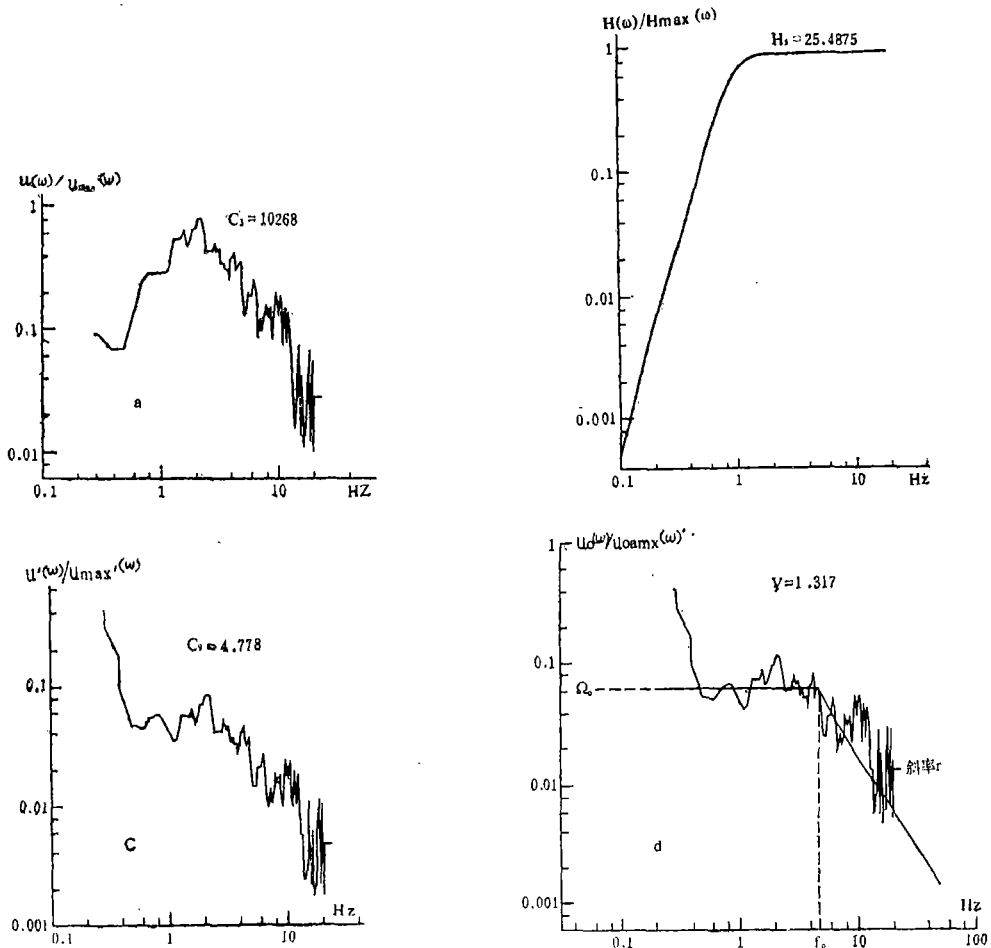


图1 P波波谱实例

- a. 台站归一化记录波谱 (C_0 为归一化因子)
- b. 仪器频率响应曲线 (H_0 为归一化因子)
- c. 台站归一化地动波谱 (C_0 为归一化因子)
- d. 校正后的波谱和波谱三要素 (V 为归一化因子)

3. 计算品质因子 Q 值

将(2)式改写并两边取对数得到:

2) 石汝斌, 利用尾波确定介质 Q 值.

$$\log\left(\frac{u_p^b(\omega)}{H(\omega)}\right) = \log\left(\frac{0.85u_p^b(\omega)}{R}\right) - \frac{R \cdot \log e}{2QV_p} \omega \quad (3)$$

式中 $u_p^b(\omega)$ 为P波的震源谱, $\frac{1}{R}$ 为几何扩散。根据波谱理论, 震源谱在低于拐角频率 f_{0p} 的

低频部分近似为一常数, 其大小与地震矩有关, 因 $\log\left(\frac{0.85u_p^b(\omega)}{R}\right)$ 在低频部分为一常数,

(3) 式为一条直线, 用这条直线的斜率 $K = \frac{R \cdot \log e}{2QV_p}$ 就可求出Q值。

在求(3)式的直线时, 我们发现, $\log\left(\frac{u_p^b(\omega)}{H(\omega)}\right)$ 随频率的变化并非是一条光滑直线,

需用最小二乘法进行线性拟合, 为确保拟合直线有足够的准确性, 需要 $\log\left(\frac{u_p^b(\omega)}{H(\omega)}\right)$ 和 ω 的数据对有足够的数量, 因此, 应尽力选取 f_{0p} 较大的地震波谱来计算Q值。根据北京地区波谱分析的结果, 绘制了P波谱 f_{0p} 与 M_L 的关系曲线, 如图2所示。

由图2不难看出, 当 $1.7 < M_L \leq 4.0$ 时, f_{0p} 在4.0—7.0赫兹之间, 低于 f_{0p} 的数据个数约为40—70个。由此看来, 用 $1.7 < M_L \leq 4.0$ 的地震波谱计算Q值较为合适。

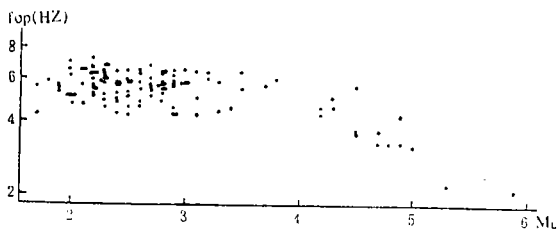


图2 北京地区P波谱拐角频率 f_{0p} 与震级 M_L 的关系

4. 计算震源参数

若P波和S波的震源半径的一般表达式为:

$$a = C_p Y_p / 2\pi f_{0p} \text{ 和 } a = C_s V_s / 2\pi f_{0s}$$

则可推导出:

$$C_p = 0.583 \cdot C_s \cdot (f_{0s} / f_{0p}) \quad (4)$$

当 C_s 给定时, C_p 只与 f_{0s} / f_{0p} 有关。不同的震源模式, 拐角频率的比很不一致。由汉克斯和韦斯的结果^[3], 可推算出 f_{0s} 与 f_{0p} 之比等于 V_s / V_p , 即约为0.583; 根据陈培善的破裂园盘位错模式^[4], 当破裂速度 $V_r = 1.75$ — 3.15 公里/秒时, 推算出 f_{0s} 与 f_{0p} 之比为0.663—0.621; Savago的双向破裂模式^[5]给出了 $\langle f_{0s} \rangle$ 大于 $\langle f_{0p} \rangle$, “ $\langle \rangle$ ”表示在震源球上的平均; 根据Sato和Hirasawa的园盘断裂模式^[5], 当 $V_r = 1.75$ — 3.15 公里/秒时, 得到 f_{0s} 与 f_{0p} 之比为0.804—0.705。我们实测的结果是 f_{0s} 与 f_{0p} 之比为0.66—1, 用线性回归方法求出的实测值为0.937, 如图3所示。

根据文献^[4], 可以近似地推导出:

$$\frac{f_{0s}}{f_{0p}} = \frac{\frac{1}{V_r} + \frac{\pi}{4V_p}}{\frac{1}{V_r} + \frac{\pi}{4V_s}} \quad (5)$$

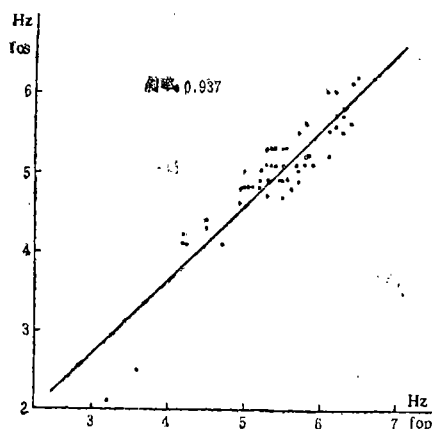


图3 P波谱和S波谱的拐角频率关系

由(5)式可看出,当 $V_r \rightarrow 0$ 时,则 $f_{0s} = f_{0p}$;当 $V_r \rightarrow \infty$ 时, f_{0s} 与 f_{0p} 之比等于 V_s/V_p ,这是两种极限情况,实际上 f_{0s} 与 f_{0p} 之比为0.583—1。由此看来,汉克斯和韦斯的结果只是一种极限情况,一般性较差。陈培善以及Sato和Hirasawa的结果处于低值段。我们实测结果较理想,采用实测的 f_{0s} 与 f_{0p} 之比,若 C_s 取2.34,则求出的P波震源半径公式为:

$$a = 1.455 V_p / 2 \pi f_{0p} \quad (6)$$

应用文献[3]给出的有关公式和(6)式就可计算出P波和S波的震源参数。计算结果如表1和表2所示。由表1和表2可以看出,P波和S波的震源参数基本一致,它们彼此之间的离散较小,这说明我们采用的方法是可取的,计算的结果是合理的。

在震级较大时,由于S波波形记录易限幅,因此S波的波谱分析受到限制,一般常用P波做波谱分析。

5. 波谱分析的误差

(1) 采样长度引起的误差

试验结果表明,当采样长度 $T = 10.24$ 秒时,引起拐角频率的误差约为0.06赫兹,引起低频高度 Ω_0 的误差约为2%左右。因此采样长度引起的误差可以忽略不计。

(2) 低频陡然上升引起的误差

经仪器频响校正后,有时出现波谱的低频陡然上升的情况,一般出现在1赫兹之内,其引起 Ω_0 的误差为:

$$\Delta \Omega_0 \% = (10^A - 10^B) / 10^B \quad (12)$$

$$\text{式中, } A = \sum_{i=1}^N \log u_i(\omega) / N_s$$

$$B = \sum_{i=1}^{N_s-12} \log u_i(\omega) / (N_s-12)$$

N_s 为低频数据总个数,12为可能有陡然上升的数据个数。

计算结果表明,低频陡然上升引起 Ω_0 的相对误差约为5%左右。

(3) 高、低频渐近线引起的误差

产生误差的原因有:高频背景噪声、采样终点不在0线上、低频陡然上升、高、低频分段点的不准等等。综合上述几项,引起 f_0 的误差约为0.4赫兹,引起 Ω_0 的误差约为6%左右。

波型: P波

用P波谱计算的结果

表 1

编号	时间		震中位置			震级 M _L	拐角频率 f ₀ (赫兹)	地震矩 M ₀ ($\times 10^{19}$ 达因·厘米)	震源半径 a (米)	应力降 $\Delta\sigma$ (巴)	波谱能量 E ($\times 10^{10}$ 尔格)	平均位错 u (厘米)
	年、月、日	时、分	纬度	经度	地点							
1	85.1.1	07.28	39°36'	118°23'	钱营	2.0	8.0	3.7	174	3.1	0.02	0.1
2	85.1.1	14.35	38°30'	116°26'	里坦西南	2.3	4.5	18.6	309	2.8	0.08	0.2
3	85.1.1	19.16	40°44'	113°40'	兴和西南	2.6	4.7	19.0	296	3.2	0.091	0.2
4	85.1.13	11.11	39°29'	118°02'	丰南	4.9	4.2	467.7	331	56.6	40.1	4.1
5	85.1.13	20.21	39°57'	117°24'	上仓	2.3	6.4	43.5	217	18.6	1.23	0.9
6	85.1.18	06.00	39°24'	117°55'	宁河	2.7	6.7	40.6	207	19.9	1.23	0.9
7	85.1.19	01.46	41.1°	122.7°	辽阳西	3.1	4.9	177.3	283	34.1	9.15	2.1
8	85.1.19	20.03	39°20'	117°55'	宁河	2.2	6.6	15.1	21.0	7.1	0.16	0.3
9	85.1.20	01.55	39°38'	118°06'	丰南	2.2	6.2	15.0	224	5.8	0.13	0.3
10	85.1.20	03.22	39°48'	114°08'	广灵	2.2	5.9	26.7	235	9.0	0.36	0.5
11	85.1.23	14.35	38°40'	116°05'	任丘	2.5	4.2	42.2	330	5.1	0.33	0.4
12	85.1.27	10.53	39°14'	117°34'	芦台东南	2.6	6.7	25.1	207	12.3	0.48	0.6
13	85.1.29	06.40	39°55'	118°52'	卢龙	2.3	6.1	10.5	228	3.9	0.06	0.2
14	85.1.29	19.17	40°35'	114°10'	天镇东北	2.3	5.0	15.8	278	3.2	0.08	0.2
15	85.1.30	4.23	40°32'	114°03'	天镇东北	2.4	1.7	12.4	296	2.1	0.04	0.1
16	85.2.4	05.56	37°34'	116°22'	吴桥	2.6	6.4	27.6	217	11.8	0.49	0.6
18	85.2.4	19.52	39°45'	118°42'	滦县	2.8	6.3	12.1	220	4.9	0.09	0.2
19	85.2.12	03.33	40°24'	114°46'	深井堡	2.8	5.3	10.5	262	2.6	0.04	0.2
20	85.2.12	20.59	40°48'	115°31'	庞家堡东	1.7	4.2	1.1	330	0.1	0.02	0.01
21	85.2.12	21.13	39°32'	118°10'	陡河	2.2	5.0	12.9	278	0.8	0.005	0.05
22	85.2.13	12.5	40°48'	114°50'	张家口西南	4.3	4.5	25.1	309	3.3	0.11	0.2
23	85.2.18	02.22	39°53'	118°40'	沙河驿	2.6	4.6	31.1	302	4.9	0.23	0.3
24	85.2.26	12.07	39°15'	118°04'	南堡	2.1	4.6	18.9	302	3.0	0.08	0.2
25	85.3.1	13.05	39°50'	118°44'	沙河驿	2.0	5.0	17.1	278	3.5	0.09	0.2
26	85.3.12	17.40	39°44'	118°24'	古冶	2.3	4.8	19.0	289	3.4	0.09	0.2
27	85.3.18	09.43	36.1°N	114.1°E	河南林县东	3.5	5.3	157.7	262	38.3	9.16	2.2
28	85.3.18	23.15	39°41'	118°48'	滦县	3.3	4.3	75.5	323	9.8	1.12	0.7
29	85.3.22	02.36	39°28'	118°26'	钱岗	2.0	5.5	7.7	254	2.1	0.02	0.1
30	85.3.22	08.6	39°41'	118°45'	滦县	2.7	5.6	26.8	248	7.7	0.31	0.4
31	85.3.23	01.01	39°21'	117°53'	宁河	2.2	6.0	9.6	232	3.4	0.05	0.2
32	85.3.26	05.16	37.1°N	112.1°E	山西平遥	3.5	6.2	151.3	224	58.9	13.5	2.9
33	85.3.26	23.06	38°51'	116°25'	文安	2.8	5.3	73.6	262	17.9	1.99	1.0
34	85.3.29	06.17	42°45'	116°03'	桑根达来	2.9	4.5	23.9	309	4.3	0.19	0.3
35	85.4.2	15.00	39°22'	117°56'	宁河北	2.1	6.4	6.7	217	2.9	0.03	0.1
36	85.4.5	03.49	39°12'	117°44'	北塘	2.0	5.0	32.9	278	6.7	0.34	0.4
37	85.4.5	05.14	39°12'	117°45'	北塘	2.4	5.7	13.7	244	4.1	0.09	0.2
38	85.4.5	20.04	39°48'	118°53'	卢龙	2.3	5.7	13.9	244	4.2	0.09	0.2
39	85.4.7	19.33	39°47'	118°21'	古冶	2.0	6.9	10.7	201	5.7	0.09	0.3
40	85.4.11	01.58	39°29'	118°29'	滦南西	2.1	6.4	17.8	217	7.6	0.21	0.4
41	85.4.16	18.33	39°42'	118°49'	滦县	2.4	6.3	10.9	220	4.4	0.07	0.2
42	85.4.20	17.54	39°43'	118°48'	滦县	2.6	6.2	17.9	224	6.9	0.19	0.3
43	85.4.20	18.52	39°42'	118°49'	滦县	2.6	5.7	30.8	244	9.3	0.43	0.5
44	85.4.21	00.52	39°40'	118°48'	滦县	3.0	5.7	92.7	244	28.0	3.94	1.5
45	85.4.21	03.17	39°48'	118°48'	滦县	2.4	5.6	14.1	248	4.0	0.08	0.2
46	85.4.21	06.16	39°40'	118°43'	滦县	3.2	5.9	80.9	235	27.2	3.33	1.4
47	85.4.22	07.10	40°03'	116°59'	夏垫	2.4	4.2	21.0	331	2.5	0.08	0.2
48	85.4.22	11.31	39°46'	118°47'	滦县	5.0	3.1	632.1	448	30.7	29.4	3.0

续表 1

编号	时间		震中位置			震级 M _L	频率 f ₀ (赫兹)	地震矩 M ₀ (×10 ¹⁹ 达因·厘米)	震源半径 a (米)	应力降 Δσ (巴)	波谱能量 E (×10 ¹⁶ 尔格)	平均位错 u (厘米)
	年、月、日	时、分	纬度	经度	地点							
49	85.4.22	12.07	39°48'	118°43'	滦县	2.0	4.6	13.3	302	2.1	0.04	0.1
50	85.4.22	16.21	39°45'	118°49'	滦县	2.9	4.2	37.3	331	4.5	0.25	0.3
51	85.4.22	19.02	39°46'	118°49'	滦县	4.7	3.2	440.8	434	23.6	15.8	2.3
52	85.4.22	19.56	39°39'	118°49'	滦县	4.8	3.2	624.0	434	33.4	31.6	3.2
53	85.4.22	20.56	39°46'	118°49'	滦县	2.2	5.1	21.0	272	4.5	0.14	0.3
54	85.4.30	09.45	40°43'	113°40'	兴和西南	3.0	5.7	61.3	244	18.5	1.73	1.0
55	85.5.1	03.25	38°28'	116°33'	县垣南	2.9	5.6	261.3	248	74.9	29.7	4.1
56	85.5.7	16.58	39°45'	118°43'	滦县	2.8	4.8	31.1	289	5.6	0.26	0.4
57	85.5.7	18.17	39°34'	113°33'	浑源	2.5	5.7	60.7	244	18.4	1.69	1.0
58	85.5.7	22.32	37°47'	115°20'	宁晋东	2.9	6.1	171.2	228	63.4	16.5	3.2
59	85.5.7	22.51	39°15'	117°52'	汉沽	2.5	6.2	19.1	224	7.4	0.22	0.4
60	85.5.8	06.17	36°40'	118°30'	山东益都	3.8	5.8	387.2	239	123.3	72.4	6.5
61	85.7.18	17.02	39°38'	118°45'	滦县	1.9	5.3	9.1	262	2.2	0.03	0.1
62	85.7.20	12.21	39°47'	118°35'	雷庄	1.9	5.2	10.9	267	2.5	0.04	0.2
63	85.7.26	08.36	39°23'	118°00'	宁河东	2.4	5.0	29.2	272	6.3	0.28	0.4
64	85.7.27	20.58	40°04'	114°23'	张北西	2.5	4.5	26.7	309	4.0	0.16	0.3
65	85.7.28	19.31	40°07'	114°56'	涿鹿	4.3	4.9	369.4	283	70.9	39.7	4.4
66	85.7.29	05.33	40°06'	117°06'	南山村	2.3	6.7	8.4	207	5.2	0.09	0.2
67	85.8.9	20.18	39°25'	118°08'	丰南南	2.4	4.9	26.4	283	5.1	0.20	0.3
68	85.8.11	01.17	39°46'	118°45'	滦县	4.2	4.2	612.1	331	74.0	68.7	5.3
69	85.8.12	13.31	39°44'	112°54'	山西左云	2.7	5.3	41.4	262	10.1	0.63	0.6
70	85.8.12	23.21	39°40'	118°23'	古冶	2.8	6.1	41.1	228	15.2	0.95	0.8
71	85.8.14	01.24	39°50'	118°43'	沙河驿东	2.9	5.6	53.9	253	12.4	0.86	0.7
73	85.8.16	06.39	39°45'	118°46'	滦县	2.6	5.3	52.6	262	12.7	1.02	0.7
74	85.8.21	12.33	39°43'	118°22'	古冶	2.9	5.7	56.1	244	16.9	1.44	0.9
75	85.8.25	12.02	39°37'	118°42'	滦南北	2.7	5.8	56.9	239	12.9	0.80	0.7
76	85.8.25	17.05	39°44'	118°26'	古冶	4.5	3.6	457.8	386	34.8	24.2	2.9
77	85.8.28	07.11	39°49'	118°31'	沙河驿	2.5	6.8	94.7	239	30.2	4.33	1.6
78	85.8.28	22.49	39°46'	118°45'	滦县	2.3	5.9	20.3	235	6.8	0.21	0.4
79	85.8.29	18.19	39°50'	118°54'	卢龙	3.7	5.5	296.5	253	80.5	36.2	4.5
80	85.9.5	23.40	40°09'	119°20'	响山	2.5	6.0	27.3	278	5.6	0.23	0.3
81	85.9.8	05.38	39°35'	118°08'	丰南	3.1	6.3	40.2	220	16.4	1.00	0.8
82	85.9.8	19.28	39°41'	118°19'	钱营	3.4	4.5	129.0	309	19.2	3.75	1.3
83	85.9.9	03.10	39°40'	118°21'	钱营	3.0	5.7	72.3	244	21.9	2.39	1.2
84	85.9.9	13.43	39°38'	118°47'	滦县	2.3	5.9	17.2	235	5.7	0.15	0.3
85	85.9.16	04.42	39°26'	117°54'	宁河	2.0	6.5	12.7	214	5.7	0.11	0.3
86	85.9.21	16.58	39°33'	118°13'	唐山	2.5	6.4	21.7	217	7.1	0.18	0.3
87	85.9.21	23.11	38°33'	115°47'	肃宁北	2.2	5.4	10.4	257	2.7	0.04	0.2
88	85.9.22	11.06	42.1°N	118.1°E	赤峰	2.5	5.2	14.7	267	3.4	0.07	0.2
89	85.9.23	19.01	38°04'	119°14'	渤海	2.7	5.0	64.6	278	13.2	1.29	0.8
90	85.9.25	04.54	38°55'	116°40'	静海西	2.0	6.1	8.7	228	3.2	0.04	0.2
91	85.9.29	22.50	42.9°N	114.4°E	正镶白旗	2.8	5.3	62.6	262	16.2	1.44	0.9
92	85.9.30	09.48	39°24'	118°02'	宁河东北	3.2	6.2	80.3	224	31.2	3.80	1.5
93	85.9.30	22.39	38°35'	113°00'	山西定襄	3.0	6.4	60.9	217	26.1	2.40	1.2
94	85.10.4	06.42	37.4°N	115.2°E	新河	2.9	4.2	243.9	331	29.4	21.5	0.6
95	85.10.5	12.01	39°45'	118°29'	沙河驿南	5.3	2.2	1165.2	631	20.3	35.8	2.8
96	85.10.6	16.59	39.2°N	113.2°E	繁峙	3.1	4.2	100.7	331	12.2	1.86	0.9

续表 1

编号	时间		震中位置			震级 M _L	拐角频率 f ₀ (赫兹)	地震矩 M ₀ (×10 ¹⁹ 达因·厘米)	震源半径 a (米)	应力降 Δσ (巴)	波谱能量 E (×10 ¹⁰ 尔格)	平均位错 u (厘米)
	年、月、日	时、分	纬度	经度	地点							
98	85.10.13	21.16	39°22'	118°00'	宁河东	2.8	5.5	60.5	253	16.4	1.51	0.9
99	85.10.17	00.08	39°19'	114°38'	涞源	4.5	3.5	910.7	397	63.7	88.0	5.6
100	85.10.17	10.32	39°41'	118°31'	雷庄	2.5	5.7	19.6	244	5.9	0.18	0.3
101	85.10.19	00.29	39°35'	118°28'	钱营西	3.0	5.7	76.3	244	23.1	2.67	1.2
102	85.10.19	00.58	39°33'	118°21'	钱营西	2.8	5.2	40.0	267	9.1	0.56	0.5
103	85.10.23	00.13	39°42'	118°30'	古冶	2.8	6.4	31.2	217	13.4	0.63	0.6
104	85.10.23	09.13	41°45'	119°10'	辽宁内蒙交界	2.8	5.1	30.9	272	6.7	0.31	0.4
105	85.10.23	10.39	39°13'	117°46'	汉沽	2.2	6.2	16.0	224	6.2	0.15	0.3
106	85.10.25	03.06	39°48'	114°55'	蔚县	2.2	6.2	25.2	224	9.8	0.37	0.5
107	85.10.26	21.16	40°05'	115°24'	灵山	1.7	5.5	2.9	253	0.8	0.003	0.04
108	85.10.27	05.50	43.3°N	117.0°E	内蒙	3.3	5.7	78.0	244	23.6	2.79	1.3
110	85.11.1	10.39	39°17'	118°04'	宁河东	2.2	5.3	20.6	262	5.0	0.16	0.3
111	85.11.12	09.29	40°44'	114°16'	怀安西	2.7	5.4	19.7	257	5.1	0.15	0.3
112	85.11.17	07.45	39°45'	118°26'	古冶	2.1	5.5	14.0	253	3.8	0.08	0.2
113	85.11.21	19.42	40°05'	115°50'	幽州东	4.7	3.6	523.6	286	39.9	31.6	3.4
114	85.11.21	20.08	40°06'	115°51'	幽州东	3.5	5.5	34.8	253	9.5	0.50	0.5
115	85.11.23	08.46	38.7°N	121.2°E	渤海海峡	4.9	3.2	1176.0	434	62.9	112.1	6.0
116	85.11.25	11.24	39°43'	118°21'	古冶	2.9	6.3	27.5	220	11.2	0.47	0.5
117	85.11.30	22.38	37°06'	114°52'	巨鹿	5.9	2.1	3424.2	661	51.8	268.5	7.5
118	85.12.09	11.53	40°09'	115°09'	涿鹿	1.9	5.5	3.8	253	1.0	0.005	0.06
119	85.12.15	20.39	39°36'	118°13'	唐山	2.8	5.5	63.5	253	17.2	1.66	1.0
120	85.12.15	23.07	39°39'	118°26'	钱营	2.2	5.0	14.7	278	3.0	0.07	0.2
122	85.12.19	01.25	39°49'	118°55'	卢龙	2.4	5.6	22.4	248	6.4	0.22	0.4
123	85.12.21	16.50	37°50'	116°47'	南皮东光之间	4.2	4.5	674.0	309	100.3	102.4	6.8
124	85.12.21	22.46	39°46'	118°26'	古冶	1.8	5.8	10.3	239	3.2	0.05	0.2

波型: S波

用S波谱计算的结果

表 2

编号	时间		震中位置			震级 M _L	拐角频率 f ₀ (赫兹)	地震矩 M ₀ (×10 ¹⁹ 达因·厘米)	震源半径 a (米)	应力降 Δσ (巴)	波谱能量 E (×10 ¹⁰ 尔格)	平均位错 u (厘米)
	年、月、日	时、分	纬度	经度	地点							
1	85.1.1	07.28	39°36'	118°28'	钱营	2.0	5.9	6.3	221	2.5	0.02	0.1
2	85.1.1	14.35	38°30'	116°26'	里坦西南	2.3	5.3	10.8	246	3.2	0.05	0.2
8	85.1.1	19.16	40°44'	113°40'	兴和西南	2.6	4.2	16.7	310	2.4	0.06	0.2
13	85.1.29	06.40	39°55'	118°52'	卢龙	2.3	5.2	12.1	251	3.7	0.06	0.2
17	85.2.4	08.13	39°43'	118°25'	古冶	2.2	7.1	3.8	184	2.7	0.02	0.1
19	85.2.12	03.38	40°24'	114°46'	深井堡	2.8	5.3	3.9	246	2.0	0.02	0.1
20	85.2.12	20.59	40°48'	115°31'	庞家堡东	1.7	4.2	0.2	310	0.03	1 × 10 ⁻⁵	0.02
21	85.2.12	21.13	39°32'	118°10'	陡河	2.2	4.6	1.9	283	0.5	0.002	0.03
25	85.8.1	13.05	39°50'	118°44'	沙河驿	2.0	5.0	17.1	261	4.2	0.11	0.2
61	85.7.18	17.02	39°38'	118°45'	滦县	1.9	5.1	7.8	255	2.0	0.02	0.1
62	85.7.20	12.21	39°47'	118°35'	雷庄	1.9	5.0	5.7	261	1.9	0.02	0.1
64	85.7.27	20.58	40°04'	114°28'	张北西	2.5	4.4	19.0	296	3.2	0.09	0.2
66	85.7.29	05.33	40°06'	117°06'	南山村	2.3	6.2	22.1	210	5.8	0.11	0.3
67	85.8.9	20.18	39°25'	118°08'	丰南南	2.4	4.6	14.9	283	2.9	0.06	0.2
69	85.8.12	13.31	39°44'	112°54'	山西左云	2.7	5.1	39.4	251	10.9	0.65	0.6

续表 2

编号	时间		震中位置			震级 M _L	拐角频率 f ₀ (赫兹)	地震矩 M ₀ ($\times 10^{18}$ 达因·厘米)	震源半径 a (米)	应力降 $\Delta\sigma$ (巴)	波谱能量 E ($\times 10^{16}$ 尔格)	平均位错 u (厘米)
	年、月、日	时、分	纬度	经度	地点							
70	85.8.12	23.21	39°40'	118°23'	古冶	2.8	6.0	20.2	217	9.8	0.34	0.5
71	85.8.14	01.24	39°50'	118°43'	沙河驿东	2.9	5.3	38.0	246	13.1	0.88	0.7
72	85.8.15	05.07	38.4°N	116.1°E	邢台	2.5	6.2	34.8	261	9.7	0.51	0.5
73	85.8.16	06.39	39°45'	118°46'	滦县	2.6	5.3	24.3	246	7.9	0.32	0.4
74	85.8.21	12.33	39°43'	118°22'	古冶	2.9	5.1	48.0	255	12.6	0.92	0.7
75	85.8.25	12.02	39°37'	118°42'	滦南北	2.7	5.2	34.5	251	9.6	0.50	0.5
77	85.8.28	07.11	39°49'	118°31'	沙河驿	2.5	5.6	71.5	233	24.8	2.69	1.3
78	85.8.28	22.49	39°46'	118°45'	滦县	2.3	5.1	15.9	255	4.2	0.10	0.2
80	85.9.5	23.40	40°09'	119°20'	响山	2.5	4.8	18.8	271	5.0	0.17	0.3
81	85.9.6	05.38	39°35'	118°08'	丰南	3.1	5.5	51.2	237	16.9	1.31	0.9
82	85.9.8	19.28	39°41'	118°19'	钱营	3.4	4.5	99.9	290	23.4	4.61	1.5
83	85.9.9	03.10	39°40'	118°21'	钱营	3.0	4.9	88.5	266	20.6	2.76	1.2
84	85.9.9	13.43	39°38'	118°47'	滦县	2.3	5.5	14.5	237	4.8	0.11	0.3
85	85.9.16	04.42	39°36'	117°54'	宁河	2.0	6.2	8.9	210	4.2	0.06	0.2
86	85.9.21	16.58	39°33'	118°13'	唐山	2.5	5.6	11.6	233	4.0	0.71	0.2
87	85.9.21	23.11	39°33'	115°47'	肃宁北	2.2	5.3	10.6	246	3.1	0.05	0.2
88	85.9.22	11.06	42.1°N	118.1°E	赤峰	2.5	4.9	22.5	266	3.4	0.73	0.2
89	85.9.23	19.01	38°04'	119°14'	渤海	2.7	4.8	80.9	271	17.7	2.17	1.1
90	85.9.25	04.54	38°55'	116°40'	静海西	2.0	5.5	9.3	237	3.1	0.04	0.2
92	85.9.30	09.48	39°24'	118°02'	宁河东北	3.2	6.0	56.5	217	24.1	2.07	1.2
93	85.9.30	22.39	38°35'	113°00'	山西定襄	3.0	6.1	108.4	214	48.7	7.99	2.3
94	85.10.4	06.42	37.4°N	116.2°E	新河	2.9	4.1	52.5	318	7.2	0.57	0.5
96	85.10.6	16.59	39.2°N	113.2°E	紫荆	3.1	4.1	36.0	318	4.9	0.27	0.3
97	85.10.9	09.07	39°52'	116°23'	百花山西	2.1	6.0	9.4	214	4.2	0.06	0.2
98	85.10.13	21.16	39°22'	118°00'	宁河东	2.8	4.9	52.3	266	12.2	0.96	0.7
100	85.10.17	10.32	39°41'	118°31'	雷庄	2.5	5.5	16.3	237	5.4	0.13	0.3
101	85.10.19	00.29	39°35'	118°28'	钱营西	3.0	5.2	65.1	251	18.1	1.78	1.0
102	85.10.19	00.58	39°33'	118°21'	钱营西	2.8	4.8	26.1	271	5.7	0.23	0.3
103	85.10.23	00.13	39°42'	118°30'	古冶	2.8	5.9	32.3	221	13.1	0.64	0.6
104	85.10.23	09.13	41°54'	119°10'	辽宁内蒙交界	2.8	4.8	67.3	271	11.4	0.91	0.7
105	85.10.23	10.39	39°13'	117°46'	汉沽	2.2	5.6	6.1	233	2.1	0.02	0.1
106	85.10.25	03.06	39°48'	118°55'	蔚县	2.2	5.7	10.1	229	3.7	0.06	0.2
108	85.10.27	05.50	43.3°N	117.0°E	内蒙	3.3	5.0	72.1	261	17.8	1.95	1.0
109	85.10.31	10.52	39°45'	118°21'	陡河	1.9	5.5	21.2	237	7.0	0.22	0.4
110	85.11.1	10.39	39°17'	118°04'	宁河东	2.2	4.7	17.1	277	3.5	0.09	0.2
111	85.11.12	09.29	40°44'	114°16'	怀安西	2.7	5.1	17.2	255	4.5	0.12	0.3
112	85.11.17	07.45	39°45'	118°26'	古冶	2.1	4.9	9.3	266	2.2	0.03	0.1
113	85.11.21	19.42	40°05'	115°50'	幽州东	4.7	2.5	748.5	512	23.1	26.2	2.7
114	85.11.21	20.08	40°06'	115°51'	幽州东	3.5	4.7	32.9	277	6.7	0.34	0.4
115	85.11.23	08.46	38.7°N	121.2°E	渤海海峡	4.9	2.1	953.1	620	17.6	25.2	2.4
116	85.11.25	11.24	39°43'	118°21'	古冶	2.9	5.7	27.3	229	10.0	0.41	0.5
118	85.12.9	11.53	40°09'	115°09'	涿鹿	1.9	5.3	3.1	246	0.9	0.004	0.05
119	85.12.15	20.39	38°36'	118°13'	唐山	2.8	4.9	60.6	266	14.1	1.29	0.8
120	85.12.15	23.07	39°39'	118°26'	钱营	2.2	4.8	6.6	271	1.7	0.02	0.1
121	85.12.16	23.51	39°39'	118°50'	滦县	2.1	4.9	18.5	266	4.3	0.12	0.3
122	85.12.19	01.25	39°49'	118°55'	卢龙	2.4	4.8	10.8	271	2.4	0.04	0.1
123	85.12.21	16.50	37°50'	116°47'	南皮东光之间	4.2	4.3	582.2	303	91.5	80.7	6.1
124	85.12.21	22.46	39°46'	118°26'	古冶	1.8	5.1	6.5	255	1.7	0.02	0.1
125	85.12.28	15.25	39.1°N	112.8°E	山西代县	3.0	5.0	87.6	261	21.7	2.87	1.2

(4) 计算波谱与理论波谱的误差

根据文献3)的分析, 计算波谱与理论波谱在拐角频率上的误差约为0.4赫兹。

综合上述, 拐角频率的均方差约为0.6赫兹, 震源半径的误差约为10%左右, 地震矩误差约为10-15%, 应力降误差约为50%, 平均位错误差约为35%。

本项工作得到了北京台网许多同志的帮助, 尤其是计算机组的配合与支持, 仪器组相会议等及赵仲和也给予了帮助, 在此一并表示感谢。

(本文1986年6月26日收到)

(国家地震局地球物理研究所 韦士忠 辛书义)

参 考 文 献

- [1] 王凌南、赵仲和, 南黄海地震系列的波谱分析(一), 地震, No. 8, 1985.
- [2] 林邦慧, 地震频谱和震源参数, 地震, No. 6, 1982.
- [3] 郑治真, 波谱分析基础, 地震出版社, 1979.
- [4] 陈培善等, 唐山地震前后京津唐张地区的应力场, 地球物理学报, Vol. 21, No. 1, 1978.
- [5] Aki and P.G. Richards, Quantitative Seismology, Theory and methods, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1980.

SPECTRAL ANALYSIS OF DIGITAL WAVEFORM RECORD FROM A SEISMIC NETWORK

Wei Shizhong and Xin Shuyi

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

8) 郑治真等, 台湾地区的地震波谱和波谱计算中的误差.