



波形反演震源机制中的权重优化： 应用于 2013 年芦山地震

邓东平¹ 朱良保^{1,2} 王清东¹ 陈浩朋¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉, 430079

2 武汉大学地球空间环境和大地测量重点实验室,湖北 武汉, 430079

摘要: 对剪切-粘贴方法(cut and paste, CAP)和地震软件包(computer programs in seismology, CPS)两个较常用的震源机制格点搜索反演方法的加权策略进行分析,发现二者权重分别仅单独考虑了波形数据信噪比或振幅差异,且权重数值大小随震中距的变化趋势相互冲突。为了解决此数值矛盾并保留二者权重的优势,将两种加权策略进行联合,综合考虑波形信噪比和振幅差异对反演的影响。此外,考虑到震中距定权的粗糙性,提出了针对各波形本身的数据信息精化计算权重方案。为了检验联合定权的优越性,以 2013-04-20 的芦山地震为例,利用 CPS 程序分别用联合及单独定权进行多次反演,比较发现联合加权方法反演结果最优。最终的震源机制解为(走向 $211^{\circ} \pm 3^{\circ}$, 倾角 $41^{\circ} \pm 1^{\circ}$, 滑动角 $94^{\circ} \pm 2^{\circ}$),震源深度 17 km,与其他研究者的研究成果有很好的一致性,且与震源区的应力及地质构造情况均相互吻合,表明所提出的权重方法优化效果明显。

关键词: 震源机制; 波形反演; 芦山地震; 反演权重

中图法分类号:P315

文献标志码:A

利用波形数据反演震源机制,比较常见的方法是将震源机制解的全空间进行网格划分,通过格点搜索数据与模型的最优拟合求得最优解。地震软件包(computer programs in seismology, CPS)的震源机制反演方法^[1]和剪切-粘贴方法(cut and paste, CAP)方法^[2-4]均为应用广泛的格点搜索方法。CAP 加权时给较低振幅的波形较大权重,以平衡不同振幅波形在反演中的影响力,CPS 则侧重赋予高信噪比数据较大权重。实际应用中定权时,考虑到波形振幅及信噪比与震中距的关系,文献[4]在 CAP 中将权重设置为关于震中距递增的幂函数,CPS 方法则使用了震中距的反比例函数作为权重值。幂函数和反比例函数的单调性恰巧相反,导致两种方法权重数值的变化趋势相悖。此外,计算发现,波形振幅或信噪比与震中距的关系难以用简单的初等函数描述,因此,利用幂函数或反比例函数估算的结果往往较粗糙。

为了消除上述权重大小矛盾,本文同时考虑振幅和信噪比差异的影响进行定权,并且对权重

进行精化——针对每道波形直接计算其振幅及信噪比,取代用初等函数估算的值。为了检验联合加权的改进效果,以 2013-04-20 的芦山地震为例,利用 CPS 程序,分别采取单独振幅调节加权、单独信噪比加权以及联合加权的策略进行 3 次反演。

1 方法原理

1.1 格点搜索反演

同步地震点源^[5]激发的地震波场^[6]如式(1)所示。其中 $s(t)$ 为震源时间函数, $G_{nk,j}$ 为格林函数, M_{kj} 为地震矩张量, $d_n(x, t)$ 为位移。利用 M_{kj} 的对称性,同时省略 (x, t) 以及位移分量指标 n , 式(1)可改写为式(2)。

$$d_n(x, t) = M_{kj} [G_{nk,j} * s(t)] \quad (1)$$

$$d = G_i M_i, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

其中, G_i 为格林函数; M_i 为 M_{kj} 中相异的元素。通过波数积分法^[7]可计算出任意一维层状速度模型的格林函数。将格林函数与观测波形代入式(2), 反演计算即可求得最佳矩张量。实际反演

时利用将矩张量与震源机制等价转换^[6], 考虑到震源机制解的全空间(走向 0°~360°, 倾角 0°~90°, 滑动角-180°~180°)较小, 采用全空间格点搜索法, 该方法是全局非线性算法, 相对于线性方法或局部非线性方法更稳定、可靠^[8]。

CPS 使用式(3)定义的互相关函数 F 作为目标函数, 下文反演实验均基于此函数。

$$F = \left[\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 yg(j, m, k) M_m \right]^2 / \left\{ \left[\sum_{j=1}^N yy(j) \right] \left[\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 gg(j, m, n) M_m M_n \right] \right\} \quad (3)$$

其中, M_m, M_n 为 M_k 中相异的元素, 且

$$\left\{ \begin{array}{l} yy(j) = \sum_{h=1}^{H(j)} y(j, h) y(j, h) w(j) \\ gg(j, m, n) = \sum_{h=1}^{H(j)} g_m(j, h) g_n(j, h) w(j) \\ yg(j, m, k) = \sum_{h=1}^{H(j)-|k|} y'(j, h) g'_m(j, h) w(j) \end{array} \right. \quad (4)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} y'(j, h) = y(j, h+k), g'(j, h) = g(j, h), k \geq 0 \\ y'(j, h) = y(j, h), g'(j, h) = g(j, h-k), k < 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

式中, $H(j)$ 、 $w(j)$ 分别为第 j ($j=1, 2, \dots, N$) 道波形的总采样点数及权重; N 为参与反演的观测波形总道数; $y(j, h)$ 、 $g(j, h)$ 分别为式(2)中第 j 道观测波形 d_j 及其对应的格林函数 G_{t_j} 进行相同的数据处理(去噪等)后波形的第 h ($h=1, 2, \dots, H$) 个采样点; k 为使 $yg(j, m, k)$ 取得最大值的整数, 它是文献[3]提出的到时差平移参数, 可有效减小系统性误差的影响。本文反演计算的矩震级采用 $Mw = 2/3(\lg Mo - 16.1)$ 。其中, Mo 为地震标量矩。

1.2 权重优化

CPS 方法从数据的信噪比着手定权, 考虑到信噪比随震中距增加而下降的趋势, 将权重设为震中距的反比例函数, 台站震中距越远的数据权重越小。CAP 方法^[4]则注意到波形间振幅的差

异, 高振幅的波形数据对反演结果起主导作用, 导致低振幅波形的数据信息得不到充分利用。考虑到几何扩散是导致振幅衰减的重要原因, CAP 令 w 为震中距的幂函数, 使得震中距远的台站权重相对较大, 以补偿振幅的衰减。综上可知, CAP 和 CPS 方法的权重分别侧重考虑调节波形振幅和信噪比的差异。振幅调节的作用是当有振幅差异较大的多道波形参与反演时, 防止强振幅的波形主导反演结果, 使不同振幅的波形对反演具有相当的贡献。所以, 当有大量有振幅差异的波形数据参与反演时, 为充分利用各道波形的信息约束反演结果, 必须设置振幅调节权重因子。但另一方面, 振幅调节权重会进一步放大数据信噪比的差异, 所以还应合理考虑信噪比定权, 使高信噪比数据在反演中具有较大的影响力。根据上述分析, 本文联合 CPS 与 CAP 的加权方案, 将信噪比权重项 w_1 与振幅调节权重因子 w_2 的乘积设为最终的权重因子 w 。

CPS 和 CAP 的权重均用震中距的函数进行计算定值, 这主要考虑到地震波有衰减和几何扩散效应, 随着震中距增大波形的振幅会减小, 从而数据信噪比也降低。但实例计算发现, 简单的函数难以精确描述波形振幅或信噪比与震中距的关系, 本文以 2013 年芦山地震未经滤波处理的远场地震波数据为例, 计算分析信噪及振幅随震中距变化的情况。假设地震波直达纵波 P 波之前的噪声数据为该台站观测数据的噪声平均样本, 并设其为高斯白噪声, 分别用观测波形的标准差 S_w 和噪声的标准差 S_n 来衡量其振幅强度, 并用比值 S_n/S_w 评估数据的相对误差。计算得到波形相对误差随震中距变化的关系如图 1(a) 所示, 可以看出相对误差随震中距变化比较散乱。为了使图像更直观展示相对误差随震中距的变化趋势, 图 1(c) 对图 1(a) 中数据点进行最小二乘线性回归分析, 将数据点进行连线并用虚线表示其回归直线, 可以发现相对误差随着震中距增大而明显增加, 表明信噪比确实随着震中距增大而降低。另一方面, 如图 1(d) 所示, 地震波传播的几何扩散效应导致波形振幅强度随着震中距增大逐渐降低。

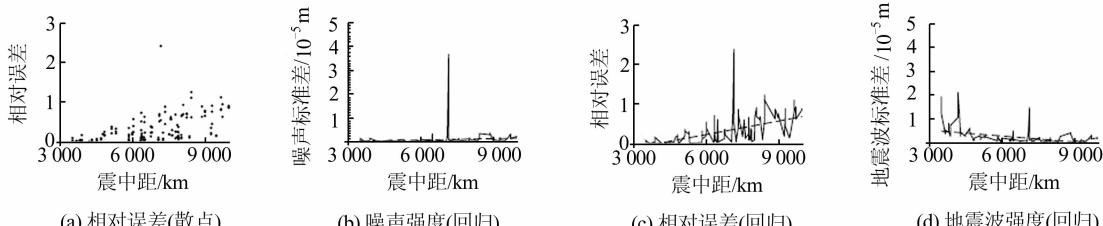


图 1 不同震中距地震波及噪声强度分布

Fig. 1 Distribution of Wave and Noise Energy

虽然上述的线性回归分析表明,震中距与波形的信噪比或者振幅存在一定负相关性,但从图1(c)和图1(d)中也明显看到,相对误差和波形振幅强度随着震中距单调趋势变化过程中均有着不可忽视的波动性,导致它们与震中距的关系难以用简单的初等函数进行描述。这主要是因为波形振幅不仅由震中距决定,地下浅层结构的复杂性等因素也会对振幅造成难以估计的影响,所以尽管图1(b)所示的随机噪声强度随震中距变化一直较平稳,但是波形噪声与振幅比值的相对误差却如图1(c)所示有很大的波动性。因此通过震中距函数计算得到的信噪比或振幅调节权重因子是粗糙的。此外,函数的具体确定也有较强主观性。鉴于以上原因,本文舍弃用震中距表示权重的方法,而利用每道波形本身的数据信息直接进行针对性定权。具体方案为对数据处理后的每道波形,用前文标准差比值的方法评估相对误差 E ,并设 $|1-E|$ 为信噪比权重因子 w_1 ,用波形的 L_2 范数^[2-4] 估计平均振幅,并构造表达式 $1/L_2$ 作为振幅调节权重因子 w_2 ,最终权重 w 即为 $w_1 \times w_2$ 。

2 实例应用

2.1 数据选取

为了验证联合定权的有效性,以 2013-04-20 发生在四川芦山的地震为例,利用远场台站体波(P,S)数据进行震源机制反演。需要注意的是本文仅使用了远场体波数据,一方面是因为近场波形反演对震源区局部的浅层结构误差敏感,芦山地震恰巧位于地壳厚度和波速结构横向变化剧烈之处^[9-10]。文献[11]的研究表明,不同一维模型对近震反演的震源参数影响高达 10° ,而远场波形则对地壳及上地幔的横向非均匀性和震源破裂细节的复杂性不敏感。另一方面,在前文中提到体波相位的系统性误差,理论上可通过平移因子 K 来抵消,但面波具有频散效应,使得 K 无法补偿结构误差对其相位的影响,且面波易受浅层结构横向非均匀性影响,所以反演时舍弃了面波数据。

选取地震学合作研究协会(I Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS)提供的 54 个震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 之间且方位分布较均匀的台站宽频带 P 及 S 波数据,以 AK135 模型^[12] 作为地球参考模型进行反演。经过多次数据除错,最终选取了质量较高的 102 道相对 P 波到时 $(-10, 30)$ s 的时窗并进行 $(0.01 \sim 0.1)$ Hz 带

通滤波(基于频谱分析及滤波实验)的 P 波数据。地震波续至横波 S 波数据总共挑选了 38 道,带通滤波频率为 $(0.005 \sim 0.06)$ Hz,时窗选为相对其到时 $(-30, 100)$ s。格点搜索时震源机制(走向、倾角、滑动角)的搜索步长为 1° ,震源深度的步长为 1 km。为了检验本文提出的 $w_1 \times w_2$ 联合权重的优化效果,用 F 拟合函数分别尝试了 $w_1 \times w_2$ 加权和仅用 w_1 或 w_2 加权 3 种方案的反演。

2.2 结果及对比

本文 3 次反演的结果如表 1 所示, w_2 加权与 $w_1 \times w_2$ 加权的反演结果非常接近,而与 w_1 加权结果差别稍大。总的来说,3 次反演结果均较一致,说明该数据分布较理想,加权是为了使反演结果更合理的一种微调。

表 1 本文 3 种反演方案所得的反演结果

Tab. 1 Results from Three Kinds of Inversions

	w_1	w_2	$w_1 \times w_2$
深度/km	16.0	18.0	17.0
走向/(°)	202	213	211
倾角/(°)	47	41	41
滑动角/(°)	96	95	94
Mw	6.49	6.41	6.41
F	0.782 7	0.582 2	0.605 2

从反演理论可知,适当增加高质量数据的权重可以减小反演结果的误差,并使理论数据与观测值吻合得更好。从图 2 可以发现, $w_1 \times w_2$ 反演与 w_2 单独加权反演的拟合度曲线非常接近,不过后者的拟合度始终略高于前者,这是因为 $w_1 \times w_2$ 加权反演对数据信噪比进行了分析,使得质量较差的数据在反演中的权重有所下降,减弱了较大随机噪声的干扰,导致数据拟合度有所提升。另一方面, w_1 单独加权的反演拟合度是 3 次反演中最高的,这也正是由于 w_1 加权是根据数据随机噪声情况调节权重,使反演的拟合度尽量最高。3 次反演的拟合度大小情况恰好符合 w_1 的理论预期效果。

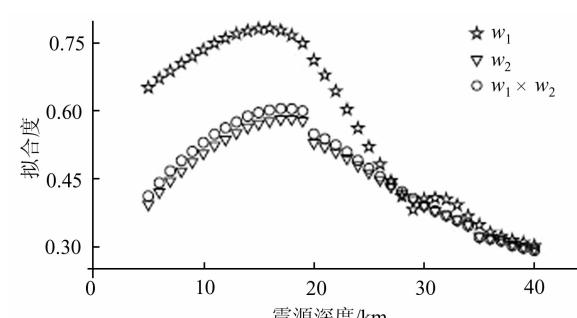


图 2 拟合度随震源深度的变化曲线

Fig. 2 Curve of Fit Depending on Source Depth

但是,使拟合度最高的单独 w_1 加权反演却不见得是三次反演中最好的,下文从震源深度和震源机制的约束效果方面讨论 w_2 的效果。从如图 2 所示的震源深度格点搜索过程中,可以发现 3 次反演的全局最值均在 17 km 附近。其中, $w_1 \times w_2$ 反演与 w_2 反演均只有这一个极值,而 w_1 加权反演则在 33 km 附近还出现了另一局部极值。这说明在同样的数据分布和反演方法情况下, w_1 加权反演对该地震的震源深度约束较差。这是因为地震波 P 波经一次地表反射的 P 波 pP 及地震波 S 波经一次地表反射的 P 波 sP 震相在远震震相中对深度约束作用最好。在本文低频滤波情况下, pP 及 sP 深度震相与 P 震相融合在一起,包含在 P 波时窗中,故 P 波信息对震源深度约束较好。而对于剪切位错源, S 波振幅通常比 P 波振幅大很多,未经 w_2 振幅调节会导致 P 波的信息在反演中得不到充分体现,反演结果更多地关注 S 波的拟合,所以 3 次反演中单独 w_1 加权反演对震源深度约束效果略差于另两次反演。

另一方面,从图 3 中可以看出 w_1 单独加权与 $w_1 \times w_2$ 加权反演过程中,不同深度对应的最佳震源机制情况。很明显, $w_1 \times w_2$ 联合加权的深度搜索过程中震源机制一直较为稳定,而 w_1 单独加权反演中不同深度对应的震源机制差异较大,甚至在全局最值附近走向的变化也较为明显。这表明 $w_1 \times w_2$ 反演的震源机制稳定性比 w_1 单独加权反演要好。这是因为 w_2 权重更好地平衡了不同振幅波形在反演中的影响,使得各种震相信息在反演中得到合理的充分利用,从而能更好地约束震源机制解。

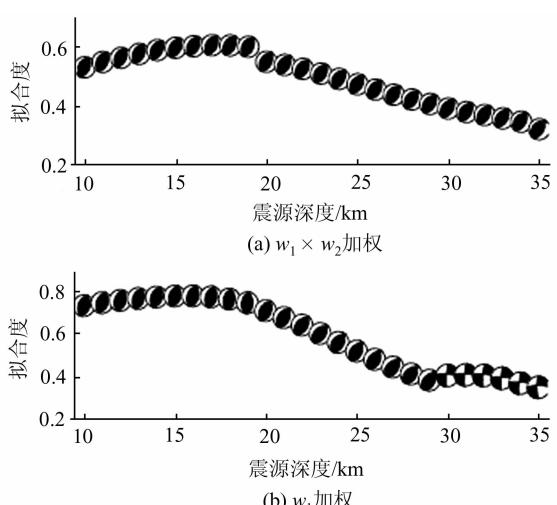


图 3 震源深度对应最佳解

Fig. 3 Best Solution for Each Depth

综上分析, w_1 权重能有效减弱随机噪声影响, w_2 权重则能使反演充分利用各种震相信息,更好约束反演结果,而 $w_1 \times w_2$ 联合加权兼具二者优点。本文 $w_1 \times w_2$ 加权反演的所有台站理论与观测波形拟合情况如图 4 所示,图中 P_z 、 P_r 列分别为 P 波的 Z、R 向分量, S 为 S 波 H 向分量。虚线代表观测波形,实线为理论波形,波形右侧分别为台站名、震中距(km),各道波形的左上方为到时差,其中正值表示理论到时相比实测波提前,负值相反。可以发现 P 波及 S 波拟合得都不错,相位及其振幅均匹配得非常好。值得注意的是,同一台站的 P 波 Z 与 R 分量的时间平移参数非常一致,这是因为平移因子是由地震定位、发震时刻及地球速度结构等系统性误差引起的,且理论上其误差影响对于同一台站的同一震相是相同的。此外,对于不同震中距台站的波形,拟合情况均相当,表明反演综合考虑了所有波形的信息。

进行误差评价时,基于自助法重采样思想,利用携带噪声的数据集进行大量重复反演,以统计得到结果中的误差。设 3 倍中误差为误差上限,同时考虑到格点搜索精度为 1°,最终评价结果为走向 $211^\circ \pm 3^\circ$,倾角 $41^\circ \pm 1^\circ$,滑动角 $94^\circ \pm 2^\circ$ 。

2.3 分析和讨论

芦山地震后,大量研究者对该地震震源机制进行了研究。文献[13]利用文献[14]改进的 P 波初动极性反演方法及近远震波形反演方法得到了较一致的震源机制解,且利用误差曲线分析了倾角和深度的可靠性。文献[15-16]利用 CAP 方法对近震波形反演得到了芦山地震震源机制解,其中文献[16]在波形反演基础上利用余震分布进一步约束了发震断层面。文献[11]利用 CAP 方法分别对近震、远震及近远震联合反演进行对比以得到最佳震源机制。相关研究所得的结果均列于表 2 中,各结果的分布基本为震源深度范围 12 ~ 19 km,震源机制走向 $209^\circ \sim 214^\circ$ 、倾角 $39^\circ \sim 47^\circ$ 、滑动角 $91^\circ \sim 100^\circ$,Mw 震级 6.4 ~ 6.7。本文结果基本在此分布范围内,仅 Mw 震级略小。这一方面可能是由于本文的 F 函数为了降低系统性误差对震源机制的影响,将振幅误差归并到震级评估中;另一方面因为各学者所用的数据及参考模型不尽相同,且除了速度结构、地震定位以及发震时刻的不精确,理论波形的计算方法也可能导致系统性误差,不同程序算得的理论波形虽然相位一致,但振幅也会有一定差异^[17]。此外,文献[9]对地震重定位得到主震震源深度 17.8 km,文献[18]用三维速度模型进行双差重定位,给出

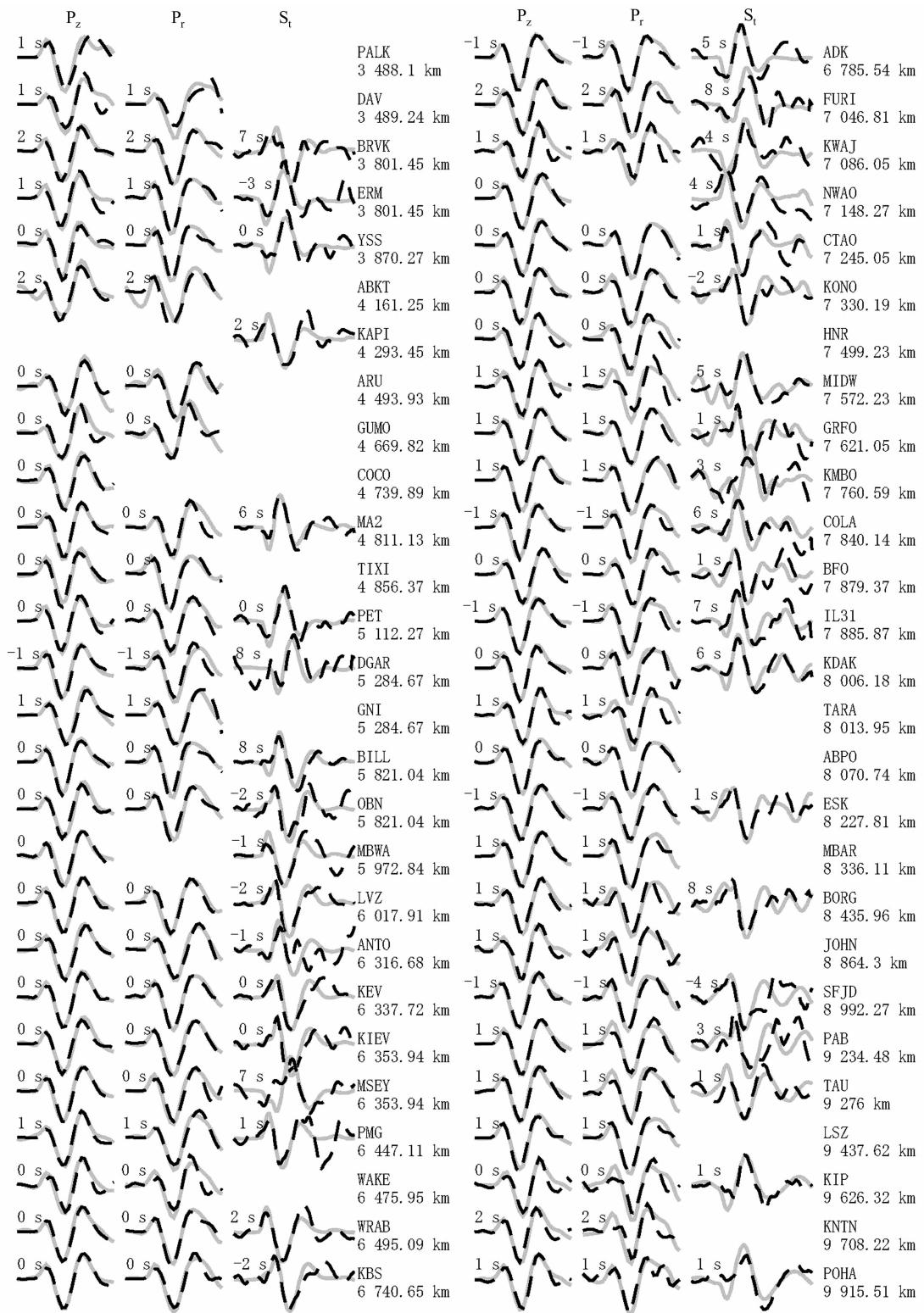


图4 理论波形与实测波形对比图

Fig. 4 Comparison Between Synthetic and Observed Seismograms

的震源深度为 17.2 km 和 17.6 km, 重定位结果均与本文给出的 17 km 震源深度非常接近。其中, 文献[18]使用了接近震中附近的三维速度模型, 并用流动观测台站对早期发生的地震进行校正, 结果较为可信。

震源区的结构如图 5 所示, 其中 $f_1 \sim f_4$ 为龙

门山断裂带的主要 4 大断裂, 灰色大箭头为区域平均应力, 黑色小箭头为本文震源机制对应的主压应力。由于芦山地震发震断裂为盲断裂, 难以直接观测发震断裂的空间构造, 通过余震分布可以一定程度重现发震断裂的结构信息。文献[19]通过双差定位发现在空间分布上主震西南方向余

震分布较广,且较为集中。余震主要向西南方向扩展(图 5 中 AA'剖面),其剖面方向与本文震源机制的走向线 BB'近乎平行,说明余震基本沿主震断层面破裂分布。

表 2 各研究者的芦山地震震源机制

Tab. 2 Results from Other Researchers

研究者	文献[15]	文献[13]	文献[11]	文献[16]	本文
深度/km	19	12	16	14	17
走向/(°)	214	212	210	209	211±3
倾角/(°)	39	47	44	46	41±1
滑动角/(°)	100	93	91	94	94±2
Mw	6.4	6.7	6.7	6.6	6.41

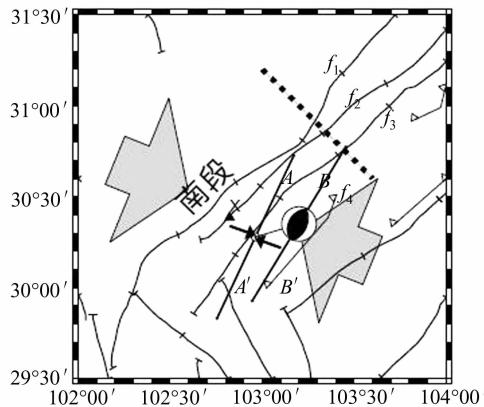


图 5 震源区域断层与应力分布

Fig. 5 Distribution of Faults and Stress Around Epicenter

断层构造活动通常与该区域的应力分布有着密切关系,文献[20]实地钻孔测量研究结果表明龙门山断裂带的水平应力占主导作用,且南段的优势方向为 NWW 向。根据研究,松潘-甘孜地体可能俯冲到四川盆地之下^[21],从而龙门山断裂带南段与青藏高原东部具有较好的连接性,是青藏高原东缘的活动边界。因此,龙门山断裂带南段最大主压应力方向与区域应力场方向一致,为 NW-NWW 向,文献[20]的钻井数据显示距震中较近的宝兴钻井点主应力方向为 N80°W~N74°W。快剪切波偏振的优势方向一般与主压应力方向有较好一致性。文献[15]用剪切波分裂的方法计算发现位于芦山地震震中东北方向的龙门山断裂带中南段的台站快剪切波偏振的优势方向近似为 NW 向,与断裂带走向近似垂直。而在芦山地震震中西南方向的龙门山断裂带南段靠近鲜水河断裂处,快剪切波偏振方向表现得比较离散,但平均方向为近 EW 方向,所以震中区的偏振优势方向应在 NW 与 EW 之间。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)震前

形变观测显示断裂南段震源附近的形变保持闭锁状态,不像中北段有清晰可见的右旋和挤压运动^[22],为右旋逆冲发震积累了一定应力基础。此外,文献[23]利用力轴张量法计算得到的芦山地震余震分布区的平均应力方向约为 112°,如图 6 中灰色大箭头所示。本文震源机制(走向 211°,倾角 41°,滑动角 94°)对应的 P 轴近水平,与上述钻井实测、各向异性分析及力轴张量计算法得到的应力结果有很好的一致性,表明芦山地震主要为区域 NWW 向水平应力长年积累的一次应力释放。

3 结语

振幅调节权重因子保证了在反演中能充分利用不同振幅的波形所包含的信息,信噪比调节权重因子则合理地分配给高质量数据较高优先权。本文所用的权重因子 w 综合考虑了数据信噪比及波形振幅差异对反演的影响,同时针对每道波形数据的实际情况确定权重大小,精化了权重值,使得反演结果更为合理。

芦山地震案例 3 次反演证明了本文所提联合加权方法的优化效果。案例选用远场体波数据进行反演可以降低浅层结构横向非均匀及震源点源近似等系统性误差对震源机制解的影响,反演得到的芦山地震震源机制(走向 211±3°,倾角 41±1°,滑动角 94±2°)显示该地震事件为一次近乎纯逆冲错动破裂,分析表明该地震事件主要为区域 NWW 向水平应力积累的一次释放。

致谢:特别感谢 Doc Herrmann 提供的 CPS 程序及对本文工作的指导。文中波形数据均由 I-RIS 提供并用 sac 处理,理论到时用 Taup 程序计算,所有图像均由 GMT 绘制。

参 考 文 献

- [1] Herrmann R B. Computer Programs in Seismology: An Evolving Tool for Instruction and Research[J]. *Seismological Research Letters*, 2013, 84 (6): 1 081-1 088
- [2] Zhao L S, Helmberger D V. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84 (1): 91-104
- [3] Tan Y, Zhu L, Helmberger D V, et al. Locating and Modeling Regional Earthquakes with Two Stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B1): 997-999

- [4] Zhu L, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(5): 1 634-1 641
- [5] Silver P G, Jordan T H. Optimal Estimation of Scalar Seismic Moment [J]. *Geophysical Journal International*, 1982, 70(3): 755-787
- [6] Jost M, Herrmann R. A Student's Guide to and Review of Moment Tensors[J]. *Seismological Research Letters*, 1989, 60(2): 37-57
- [7] Zhu L, Rivera L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multi-layered Media[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 619-627
- [8] Xu Caijun, Wang Leyang. Progress of Joint Inversion of Geodetic and Seismological Data for Seismic Source Rupture Process[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(4): 457-462(许才军, 王乐洋. 大地测量和地震数据联合反演地震震源破裂过程研究进展[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2010, 35(4): 457-462)
- [9] Gao Yuan, Wang Qiong, Zhao Bo, et al. A Rupture Blank Zone in Middle Southpart of Longmen-shan Faults: Effect After Lushan Ms 7.0 Earthquake of 20 April 2013 in Sichuan, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(6): 1 038-1 046(高原, 王琼, 赵博, 等. 龙门山断裂带中南段的一个破裂空段: 芦山地震的震后效应[J]. 中国科学: D辑, 2013, 43(6): 1 038-1 046)
- [10] Zheng Yong, Ge Can, Xie Zujun, et al. Crustal and Upper Mantle Structure and the Deep Seismogenic Environment in the Source Regions of the Lushan Earthquake and the Wenchuan Earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(6): 1 027-1 037(郑勇, 葛粲, 谢祖军, 等. 芦山与汶川地震震区地壳上地幔结构及深部孕震环境[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(6): 1 027-1 037)
- [11] Xie Zujun, Jin Bikai, Zhen Yong, et al. Source Parameters Inversion of the 2013 Lushan Earthquake by Combining Teleseismic Waveforms and Local Seismograms[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(6): 1 010-1 019(谢祖军, 金笔凯, 郑勇, 等. 近远震波形反演 2013 年芦山地震震源参数[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(6): 1 010-1 019)
- [12] Kennett B, Engdahl E, Buland R. Constraints on Seismic Velocities in the Earth from Traveltimes [J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(1): 108-124
- [13] Zeng Xiangfang, Luo Yan, Han Libo, et al. The Lushan Ms 7.0 Earthquake on 20 April 2013: A High Angle Thrust Event[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(4): 1 418-1 424(曾祥方, 罗艳, 韩立波, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 Ms 7.0 地震: 一个高角度逆冲地震[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1 418-1 424)
- [14] Hardebeck J L, Shearer P M. A New Method for Determining First-Motion Focal Mechanisms [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(6): 2 264-2 276
- [15] Liu Jie, Yi Guixi, Zhang Zhiwei, et al. Introduction to the Lushan, Sichuan M 7.0 Earthquake on 20 April 2013[J]. *Chinese J. Geophys*, 2013, 56(4): 1 404-1 407(刘杰, 易桂喜, 张致伟, 等. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M 7.0 级地震介绍[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1 404-1 407)
- [16] Lu Jian, Wang Xiaoshan, Su Jinrong, et al. Hypocentral Location and Source Mechanism of the Ms 7.0 LuShan Earthquake Sequence[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(5): 1 753-1 763(吕坚, 王晓山, 苏金蓉, 等. 芦山 7.0 级地震序列的震源位置与震源机制解特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1 753-1 763)
- [17] Herrmann R, Wang C. A Comparison of Synthetic Seismograms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(1): 41-56
- [18] Fang Lihua, Wu Jianping, Wang Weilai, et al. Relocation of Mainshock and Aftershock Sequences of Ms 7.0 Sichuan Lushan Earthquake[J]. *China Science Bulletin*, 2013, 20: 1 901-1 909(房立华, 吴建平, 王未来, 等. 四川芦山 Ms 7.0 级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, 2013, 20: 1 901-1 909)
- [19] Zhang Guangwei, Lei Jianshe. Relocations of Lushan, Sichuan Strong Earthquake (Ms 7.0) and Its Aftershocks[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(5): 1 764-1 771(张广伟, 雷建设. 四川芦山 7.0 级强震及其余震序列重定位[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1 764-1 771)
- [20] Meng Wen, Chen Qunce, Wu Manlu, et al. Research on Segmentation and Characteristic of Tectonic Stress Field of Longmenshan Fault Zone[J]. *Progress in Geophys*, 2013, 28(3): 1 150-1 160(孟文, 陈群策, 吴满路, 等. 龙门山断裂带现今构造应力场特征及分段性研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1 150-1 160)
- [21] Lou Hai, Wang Chunyong, Yao Zhixiang, et al. Subsection Feature of the Deep Structure and Material Properties of Longmenshan Fault Zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(5): 128-141(楼海, 王椿墉, 姚志祥, 等. 龙门山断裂带深部构造和物性分布的分段特征[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 128-141)

- (5): 128-141)
- [22] Yang Guohua, Zhu Shuang, Liang Hongbao, et al. Pre-seismic and Co-seismic Deformation of Ms 7.0 Earthquake in Lushan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 121-127(杨国华, 朱爽, 梁洪宝, 等. 芦山 Ms 7.0 级地震震前及同震地表形变[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2015, 40(1): 121-127)
- [23] Zhao Bo, Gao Yuan, Huang Zhibin, et al. Double Difference Relocation, Focal Mechanism and Stress Inversion of Lushan Ms 7.0 Earthquake Sequence [J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(10): 3 385-3 395(赵博, 高原, 黄志斌, 等. 四川芦山 Ms 7.0 地震余震序列双差定位, 震源机制及应力场反演 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3 385-3 395)

Improved Weighting for Focal Mechanism Inversion: Application to the 2013 Lushan Earthquake Data

DENG Dongping¹ ZHU Liangbao^{1,2} WANG Qingdong¹ CHEN Haopeng¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: We discuss weighting in two grid searching methods, cut and paste (CAP) and computer programs in deismology (CPS), to determine source mechanisms from waveform inversion. We found their weightings differs; CAP weighting focuses on the influence from amplitude only; while CPS stresses the difference of SNR for all waveforms. The weighting from the two methods are incompatible, as CAP weighting increases when epicentral distance increases, while CPS weighting decreases. In order to take advantage of these two weighting methods, we combined them and improved the precision of weighting by estimating the amplitude or relative error from the waveform itself. By applying grid search inversion on the 2013 LuShan earthquake data, we show the advantages of our weighing method in a comparison of three experiments based on CPS with different weightings: SNR weighting (CPS), amplitude weighting(CAP) and our improved weighting(CPS&CAP). The preferred source mechanism of LuShan earthquake from our study were strike $211 \pm 3^\circ$, dip $41 \pm 1^\circ$, and rake $94 \pm 2^\circ$ and source depth was 17km, and consistent with the mechanisms other researchers have found for stress distribution and geological structure. The case affirms the advantages of our weighting.

Key words: source mechanism; waveform inversion; Lushan Earthquake; weighting

First author: DENG Dongping, master, specializes in inversion of natural source mechanism. E-mail: dpdeng@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHU Liangbao, PhD, professor. E-mail: lbzhu@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41374053.