

DOI:10.13203/j.whugis20170382



文章编号:1671-8860(2019)09-1265-09

大地测量地震断层同震滑动分布反演的 两步解法

王乐洋^{1,2} 赵雄² 高华²

1 山东科技大学测绘科学与工程学院,山东 青岛,266590

2 东华理工大学测绘工程学院,江西 南昌,330013

摘要:针对同震滑动分布反演中系数矩阵出现病态的问题,提出两步解法,并在两步解法反演过程中引入拉普拉斯二阶平滑矩阵进行平滑约束。该方法不仅改善了系数矩阵的病态问题,同时也很好地抑制了相邻断层面间出现大的梯度变化。在两步解法反演过程中,用L曲线法确定正则化参数。系统模拟实验表明,对于最大滑动量,该方法的反演结果较一步最小二乘法的反演结果精度提高了3.34%~19%;对于均方根误差,该方法的反演结果较一步最小二乘法减小了3.3%~13.3%。芦山地震反演结果表明,利用两步解法进行滑动分布反演是可行的。

关键词:同震滑动分布反演;两步解法;一步解法;拉普拉斯二阶平滑矩阵;最小二乘法;芦山地震

中图分类号:P228;P315 文献标志码:A

大地测量反演是大地测量学科深入地球科学研究领域的核心手段,利用大地测量资料反演地震震源机制是地学领域的前沿研究热点^[1]。大地测量地震反演的主要目的是通过大地测量技术获得地表形变位移,再利用反演算法求解地震震源参数。由于大地测量数据观测面广、精度高、反演出的滑动分布结果精细、全面,故基于大地测量观测资料(GPS、合成孔径雷达干涉数据等)反演同震滑动分布是当今国内外许多学者研究震源参数的重要手段^[2-5]。

在震源机制研究中,位错模型是反演震源参数的有效模型^[6-7]。利用弹性半空间均匀矩形位错模型反演地震震源参数,通常包括非线性断层几何参数反演和线性滑动分布反演两个过程^[8]。地震同震滑动分布反演是震源位错模型几何参数确定后的线性反演,此时断层滑动量与地表同震位移之间为线性关系。地震同震滑动分布反演通常可以采用一步最小二乘法解法(简称一步解法)^[9]或总体最小二乘法^[10-13]。

利用一步解法(one-step solution,OSS)和总体最小二乘法进行地震同震滑动分布反演的结果相近,但两种方法往往会低估最大滑动量^[14]。

针对此问题,本文在文献[15]两步解法的基础上,引入拉普拉斯二阶平滑矩阵^[16]构成第一步解中的正则化矩阵,在求得滑动参数的均方误差矩阵的逆矩阵后,取其与第一步解中正则化矩阵非零元素对应位置的元素构成第二步解的正则化矩阵。首先将此方法应用于同震滑动分布反演并进行系统模拟实验,然后将该方法应用于2013年芦山Mw7.0实际震例,探讨两步解法在地震同震滑动分布反演中的可行性和优势。

1 两步解法的基本原理

1.1 基本方程

在地震同震滑动分布反演过程中,地表同震位移与断层滑动量之间为线性关系,可以表示为^[1]:

$$d = Gm + \epsilon \quad (1)$$

式中, G 为格林函数矩阵; d 为地表形变数据; m 为滑动参数向量, 在同震滑动分布反演中需要加入非负约束条件来解决整个断层面上出现反向滑动的问题, 故本文令 m 中的元素均大于 0; ϵ 为随机观测误差。根据 Tikhonov 正则化原理, 相应

收稿日期:2018-08-16

项目资助:国家自然科学基金(41874001, 41664001);江西省杰出青年人才资助计划(20162BCB23050);国家重点研发计划(2016YFB0501405)。

第一作者:王乐洋,博士,教授,主要研究方向为大地测量反演及大地测量数据处理。wleyang@163.com

的准则为:

$$\|Gm - d\|^2 + \alpha m^T R_1^T R_1 m = \min \quad (2)$$

式中, $R_1^T R_1$ 为正则化矩阵; $\|\cdot\|$ 为二范数; α 为正则化参数, 一般可以通过拟合残差和模型粗糙度之间的折中曲线来确定^[17-18]。

本文将文献[15]提出的两步解法(two-step solution, TSS)进行改进, 文献[15]第一步解采取的正则化矩阵为单位矩阵 I , 而本文第一步解采取的正则化矩阵 T 是由拉普拉斯二阶平滑矩阵 H 构成(其中 $T = H^T H$, 实为关于主对角线对称的均匀对称矩阵)。第一步解的正则化参数 α_1 可通过 L 曲线法求得, 则由文献[15]知第一步解的滑动参数解可表达如下:

$$m_1 = (G^T G + \alpha_1 T)^{-1} G^T d \quad (3)$$

对应的均方误差矩阵为^[19]:

$$A(m_1) = \hat{\sigma}_0^2 (G^T G + \alpha_1 T)^{-1} \quad (4)$$

式中, $A(m_1)$ 表示 m_1 的均方误差矩阵; $\hat{\sigma}_0^2$ 为单位权方差估值。

文献[15]两步解法的第二步解是将第一步解得到的均方误差矩阵求逆, 取对角元素构成第二步解的正则化矩阵。由于文献[15]第一步解的正则化矩阵由单位矩阵构成, 而本文第一步解的正则化矩阵 T 由拉普拉斯二阶平滑矩阵构成, 故本文将第一步解的均方误差矩阵求逆后, 取与第一步解的正则化矩阵中非零元素位置对应的元素构成第二步解的正则化矩阵 R 。相应的第二步解的正则化参数 α_2 的值会影响观测数据的拟合程度以及相邻断层块间梯度的约束程度, α_2 可用 L 曲线法求取, 则第二步解的滑动参数解可表达为:

$$m_2 = (G^T G + \alpha_2 R)^{-1} G^T d \quad (5)$$

相应的均方误差矩阵为:

$$A(m_2) = \hat{\sigma}_0^2 (G^T G + \alpha_2 R)^{-1} \quad (6)$$

式中, R 为两步解法第二步解对应的正则化矩阵。

两步解法的本质是在第二步解中选择一个比第一步解更合适的正则化矩阵, 从而使反演结果有所改善^[15]。

1.2 两步解法性质

在利用 Tikhonov 正则化法求解过程中, 正则化参数一般大于 0, 在此情况下, 若 m_1 的均方误差 $B(m_1)$ 大于 m_2 的均方误差 $B(m_2)$, 则可说明两步解法在均方根误差意义下的反演结果要优于一步解法。由于均方根误差为均方误差的算术

平方根, 在比较大小时, 均方误差可以有效地代表均方根误差的大小, 为了便于公式推导, 本文采用均方误差进行公式推导。

根据两步解法的定义可知, $R = T_1 + \alpha_1 T$, 此处 T_1 为 $G^T G$ 中与 T 中非 0 位置对应的元素; 设单位权方差为 1, 由于 $G^T G$ 非负定, 所以 $\text{tr}(R) > \text{tr}(T)$ 。设 T 的特征值为 $T_1, T_2 \dots T_n$, R 的特征值为 $R_1, R_2 \dots R_n$, $G^T G$ 矩阵的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$, 且 $\lambda_i > 0$ 。由式(4)、式(6)及文献[20]得到 m_1 、 m_2 的均方误差为:

$$B(m_1) = \text{tr}(A(m_1)) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i + \alpha_1 T_i} \quad (7)$$

$$B(m_2) = \text{tr}(A(m_2)) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i + \alpha_2 R_i} \quad (8)$$

令 $\Delta k = B(m_1) - B(m_2)$, 由式(7)、式(8)可知:

$$\Delta k = \frac{\alpha_2 R_i - \alpha_1 T_i}{(\lambda_i + \alpha_1 T_i)(\lambda_i + \alpha_2 R_i)} \quad (9)$$

式中, n 为正则化矩阵 R 中的特征值个数。若 $\Delta k > 0$, 说明两步解法在均方根误差意义下的反演精度优于一步解法, 优势条件讨论如下:

1) 若 $R_i > \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, \lambda_i + \alpha_1 T_i > 0, \lambda_i + \alpha_2 R_i >$

0, 即当 $R_i > \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, \lambda_i > -\alpha_1 T_i$ 时, $\Delta k > 0$ 。

2) 若 $R_i > \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, \lambda_i + \alpha_1 T_i < 0, \lambda_i + \alpha_2 R_i <$

0, 即当 $R_i > \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, \lambda_i < -\alpha_2 R_i$ 时, $\Delta k > 0$ 。

3) 若 $R_i < \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, \lambda_i + \alpha_1 T_i > 0, \lambda_i + \alpha_2 R_i <$

0, 即当 $R_i < \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, -\alpha_1 T_i < \lambda_i < -\alpha_2 R_i$ 时, $\Delta k > 0$ 。

综上可以看出, 当 $R_i > \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, \lambda_i > -\alpha_1 T_i$ 或

$\lambda_i < -\alpha_2 R_i$ 以及当 $R_i < \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i, -\alpha_1 T_i < \lambda_i <$

$-\alpha_2 R_i$ 时, $\Delta k > 0$, 此时两步解法的反演结果在均方根误差意义下要优于一步解法。

2 模拟地震实验

为了验证本文方法的可行性, 进行了系统模拟实验, 模拟实验 1~6 的预设参数见表 1。模拟 GPS 三方向观测点如图 1 所示, 并给形变点施加观测误差 $E(0, 3^2 \text{ mm}^2)$ 。

表 1 模拟实验预设模型参数
Tab.1 Default Model Parameters for Simulation Experiments

预设参数	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5	实验 6
断层块边长/km	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2
最大滑动量/m	1.472	1.472	1.472	1.472	1.472	1.500
平均滑动量/m	0.3104	0.3104	0.3104	0.3104	0.3104	0.3105
滑动角/(°)	43	43	43	43	65	43
断层走向/(°)	70	55	70	70	70	70
断层倾向/(°)	50	50	65	50	50	50
震源深度/km	12.5	12.5	12.5	10.8	12.5	12.5
矩震级	Mw6.582	Mw6.582	Mw6.582	Mw6.582	Mw6.582	Mw6.583

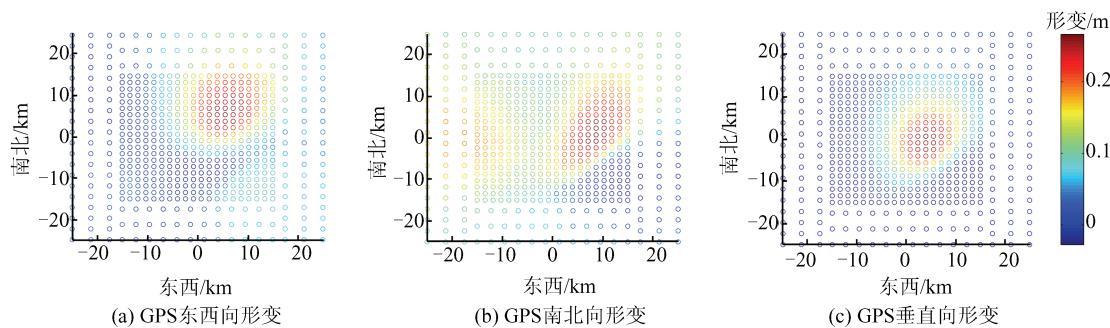


图 1 GPS 三方向模拟观测点
Fig.1 Simulated Observation Points of GPS Three Directions

利用 L 曲线法确定模拟实验 1~6 的正则化参数 α_1, α_2 , 其中 TSS 法第一步解法中的正则化

参数与 OSS 法正则化参数一致, 本文以模拟实验 1 的 L 曲线图为例进行展示, 如图 2 所示。

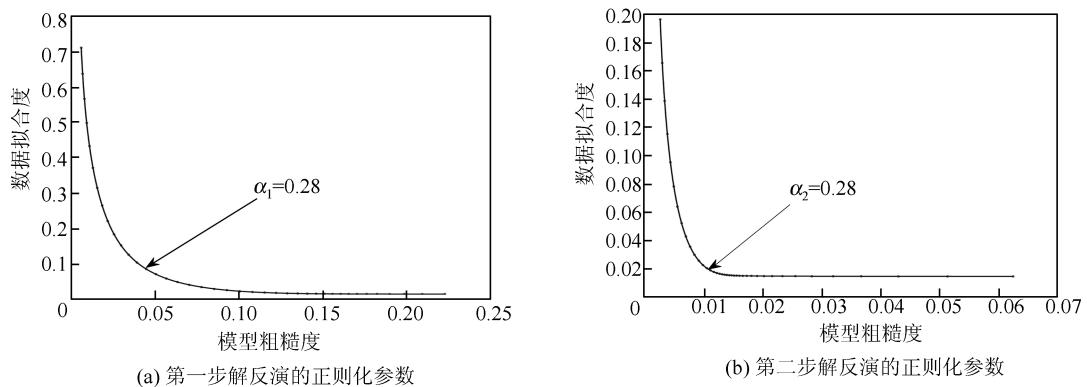


图 2 利用 L 曲线法确定正则化参数
Fig.2 Regularization Parameters Determined by L -curve Method

模拟实验 1~6 分别利用 OSS 法及 TSS 法反演的结果见表 2, 两种方法反演结果与真值的差值以及 TSS 法较 OSS 法的提升程度见表 3, 两种方法反演同震滑动分布如图 3 所示。

从表 2、表 3 可以看出, 对于最大滑动量, TSS 法的反演结果较一步解法的精度提高 6.5%~12.5%; 对于平均滑动量, TSS 法较 OSS 法精度提高 2%~4%; 对于矩震级参数, TSS 法反演结果比 OSS 法反演结果更接近真值, 但两种方法差值相差不大。对于均方根误差, TSS 法的反演结

果均小于 OSS 法, 进一步表明本文 TSS 法的反演精度要优于 OSS 法。

两种方法的本质区别在于选取的正则化矩阵不同, OSS 法选取的正则化矩阵为 T , 而 TSS 法所选取的正则化矩阵为 R (T 与 R 之间的关系见 §1.2 两步解法性质)。§1.2 的优势条件与两种方法所选取的正则化矩阵的特征值 (T_i, R_i)、矩阵 $G^T G$ 的特征值 λ_i 以及所选取的正则化参数 α_1, α_2 有关。对于本文的 6 组模拟实验, 分别计算两种方法所选取的正则化矩阵与矩阵 $G^T G$ 的特征值

T_i, R_i, λ_i , 求出在6组实验中 $T_i, R_i, \alpha_1, \alpha_2$ 之间的关系均为 $R_i > \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i$, 满足§1.2两步解法性质中所

推导的TSS法在均方误差条件下的反演结果优于OSS法的优势条件1)、2)。

表2 模拟实验两种方法反演结果

Tab.2 Inversion Results of Two Methods for Simulation Experiments

方法	参数	实验1	实验2	实验3	实验4	实验5	实验6
OSS法	最大滑动量/m	1.250	1.240	1.196	1.249	1.207	1.312
	平均滑动量/m	0.318	0.321	0.322	0.320	0.324	0.318
	矩震级	Mw6.589	Mw6.592	Mw6.593	Mw6.591	Mw6.594	Mw6.589
	均方根误差/mm	3.0	3.1	3.1	3.1	3.0	3.0
TSS法	平滑因子 α_1	0.28	0.3	0.18	0.27	0.29	0.25
	最大滑动量/m	1.388	1.334	1.373	1.378	1.371	1.423
	平均滑动量/m	0.311	0.313	0.315	0.315	0.314	0.310
	矩震级	Mw6.583	Mw6.585	Mw6.587	Mw6.586	Mw6.586	Mw6.582
	均方根误差/mm	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	2.8
	平滑因子 α_1/α_2	0.28/0.28	0.28/0.24	0.18/0.25	0.27/0.25	0.29/0.23	0.25/0.22

表3 模拟实验两种方法反演结果与真值的比较

Tab.3 Comparison of the Inversion Results of Two Methods with True Values for Simulation Experiments

方法	参数	实验1	实验2	实验3	实验4	实验5	实验6
OSS法	最大滑动量/m	0.222	0.232	0.276	0.224	0.266	0.188
	平均滑动量/m	0.007	0.011	0.012	0.009	0.013	0.007
TSS法	最大滑动量/m	0.084	0.138	0.099	0.094	0.101	0.077
	平均滑动量/m	0.001	0.003	0.005	0.004	0.004	0
TSS较OSS提升比	最大滑动量/%	9.37	6.38	12.05	8.80	11.16	7.38
	平均滑动量/%	2.02	2.74	2.23	1.71	3.06	2.29
	均方根误差/%	10.00	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67

已知 T_i, R_i, λ_i 构成的3个矩阵为对角矩阵, 且对角线上的元素为特征值。矩阵维度与断层块数有关, 实验1~5的特征值构成的矩阵维度均

为 800×800 , 实验6的特征值构成的矩阵维度为 450×450 , 则实验1~6中 $T_i, R_i, \lambda_i, \alpha_1, \alpha_2$ 与TSS法在均方根误差下优于OSS法条件的关系见表4。

表4 模拟实验特征值位置与TSS法优势条件之间的关系

Tab.4 Relationship Between the Location of Eigenvalues and the Dominant Conditions of TSS Method in Simulation Experiments

条件	特征值位置					
	实验1	实验2	实验3	实验4	实验5	实验6
满足 $\lambda_i < -\alpha_2 R_i$	1~737	1~739	1~739	1~739	1~738	1~387
满足 $\lambda_i > -\alpha_1 T_i$	762~800	767~800	761~800	763~800	763~800	411~450

注: 特征值位置是指在特征值矩阵中特征值沿着对角线从左上到右下排列所对应的位置

由于在模拟实验1~6中, $T_i, R_i, \alpha_1, \alpha_2$ 之间的关系均满足 $R_i > \frac{\alpha_1}{\alpha_2} T_i$, 故表4只考虑了特征值的位置与§1.2推导出的TSS法优势条件1)、2)之间的关系。由表4可知, 在模拟实验1~6中, 当特征值的位置 i 分别位于 1~737、1~739、1~739、1~739、1~738、1~387 时, $T_i, R_i, \lambda_i, \alpha_1, \alpha_2$ 之间的

关系满足§1.2推导的TSS法优势条件2); 当 i 的位置分别位于 762~800、767~800、761~800、763~800、763~800、411~450 时, $T_i, R_i, \lambda_i, \alpha_1, \alpha_2$ 之间的关系满足§1.2推导的TSS法优势条件1); 当 i 的位置分别位于 738~761、740~766、740~760、740~762、739~762、388~410 时, $T_i, R_i, \lambda_i, \alpha_1, \alpha_2$ 之间的关系不符合§1.2推导的TSS法3个

优势条件,但由于其数量相对于特征值总数(800 和 450)来说较少,且在数值上与其他特征值相差不大,所以没有影响到最终整体 Δk 大于 0 的结果。由表 4 可知,将 TSS 法用于地震同震滑动分布反演中,因其正则化矩阵 R 与 OSS 法所采用的正则化矩阵 T 之间的关系为 $R = T_1 + \alpha_1 T$,故在反演过程中 TSS 法易满足在均方根误差意义下优于 OSS 法。

为进一步探讨本文方法在最大滑动量与均方根误差意义下较 OSS 法反演结果有所提高与各断层参数变化之间的规律,分别在断层走向($0^\circ \sim 360^\circ$)每间隔 20° 取值,断层倾向($0^\circ \sim 90^\circ$)每间隔 15° 取值,滑动角($-180^\circ \sim 180^\circ$)每间隔 30° 取值,断层顶深($0 \sim 20$ km)每间隔 2 km 取值,以及在断层块边长分别取值 1.0 km、 1.5 km、 2.0 km、 3.0 km 进行滑动分布反演,最终最大滑动量与均方根误差随各断层参数的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,无论断层参数怎样变化,TSS 法的反演结果在最大滑动量和均方根误差意义下均要优于 OSS 法。对于最大滑动量,随着各断层参数的变化,TSS 法的反演结果较 OSS 法的反演精度提高 $3.34\% \sim 19\%$ 。对于均方根误差,TSS 法的反演精度较 OSS 法减少 $3.3\% \sim 13.3\%$ 。模拟实验反演结果表明,两步解法在最大滑动量、平均滑动量、矩震级以及均方根误差等参数反演精度上较一步解法有所提高,尤其是最大滑动量的提升比较明显,这可能与 TSS 法确定的正则化矩阵较 OSS 法更适应于反演模型有关。

3 芦山地震滑动分布反演

本文从文献[5]中获取 2013 年芦山地震的 GPS 三维形变数据,利用文献[10]非线性反演得到的芦山地震断层参数来固定断层破裂面,在此基础上将断层破裂面沿断层走向、倾向设置断层面长和宽均为 51 km,并将破裂面延伸至地表,将断层面均匀剖分成 1.5 km \times 1.5 km 大小的矩形单元,利用本文两种方法(OSS 法、TSS 法)进行反演,并计算两种方法反演结果的数据拟合度,公式为:

$$M = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - d_i^*)^2}{\sum_{i=1}^N d_i^2}} \quad (10)$$

式中, M 表示数据拟合度; d_i 表示第 i 个地表观测

位移值; d_i^* 表示模型反演计算出的第 i 个地表位移值; N 表示观测值个数。

本文两种方法的最优正则化参数分别为 $\alpha_1 = 0.19$, $\alpha_2 = 0.41$ 。两种方法反演的芦山地震水平方向形变与水平方向观测形变如图 5 所示,滑动分布反演结果如图 6 所示,两种方法与国内外部分学者研究芦山地震的滑动参数结果见表 5。

由图 5 可以看出,TSS 法反演的芦山地震水平方向形变较 OSS 法反演结果与观测形变拟合程度更高,更能真实地反映芦山地震水平方向观测形变,反演效果更好。表 5 给出了 2013 年芦山地震 Mw7.0 级地震震源参数的研究成果^[21-23]。从表 5 中可以看出,本文方法反演的最大滑动量为 0.65 m, 略大于 OSS 法的反演结果,这可能与两种方法反演时对应的正则化矩阵有关。文献[22]综合地震震源机制及断层的地质构造资料确定出断层的位置、走向、倾角等参数,反演出的最大滑动量为 1.59 m, 文献[23]反演得到的最大滑动量为 0.61 m, 其结果也小于通过格网搜索法均匀反演得到的 0.70 m。从图 6(c)、6(d)、6(g)、6(h)可以看出,芦山地震在垂直方向的滑动比水平方向上的滑动更大一些;从反演结果得到的矩震级和矩张量来看,本文方法反演的矩张量为 1.19×10^{19} N·m, 对应的矩震级为 Mw6.68, 与 OSS 法的反演结果相近。均匀滑动反演的矩张量和矩震级分别为 0.72×10^{19} N·m、Mw6.54, 均匀滑动将断层面看作均匀整体,所以可能遗漏了细节滑动,导致整体矩张量偏小。而文献[22]反演的矩张量及矩震级分别为 1.54×10^{19} N·m、Mw6.7, 相比其他几位学者反演的矩张量和矩震级更大。从以上分析可以看出,由于数据来源和预设的断层位置、走向、倾向、断层单元大小等参数不同,导致最后反演得出的矩震级、最大滑动量等参数结果出现差异。总之,本文方法反演的参数结果均在其他学者的反演范围内,表明利用两步解法进行地震同震滑动分布反演是可行的。

4 结语

本文将文献[15]提出的用于解决病态问题的两步解法应用到地震同震滑动分布反演中,改善了系数格林矩阵的病态问题,同时很好地抑制了相邻断层面间出现大的梯度变化,为地震同震滑动分布反演增加了一条新的途径。

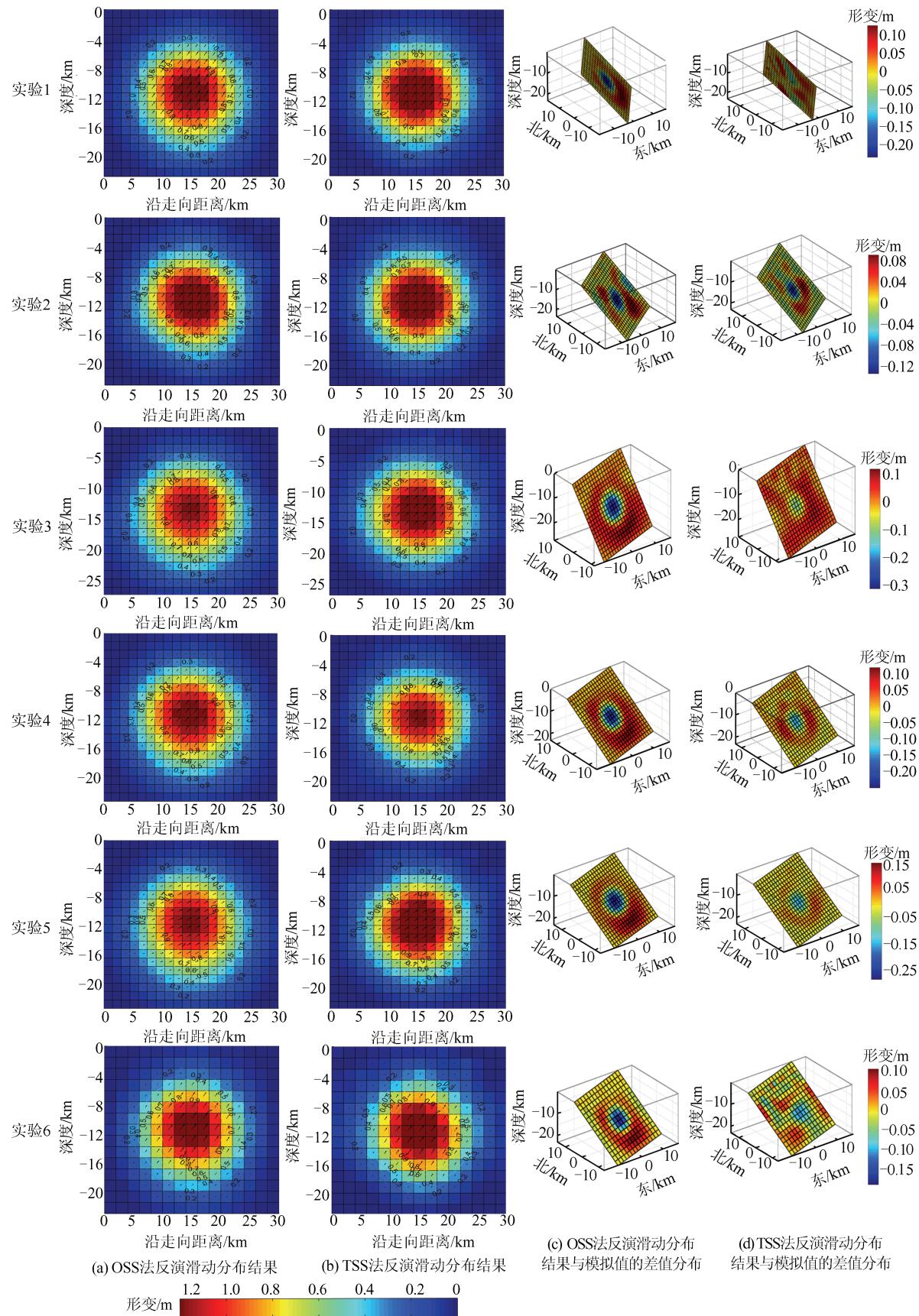


图3 模拟实验同震滑动分布反演结果

Fig.3 Inversion Results of Co-seismic Slip Distribution for Simulation Experiments

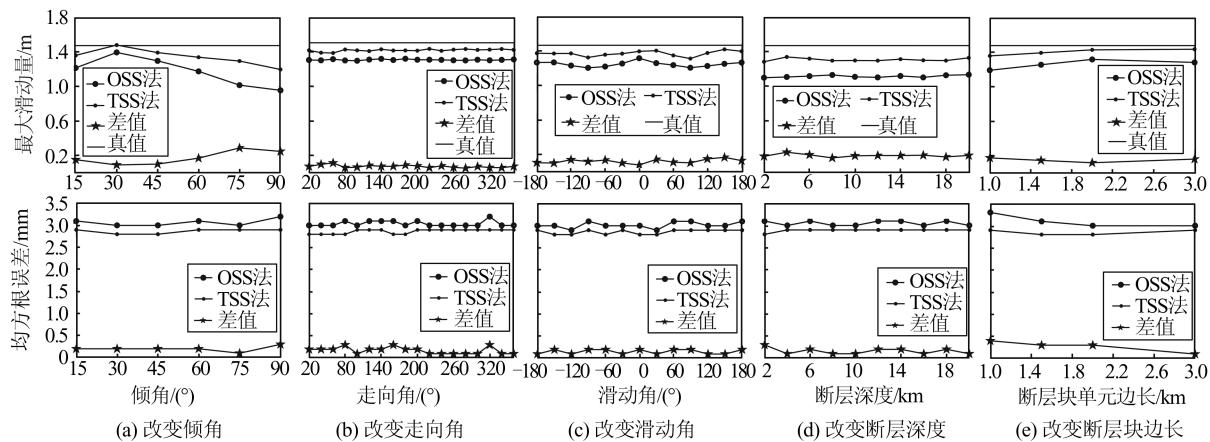


图 4 改变断层参数对最大滑动量和均方根误差的影响

Fig.4 Influence of Changing the Fault Parameters of the Maximum Slip and the Root Mean Square Error

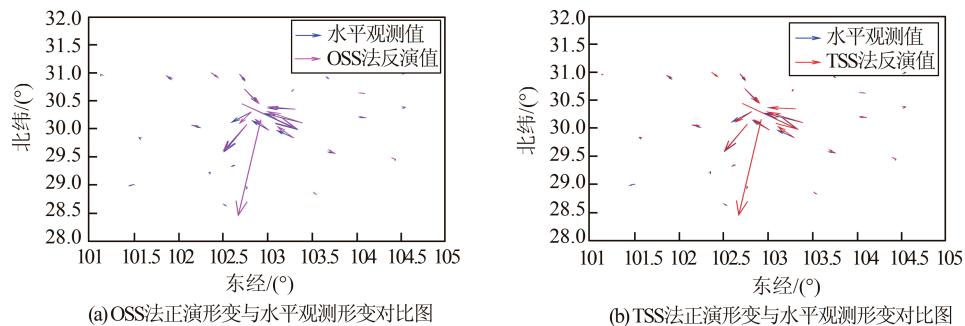


图 5 芦山地震水平方向观测形变

Fig.5 Observation Deformation in the Horizontal Direction of Lushan Earthquake

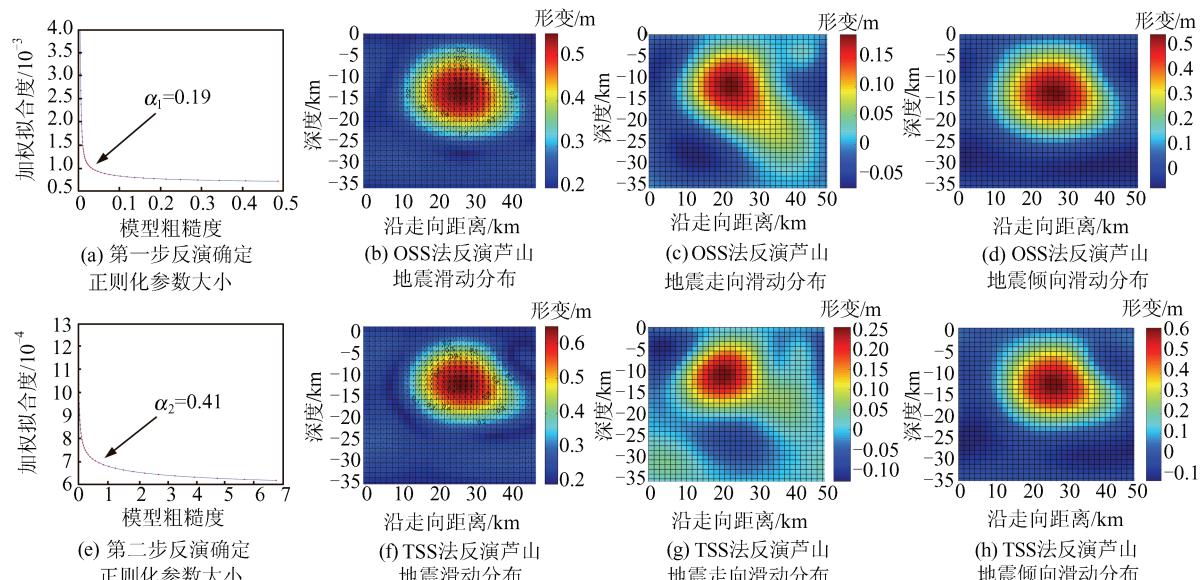


图 6 芦山地震同震滑动分布反演结果

Fig.6 Inversion Results of Co-seismic Slip Distribution of Lushan Earthquake

本文推导了在均方根误差意义下利用两步解法进行地震同震滑动分布反演结果优于一步解法的条件,通过系统的模拟实验证实了在均方根误差意义下两步解法的优势条件易于实现,这可能与两步解法反演中正则化矩阵的特殊构造

有关。此外,系统模拟算例与芦山实际地震算例均证实了利用两步解法进行地震同震滑动分布反演是合理的,且模拟实验的反演结果表明,两步解法在最大滑动量、平均滑动量、矩震级以及均方根误差等参数反演精度上较一步解法有所

提高,尤其是最大滑动量的提升比较明显,这可能与两步解法所构建的正则化矩阵较一步解法

更适应反演模型有关,至于更具体的原因有待于进一步的探索与研究。

表5 芦山地震断层几何参数及滑动参数

Tab.5 Geometric Parameters and Slip Parameters of Lushan Earthquake Fault

来源	滑动角/(°)	最大滑动量/m	断层长度/m	矩张量/(10 ¹⁹ N·m)	矩震级	数据拟合度
均匀滑动	80.13	0.75	21.94	0.72	Mw6.54	—
TSS法	70.62	0.65	51	1.19	Mw6.68	0.763
OSS法	70.37	0.55	51	1.07	Mw6.65	0.741
文献[21]	71	0.91	31.2	0.53	Mw6.45	—
文献[22]	—	1.59	—	1.54	Mw6.7	—
文献[23]	71	0.61	46	0.95	Mw6.6	—
USGS	93	—	—	—	Mw6.5	—
CENC	95	—	—	—	—	—

注:USGS为美国地质调查局(United States Geological Survey),CENC为中国地震台网中心(China Earthquake Networks Center)

参 考 文 献

- [1] Xu Caijun, Deng Changyong, Zhou Lixuan. Coseismic Slip Distribution Inversion Method Based on Variance Component Estimation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1):37-44(许才军,邓长勇,周力璇.利用方差分量估计的地震同震滑动分布反演[J].武汉大学学报·信息科学版,2016,41(1):37-44)
- [2] Funning G, Parsons B, Wright T, et al. Surface Displacements and Source Parameters of the 2003 Bam (Iran) Earthquake from Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar Imagery [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B9):1-23
- [3] Xu Caijun, Liu Yang, Wen Yangmao. Mw7.9 Wenchuan Earthquake Slip Distribution Inversion from GPS Measurements [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3):195-201(许才军,刘洋,温扬茂.利用GPS资料反演汶川Mw7.9级地震滑动分布[J].测绘学报,2009,38(3):195-201)
- [4] Zhang Guohong, Qu Chunyan, Song Xiaogang, et al. Slip Distribution and Source Parameters Inverted from Coseismic Deformation Derived by InSAR Technology of Wenchuan Mw7.9 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(2): 269-279(张国宏,屈春燕,宋小刚,等.基于InSAR同震形变场反演汶川Mw7.9地震断层滑动分布[J].地球物理学报,2010,53(2):269-279)
- [5] Jiang Z, Wang M, Wang Y, et al. GPS Constrained Coseismic Source and Slip Distribution of the 2013 Mw6.6 Lushan, China, Earthquake and Its Tectonic Implications [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2):407-413
- [6] Okada Y. Surface Deformation to Shear and Tensile Faults in a Half Space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1 135-1 154
- [7] Okada Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Fault in a Half Space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 92(2): 1 018-1 040
- [8] Sun Jianbao, Xu Xiwei, Shen Zhengkang, et al. Parameter Inversion of the 1997 Mani Earthquake from InSAR Co-seismic Deformation Field Based on Linear Elastic Dislocation Model-I Uniform Slip Inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(4):1 097-1 110(孙建宝,徐锡伟,沈正康,等.基于线弹性位错模型及干涉雷达同震形变场反演1997年玛尼Mw7.5级地震参数-I 均匀滑动反演[J].地球物理学报,2007,50(4):1 097-1 110)
- [9] Wang Leyang, Xu Caijun, Wen Yangmao. Fault Parameters of 2008 Qinghai Dachaidan Mw6.3 Earthquake from STLN Inversion and InSAR Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2):168-176(王乐洋,许才军,温扬茂.利用STLN和InSAR数据反演2008年青海大柴旦Mw6.3级地震断层参数[J].测绘学报,2013,42(2):168-176)
- [10] Wang Leyang, Li Haiyan, Wen Yangmao, et al. Total Least Squares Method Inversion for Co-seismic Slip Distribution [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 307-315(王乐洋,李海燕,温扬茂,等.地震同震滑动分布反演的总体最小二乘方法[J].测绘学报,2017,46(3):307-315)
- [11] Wang Leyang. Research on Theory and Application of Total Least Squares in Geodetic Inversion [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011(王乐洋.基于总体最小二乘的大地测量反演理论及应用研究[D].)

- 武汉:武汉大学,2011)
- [12] Wang Leyang, Xu Caijun, Lu Tieding. Ridge Estimation Method in Ill-posed Weight Total Least Squares Adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(11): 1 346-1 350(王乐洋,许才军,鲁铁定. 病态加权总体最小二乘平差的岭估计解法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(11):1 346-1 350)
- [13] Wang Leyang, Yu Dongdong. Virtual Observation Method to Ill-posed Total Least Squares Problem [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(6):575-581(王乐洋,于冬冬. 病态总体最小二乘问题的虚拟观测解法[J]. 测绘学报, 2014, 43(6):575-581)
- [14] Fan Q, Xu C, Yi L, et al. Implication of Adaptive Smoothness Constraint and Helmert Variance Component Estimation in Seismic Slip Inversion [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(10): 1 163-1 177
- [15] Wang Zhenjie, Ou Jikun, Liu Lintao. A Method for Solving Ill-posed Problems—Two Step Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(9):821-824(王振杰,欧吉坤,柳林涛. 一种解算病态问题的方法——两步解法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(9): 821-824)
- [16] Jonsson S. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4):1 377-1 389
- [17] Wang Zhenjie, Ou Jikun. Determination of Ridge Parameters in Ridge Estimation by *L*-Curve Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(3):235-238(王振杰,欧吉坤. 用 *L*-曲线法确定岭估计中的岭参数[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(3):235-238)
- [18] Hansen P, O'Leary D. The Use of the *L*-Curve in the Regularization of Discrete Ill-posed Problems [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1993, 14(6): 1 487-1 503
- [19] Yang Wencai. Geophysical Inversion and Seismic Tomography [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989(杨文采. 地球物理反演和地震层析成像[M]. 北京:地质出版社,1989)
- [20] Wang C, Ding X, Li Q, et al. Adaptive Regularization of Earthquake Slip Distribution Inversion [J]. *Tectonophysics*, 2016, 675:181-195
- [21] Liu Yunhua, Wang Chisheng, Shan Xinjian, et al. Result of SAR Differential Interferometry for the Co-seismic Deformation and Source Parameter of the Ms7.0 Lushan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(8):2 495-2 506(刘云华,汪驰升,单新建,等. 芦山 Ms7.0 级地震 InSAR 形变观测及震源参数反演[J]. 地球物理学报, 2014, 57 (8):2 495-2 506)
- [22] Wang Weimin, Hao Jinlai, Yao Zhenxing. Preliminary Result for Rupture Process of 2013, Lushan Earthquake, Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1 412-1 417(王卫民,郝金来,姚振兴. 2013年四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1 412-1 417)
- [23] Wang M, Jia D, Shaw J, et al. The 2013 Lushan Earthquake: Implications for Seismic Hazards Posed by the Range Front Blind Thrust in the Sichuan Basin, China [J]. *Geology*, 2014, 42(10):915-918

A Two-Step Solution Method for the Co-seismic Slip Distribution Inversion of Earthquake Faults in Geodesy

WANG Leyang^{1,2} ZHAO Xiong² GAO Hua²

1 College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2 Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: As for the ill-posed coefficient matrix in the process of co-seismic slip distribution inversion, a two-step solution method is proposed, and the Laplace second-order smoothing matrix is used for smoothing constraint in this paper. This method not only solves the ill-posed problem of the coefficient matrix, but also suppresses the large gradient variation between adjacent fault patches. During the inversion process of two-step solution method, the *L* curve method is used to determine the regularization parameters. In this

(下转第 1311 页)

Accuracy Test and Analysis for GPT2w Model in China

ZHU Mingchen^{1,2} HU Wusheng¹ WANG Laishun²

1 School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China

2 College of Engineering and Architecture, Tongling University, Tongling 244061, China

Abstract: GPT2w model is commonly used to calculate the meteorological parameters at certain location, such as temperature, weighted mean temperature, pressure and vapor pressure. It is also the public empirical model for tropospheric delay with the best nominal accuracy. In this paper, meteorological sounding data from 2013—2015 of 86 stations in China is used, which have participated the global meteorological exchange. Precisions of meteorological parameters from GPT2w are examined and analyzed. It turns out that the average bias (Bias) and root mean square error (RMS) of temperature are 1.31 °C and 3.62 °C, respectively. For weighted mean temperature, the Bias is -1.58 K and the RMS is 4.07 K. For pressure and vapor pressure, the absolute values of Bias are smaller than 1 hPa, and the RMS are 6.98 hPa and 3.04 hPa, respectively. Using the data from 2006—2015, periodic characterization of the accuracy of different latitude models are analyzed. It turns out that the RMS of temperature, weighted mean temperature, pressure and vapor pressure shows certain periodic patterns, and differs with different latitude regions. In general, GPT2w model exhibits high precision and stability within the area of China.

Key words: GPT2w model; tropospheric delay; meteorological parameter; accuracy analysis

First author: ZHU Mingchen, PhD candidate, specializes in GNSS meteorology. E-mail:491203657@qq.com

Corresponding author: HU Wusheng, PhD, professor. E-mail: wusheng.hu@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41574022, 41274028; the Key Project of College Natural Science Funding of Anhui Provincial Department of Education, No. KJ2018A0480.

(上接第 1273 页)

paper, systematic simulation experiments are carried out and the Lushan earthquake is used as an actual earthquake case. The maximum slip inversion results of simulation experiments show that the inversion result of two-step solution method has been improved between 3.34% and 19% than that of one-step solution method in accuracy. The root mean square error inversion result of two-step method is less between 3.3% and 13.3% than that of one-step solution method. The inversion results of the Lushan earthquake show that it is feasible to use the two-step solution for slip distribution inversion.

Key words: co-seismic slip distribution inversion; two-step solution; one-step solution; Laplace second-order smoothing matrix; least squares; Lushan earthquake

First author: WANG Leyang, PhD, professor, specializes in geodetic inversion and geodetic data processing. E-mail:wleyang@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41874001, 41664001; the Support Program for Outstanding Youth Talents in Jiangxi Province, No.20162BCB23050; the National Key Research and Development Program of China, No.2016YFB0501405.