

# 遗传算法在地震定位中的应用\*

周民都, 张元生, 张树勋

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**把遗传算法应用于地震定位, 并与 Powell 算法和传统算法进行了比较. 结果表明, 遗传算法在地震定位中所给出的发震时刻精度较高, 震源深度较可靠, 对非包围地震定位效果较好.

**主题词:**地震定位; 遗传算法; Powell 算法; 传统算法

**中图分类号:**P315.01; **文献标识码:**B **文章编号:**1000-0844(1999)02-0167-05

## 0 引言

遗传算法是一种高非线性的全局优化算法. 它既避免了局部算法中求目标函数的曲率信息, 又通过结合全部和局部的搜索机制提高了搜索效率. 它通过模拟生物进化行为而使模型参数取样集中于参数空间的最优区域, 同时对一组可能解进行改善. 在迭代的每一步中, 当前最优解集中了一组解的优点, 且在以后的迭代过程中可以利用全局最优信息跳出参数空间的局部最优. 遗传算法是基于求导信息的局部方法与稳定的完全非线性全局方法的一个折中.

我们考虑下面的一个优化问题: 假设有一组未知数  $x_i (i = 1, 2, \dots, M)$ , 将其表示为模型矢量  $m$  和非线性目标函数  $\varphi(m)$ . 对于每个参数有一对边界常数  $a_i$  和  $b_i$ , 而且  $a_i \leq x_i \leq b_i$ , 离散化间隔  $d_i$  为

$$d_i = (b_i - a_i) / N_i$$

以便使这组参数  $x_i$  表示的所有允许的模型  $m$  数被限定为,

$$x_i = a_i + j \times d_i \quad (j = 0, 1, \dots, N_i)$$

通常某些观测数据的目标函数  $\varphi(m)$  与相应的预期模型不相适应. 而我们感兴趣的是检查给出小于某些指定界限  $\varphi(m)$  值的模型范围. 这可以通过寻找一个最佳模型或一组竞争模型来实现, 所以, 此问题的目的就是找出产生最佳  $\varphi(m)$  值 (通常为最小值) 的模型. 在许多地球物理反演研究中, 需要将适当的未知场或函数扩展为一组已知的基函数, 并将其系数作为离散参数组  $x_i^{[1]}$ . 由于每个参数的连续范围已被一组离散间隔所代替, 因此, 出现了第二个离散化, 这就产生了一个包含有限模型数目  $N$  的离散模型空间,  $N$  可表示为

$$N = \prod_{i=1}^M N_i$$

当然, 单个的  $N$  值并不描写最优化问题的复杂性, 这种复杂性基本上由长度数量级所控制.

收稿日期: 1999-01-07

\* 甘肃省自然科学基金资助课题 (ZS981-A25-011-Z); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC1999018

第一作者简介: 周民都, 男, 1955年4月生, 副研究员, 现从事地震波理论与应用和地震预报研究工作.

在此数量级上目标函数相对于每个参数的间隔 ( $d_i$ ) 和范围 ( $b_i - a_i$ ) 而变化, 在估计最优化问题是否是高度非线性时, 我们应考虑这些量, 在多数问题中可以事先选择一组适当的界限和间隔.

## 1 遗传算法基本原理

遗传算法架起了模型与数据之间的桥梁, 通过利用较好的观测数据拟合模型参数以发展新的模型. 在每一个迭代过程中, 每个模型的目标函数值被用于控制可能性, 单个参数的特征将被遗传到下一代模型中去. 类似于生物系统中的进化, 从一次迭代到下一次迭代, 较好的模型将存活并繁殖自己, 而较差的模型将被淘汰. 每次迭代是以一种类似于适者生存的方式进行的, 直到得到一个最佳的模型.

最小化的遗传算法单个迭代过程分为以下 3 个步骤:

(1) 繁殖 从总的模型  $N$  中随机地产生一组模型  $Q$ , 我们把这一组模型  $Q$  称之为父模型, 对这一组模型分别计算每一个模型所对应的目标函数  $\varphi(m_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, Q$ ), 根据目标函数  $\varphi(m_k)$  值可以确立第  $k$  个模型繁殖的可能性, 这种可能性有两种最常用的表示方式, 一种是用线性函数表示

$$P_r(m_k) = a - b\varphi(m_k),$$

另一种是用指数函数来表示

$$P_r(m_k) = A \exp[-B\varphi(m_k)].$$

通常选择的常数为

$$b = Q^{-1}(\varphi_{\max} - \varphi_{\text{avg}})^{-1}, a \geq b \cdot \varphi_{\max},$$

$$B = (\varphi_{\sigma})^{-1}, A = \left[ \sum_j^Q \exp(-B\varphi_j) \right]^{-1}$$

其中,  $\varphi_{\max}$ ,  $\varphi_{\text{avg}}$  和  $\varphi_{\sigma}$  分别是目标函数  $\varphi$  的最大值、平均值和标准差.

一般情况下, 模型是由多个参数组成的. 先将模型的每一参数编成一个二进制子串(相当于生物学中的基因), 然后将这些子串串联成一个二进制串(相当于生物学中的染色体).

(2) 交配 用交配的办法从父模型中得到新的模型, 这些新模型被称为子模型, 每个子模型都是从两个父模型中产生出来的. 最初, 所有父模型被随机地配对, 这将产生  $Q/2$  对模型, 并且每一对模型都是可交配的. 用 0 到 1 之间的随机数来决定当前的这一对模型是否需要交配, 如果随机数小于常数  $P_c$  或随机数满足某一不等式即可交配, 否则则不交配.  $P_c$  表示模型交配的可能性. 还是用随机的办法产生一随机数来确定所要交换的位置, 在该位置处把一对父模型的两个二进制串分别切成两段, 只要交换其中对应的一段即可. 这样就生成了两个子模型, 在  $Q/2$  对父模型中产生  $Q$  个子模型.

(3) 变异 这里的变异是指把子模型二进制代码中的某些位的值(0 或 1)进行修改, 即相当于对模型中某些参数的修改. 至于要修改二进制代码中的哪一位, 是由一个随机数来确定的. 变异产生于每一个子模型内部, 而一个子模型可以产生多次变异. 值得注意的是: 对一组父模型不管怎样进行配对而交叉产生的每一个子模型中的各参数值都不会超出各自的边界值. 可是变异则不然, 所以我们必须规定子模型二进制代码中每一位发生变异的可能性. 用  $P_m$  来表示这种可能性的大小,  $P_m$  的值一般来说是相当小的. 当变异这一步骤完成后, 一组新的模型  $Q$  被产生出来, 又可以进行下一次迭代. 在迭代过程中可删除那些繁殖可能性 ( $P_r(m_k)$ ) 较小的模型, 用繁殖可能性较大的模型替代.

## 2 对模拟地震事件定位

为了验证遗传算法在地震定位中的可行性, 我们用 3 种算法(五层地壳模型<sup>[2]</sup>的传统算法、单层地壳模型的 Powell 算法<sup>[3]</sup>、两种地壳模型的遗传算法)分别对 3 个模拟地震事件进行了定位计算(两种地壳模型数据见表 1, 模拟地震事件数据见表 2), 其计算结果见表 3。

表 3 的数据表明: ① 3 种算法无论是用单层模型还是用多层模型定位, 对于包围地震(地震事件被所参加定位的台站包围)在水平方向上的误差均小于非包围地震(地震事件没有被所参加定位的台站包围)的; ② 遗传算法定出的发震时刻均比其它两种算法定出的准; ③ 遗传算法所定出的震源深度误差一般比其它两种算法定出的小; ④ 对于非包围地震, 遗传算法的定位精度均比其它两种算法的高。

表 1 地壳水平分层速度模型

模型	层号	埋深/km	层厚/km	$V_p/(km \cdot s^{-1})$	$V_s/(km \cdot s^{-1})$
单层模型			52.0	6.09	3.56
五层模型	1	0.0	1.1	5.08	2.90
	2	1.1	5.8	5.90	3.50
	3	6.9	14.1	6.06	3.57
	4	21.0	30.9	6.51	3.77
	5			8.17	4.62

注: 单层模型为甘肃省地震局用于速报定位的地壳模型; 五层模型为甘肃省地震局用于地震分析定位的地壳模型。

表 2 模拟地震事件数据

事件	台站	$\Delta/km$	$P_g$ 走时/s	$S_g$ 走时/s	发震时刻	$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度/km
1	盐池	49.7	8.9	15.2	0.0	36°31'10"	104°01'18"	21.3
	永登	70.5	12.1	20.7				
	景泰	75.3	12.8	22.0				
	靖远	77.0	13.1	22.4				
	观象台	50.6	9.0	15.4				
2	盐池	154.3	25.5	43.6	0.0	37°16'15"	102°45'26"	16.7
	永登	71.8	12.1	20.7				
	景泰	118.9	19.7	33.7				
	红崖山	126.8	21.0	35.9				
3	老爷山	112.3	18.8	32.2	0.0	38°51'57"	102°40'41"	23.6
	红崖山	52.8	9.5	16.2				
	石岗	138.5	23.1	39.5				

注: 模拟事件 1 和 2 为包围地震, 模拟事件 3 为非包围地震. 模拟事件的走时均系由单层地壳模型计算出的. 震中距  $\Delta$  的计算公式见参考文献[3].

## 3 实际资料处理

我们对选取的 15 个地震事件分别用传统算法、Powell 算法和遗传算法进行了定位. 其中前 8 个地震属于包围地震, 后 7 个地震属于非包围地震. 计算结果列于表 4 和表 5.

从表 4 和表 5 中可以看出: ① 用两种地壳速度模型, 遗传算法给出的发震时刻都较稳定, 误差在 1min 以内; ② 对于包围地震, Powell 算法和遗传算法的定位结果在水平方向上较接近, 但对非包围地震差距较大; ③ Powell 算法所给出的计算均方差一般大于遗传算法给出的; ④ 3 种算法所给出的震源深度差距较大; ⑤ Powell 算法用单层模型与传统算法用多层模型算出的定位结果差距比遗传算法用两种模型算出的大。

表3 用3种算法对3个模拟地震事件的定位结果

模型	算法	事件	发震时刻/s	$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度/km	纬度误差	经度误差	深度误差/km
单层模型	Powell 算法	1	-0.20	36°30'59"	104°01'19"	25.0	11"	-01"	-3.7
		2	0.10	37°16'14"	102°45'18"	15.0	01"	08"	1.7
		3	-0.10	38°52'42"	102°39'30"	20.0	-45"	01'11"	3.6
	遗传算法	1	0.00	36°30'59"	104°01'22"	21.4	11"	-02"	-0.1
		2	-0.01	37°16'46"	102°45'31"	18.2	-31"	-05"	-1.5
		3	0.00	38°52'15"	102°41'04"	21.8	-18"	-23"	1.6
五层模型	传统算法	1	-0.10	36°31'00"	103°58'18"	21.3	10"	03'	0.0
		2	-0.40	37°16'12"	102°45'24"	21.3	03"	02"	-4.6
		3	-0.30	38°52'42"	102°35'42"	12.9	45"	05'01"	10.7
	遗传算法	1	0.01	36°30'52"	104°01'22"	22.4	18"	-04"	-1.1
		2	-0.05	37°16'23"	102°44'43"	17.0	-18"	43"	-0.3
		3	-0.03	38°52'54"	102°40'39"	18.2	-57"	02"	5.4

注:传统算法为甘肃省地震局地震分析组所用的地震定位算法;Powell 算法为甘肃省地震局用于速报的算法。

表4 Powell 算法和遗传算法用单层模型对地震事件的定位结果

发震日期	Powell 算法						遗传算法					
	发震时刻	$\varphi_N$	$\lambda_E$	深 度 /km	均 方 差	台 站 数	发震时刻	$\varphi_N$	$\lambda_E$	深 度 /km	均 方 差	台 站 数
1998-06-16	09:57:53.0	35°35'27"	103°59'32"	20.0	0.64	7	09:57:53.0	35°34'58"	104°00'38"	14.8	0.19	6
1998-06-20	13:03:30.7	36°31'10"	104°01'18"	20.0	0.26	5	13:03:30.9	36°30'15"	103°59'37"	14.6	0.30	5
1998-07-20	19:13:30.8	39°13'27"	100°15'37"	5.0	0.45	4	19:13:30.4	39°12'56"	100°14'57"	16.2	0.11	4
1998-08-04	00:22:06.6	36°37'53"	104°05'13"	25.0	0.45	6	00:22:06.5	36°36'21"	104°05'51"	26.4	0.48	6
1998-08-26	11:32:27.5	34°14'37"	102°44'03"	35.0	0.13	3	11:32:27.6	34°15'08"	102°42'10"	29.0	0.02	3
1998-09-04	03:42:23.0	34°14'56"	105°02'23"	25.0	0.27	4	03:42:23.0	34°11'41"	105°03'36"	20.6	0.01	3
1998-10-04	15:24:07.8	37°15'45"	102°45'15"	10.0	0.32	5	15:24:08.0	37°16'59"	102°46'53"	14.2	0.32	5
1998-10-15	09:31:46.5	34°16'10"	104°35'12"	20.0	0.11	3	09:31:46.6	34°15'22"	104°35'57"	19.0	0.01	3
1998-05-05	05:53:30.7	38°29'43"	100°27'33"	0.0	0.35	3	05:53:30.7	38°35'15"	100°29'08"	23.0	0.01	3
1998-06-09	14:53:55.8	38°51'57"	102°40'41"	20.0	0.09	3	14:53:55.9	38°52'28"	102°41'58"	12.6	0.02	3
1998-07-03	18:14:00.4	38°38'07"	98°50'48"	20.0	0.20	3	18:14:00.5	38°42'00"	98°51'07"	29.0	0.14	3
1998-07-05	01:56:27.6	35°46'01"	102°43'34"	5.0	0.25	5	01:56:27.2	35°46'47"	102°42'29"	10.8	0.22	5
1998-07-29	17:46:14.7	36°41'01"	105°24'51"	25.0	0.54	5	17:46:15.6	36°39'15"	105°22'33"	18.6	0.56	5
1998-08-19	11:54:43.3	39°14'17"	98°51'35"	35.0	0.28	3	11:54:43.4	39°16'34"	98°49'29"	19.2	0.21	3
1998-08-29	05:04:55.2	38°20'19"	100°21'08"	0.0	0.87	3	05:04:55.4	38°27'18"	100°26'06"	26.4	0.01	3

## 4 结语

通过用遗传算法、Powell 算法和传统算法对模拟地震事件和真实地震事件定位结果的比较发现,用遗传算法进行地震定位有如下优点:

- (1) 给出的发震时刻的精度较高;
- (2) 给出的震源深度较可靠;
- (3) 对非包围地震事件的定位较准。

随着我国数字化地震台网的建立和震相读取精度的提高<sup>[4]</sup>,并通过对地壳精细速度结构

表5 传统算法和遗传算法用五层模型对地震事件的定位结果

发震日期	传统算法					遗传算法					
	发震时刻	$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度 /km	均台 方站 差数	发震时刻	$\varphi_N$	$\lambda_E$	深度 /km	均台 方站 差数	
1998-06-16	09:57:53.0	35°34'	104°02'	1.0	8	09:57:52.7	35°35'11"	104°00'46"	16.0	0.17	6
1998-06-20	13:03:31.3	36°34'	104°00'	4.0	6	13:03:30.6	36°30'15"	103°59'37"	16.0	0.30	5
1998-07-20	19:13:30.0	39°14'	100°17'	3.0	4	19:13:30.1	39°12'56"	100°14'49"	16.2	0.12	4
1998-08-04	00:22:07.2	36°37'	104°07'	2.0	6	00:22:06.5	36°36'34"	104°05'44"	29.0	0.49	6
1998-08-26	11:32:29.6	34°17'	102°47'	13.0	4	11:32:27.5	34°14'10"	102°40'36"	27.0	0.01	3
1998-09-04	03:42:22.9	34°14'	105°04'	1.0	7	03:42:23.0	34°11'47"	105°03'44"	32.2	0.01	3
1998-10-04	15:24:07.5	37°16'	102°46'	10.0	6	15:24:07.7	37°16'46"	102°46'36"	13.2	0.31	5
1998-10-15	09:31:46.5	34°16'	104°37'	4.0	6	09:31:46.2	34°15'16"	104°35'34"	21.0	0.01	3
1998-05-05	05:53:31.7	38°32'	100°24'	12.0	3	05:53:30.6	38°34'37"	100°29'26"	21.6	0.01	3
1998-06-09	14:53:55.7	38°52'	102°48'	20.0	4	14:53:55.5	38°52'47"	102°42'11"	8.6	0.01	3
1998-07-03	18:14:00.4	38°39'	98°50'	6.0	3	18:14:00.5	38°41'44"	98°49'20"	25.8	0.17	3
1998-07-05	01:56:26.6	35°45'	102°42'	2.0	5	01:56:26.7	35°46'47"	102°42'29"	6.2	0.21	5
1998-07-29	17:46:15.5	36°41'	105°24'	15.0	5	17:46:15.7	36°40'00"	105°22'42"	25.0	0.49	5
1998-08-19	11:54:43.6	39°15'	98°51'	33.0	4	11:54:43.3	39°16'56"	98°49'36"	25.6	0.30	3
1998-08-29	05:04:55.2	38°59'	100°33'	2.0	3	05:04:55.3	38°26'06"	100°26'25"	23.8	0.01	3

的研究<sup>[5]</sup>选定适当的地壳速度模型,用遗传算法进行地震定位必将显示出其更多的优越性.

### 参考文献

- [1] Sambridge M S, Drijkoningen G G. Genetic algorithms in seismic waveform inversion[J]. *Geophys. J. Int.*, 1992, 109: 323~342.
- [2] 王周元. 甘肃地区分层地壳结构[J]. *西北地震学报*, 1984, 6(3): 84~91.
- [3] 朱介寿. 地震学中的计算方法[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [4] 荣代路. 海原西断层松山附近地区微震尾波 Q 值——中法合作数字微震监测台(网)应用之一[J]. *西北地震学报*, 1997, 19(3): 26~31.
- [5] 张元生, 李清河, 徐果明. 联合利用走时与波形反演技术研究地壳三维速度结构(I)——理论与方法[J]. *西北地震学报*, 1998, 20(2): 8~15.

## APPLICATION OF THE GENETIC ALGORITHM TO SEISMIC LOCATION

ZHOU Min-du, ZHANG Yuan-sheng, ZHANG Shu-xun  
(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

### Abstract

The genetic algorithm is applied to seismic location, and its results are compared with those of Powell algorithm and traditional algorithm. It is shown that when genetic algorithm is used, the precision of determined origin time is higher and the determined depth is more reliable. This method is better when the stations concentrate on one side of an earthquake.

**Key words:** Seismic location; Genetic algorithm; Powell's algorithm; Traditional algorithm