

*Ян Цзяньсюнь*

## **ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА В ТЕОРИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ БЕГУЩИХ ВОЛН СЛОИСТЫХ СРЕД**

### **Введение**

В последние годы исследование поверхностных бегущих волн играет важную роль в сейсмическом зондировании. В данной технике волна Релея является главной волной, связанной между поперечной и продольной волнами и распространяющейся вдоль земной поверхности. Она обладает характеристиками: медленного затухания скорости, высокого отношения сигнал-помеха (ОСП), сильной помехозащищённости и существования дисперсии в слоистой среде и широко используется для получения информации о структуре скорости S-волны ближней земной поверхности, литосферы или мантии [1]-[4], Карстовая разведка [5] и т.д.

В рабочем процессе исследования волн Рэлея инверсия дисперсионной кривой является одним из ключевых шагов для получения информации о скорости S-волны в слоистой среде. Она в основном делится на метод линеаризации и метод нелинейной глобальной оптимизации. Метод линеаризации (например, метод демпфированных наименьших квадратов [1]) не только сильно зависит от выбора исходной модели, но и необходимо вычислить информацию о частной производной, на которую непосредственно влияет точность матрицы Якоби. А в методе нелинейной глобальной оптимизации (например, алгоритм имитации отжига [6]-[7], искусственная нейронная сеть [8]-[9], метод глобальной оптимизации роя частиц [10]-[11], генетический алгоритм (ГА) [12]-[17], и т.д.) не нужно вычислять частную производную, этот метод широко применяется в инверсии кривой дисперсии волн Рэлея.

Метод регуляризации Тихонова сыграл важную роль в исследовании обратной задачи [200-21]. При решении практических проблем он может не только преодолеть некорректность, но и значительно уменьшить распространение погрешности и шумов. В настоящей работе рассматривается новый метод «генетический алгоритм, связанный с методом регуляризации Тихонова (ГАМРТ)» для исследования обратной задачи дисперсии волн Рэлея.

### **Прямая задача для расчета кривой дисперсии поверхностных волн и анализ влияющих коэффициентов**

Для исследования прямой задачи поверхностных волн большинство работ фокусируется на вычислении дисперсии волны Рэлея. Классический метод для кусочно-постоянной плоскостной среды является метод 'Thomson Haskell' [18]. Фактически в процессе численного расчета возникает проблема потери высокочастотной точности. в настоящей статье мы используем метод импеданса для расчета характеристики бегущих волн из сейсмических данных [19].

Тензор импеданса сейсмической поверхностной волны вводится как величина связывающая напряженности  $\sigma_{xz}, \sigma_{zz}$  со смещениями  $u_x, u_z$  в виде линейных соотношений:

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = Z_{xx}u_x + Z_{xz}u_z \\ \sigma_{zz} = Z_{zx}u_x + Z_{zz}u_z \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\hat{Z} = \begin{vmatrix} Z_{xx} & Z_{xz} \\ Z_{zx} & Z_{zz} \end{vmatrix} \quad (2)$$

$\hat{Z}$  – тензор импеданса второго ранга. Отметим, что тензор импеданса непрерывен на разрывах  $\lambda, \mu$  и  $\rho$ , так как непрерывны напряжения и смещения.

Если мы определяем тензор импеданса при  $z = 0$ , т.е.  $\hat{Z}(z = 0) = \hat{Z}^0$ , то, согласно граничным условиям (1.9) и (1.10) при  $z = 0$  имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_{xz}(z = 0) &= Z_{xx}^0 u_x(z = 0) + Z_{xz}^0 u_z(z = 0) = 0 \\ \sigma_{zz}(z = 0) &= Z_{zx}^0 u_x(z = 0) + Z_{zz}^0 u_z(z = 0) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Для существования бегущей волны, т.е. существования  $u_x(0)$  и  $u_z(0)$  отличных от нуля, должно выполняться условие:

$$\det \hat{Z}^0 = Z_{xx}^0 Z_{zz}^0 - Z_{xz}^0 Z_{zx}^0 = 0 \quad (4)$$

уравнение (4) называется прямой задачей для расчета кривой дисперсии поверхностных волн. Импеданс  $\hat{Z}^0(\bar{\lambda}, \bar{\mu}, \bar{\rho}, \bar{h}, \omega, \gamma)$  получен из системы уравнения в виде :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dZ_{xx}}{dz} &= i\lambda\mu\gamma(Z_{xz} - Z_{zx}) - (\lambda + 2\mu)Z_{xx}^2 - \mu Z_{xz}Z_{zx} + \\ &\quad + 4\mu^2\gamma^2(\lambda + \mu) - \omega^2\rho\mu(\lambda + 2\mu) \\ \frac{dZ_{xz}}{dz} &= -((\lambda + 2\mu)i\mu\gamma Z_{xx} - i\mu\lambda\gamma Z_{zz} - (\lambda + 2\mu)Z_{xx}Z_{xz} - \mu Z_{xz}Z_{zz}) \\ \frac{dZ_{zx}}{dz} &= -((\lambda + 2\mu)i\mu\gamma Z_{xx} - i\gamma\mu\lambda Z_{zz} + (\lambda + 2\mu)Z_{zx}Z_{xx} + \mu Z_{zx}Z_{zz}) \\ \frac{dZ_{zz}}{dz} &= -((\lambda + 2\mu)i\mu\gamma Z_{xz} - (\lambda + 2\mu)i\mu\gamma Z_{zx} + \\ &\quad + (\lambda + 2\mu)Z_{xz}Z_{zx} + \mu Z_{zz}^2 + \omega^2\rho\mu(\lambda + 2\mu)) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Для решения системы необходимо задать начальное значение тензора импеданса при  $z = z_N = H$  (поверхность полупространства). Зная  $Z(z = H) = \hat{Z}^H$  легко численно решается задача Коши для  $\hat{Z}(z)$ , т.е.:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{xx}^{(H)} = -\frac{\mu^{(H)}\eta_2^{(H)}(\eta_1^{2(H)} - \gamma^2)}{\eta_1^{(H)}\eta_2^{(H)} - \gamma^2} \\ Z_{xz}^{(H)} = -\frac{i\mu^{(H)}\gamma(\eta_1^{2(H)} - 2\eta_1^{(H)}\eta_2^{(H)} + \gamma^2)}{\eta_1^{(H)}\eta_2^{(H)} - \gamma^2} \\ Z_{zx}^{(H)} = (\lambda^{(H)} + 2\mu^{(H)})\frac{i\gamma(\eta_1^{(H)}\eta_2^{(H)} - \eta_2^{2(H)})}{\eta_1^{(H)}\eta_2^{(H)} - \gamma^2} + i\gamma\lambda^{(H)} \\ Z_{zz}^{(H)} = (\lambda^{(H)} + 2\mu^{(H)})\frac{\eta_1^{(H)}(\eta_2^{2(H)} - \gamma^2)}{\eta_1^{(H)}\eta_2^{(H)} - \gamma^2} \end{array} \right. \quad (6)$$

Таким образом, мы получили прямую задачу для вычисления дисперсии волны Релея (детали о выведении формул (1) -(6) см. в [19]). Так как дисперсионное уравнение (4) зависит от коэффициентов Ламе  $\bar{\lambda}$  и  $\bar{\mu}$ , плотности  $\bar{\rho}$  и толщины  $\bar{h}$  для слоистых сред, необходимо изучить влияние этих коэффициентов на дисперсию.

Теперь задаем простую экспериментальную модель для слоистой среды (таблица.1). зная постоянные  $\rho$ ,  $V_p$ ,  $V_s$  легко численно вычислить коэффициенты Ламе  $\lambda$ ,  $\mu$  для каждого слоя.

Таблица 1. Коэффициенты среды в модели 1

слои	Глубины(Км)	$\rho/(\text{g.cm}^3)$	$V_p/(\text{Км/сек.})$	$V_s / (\text{Км/сек.})$
1	10	2.4	3.5	2.1
2	20	2.5	4	2.7
3	$\infty$	3	6	4

$V_p$ – скорость продольной волны,  $V_s$ – скорость поперечной волны.

Далее мы изменим каждый из вышеупомянутых параметров

1. коэффициенты  $\bar{\mu}$  каждого слоя увеличиваются (или уменьшаются) на 10%, а другие параметры  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{h}$  не изменяются.
2. коэффициенты  $\bar{\lambda}$  каждого слоя увеличиваются (или уменьшаются) на 10%, а другие параметры  $\bar{\mu}$ ,  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{h}$  не изменяются.
3. коэффициенты  $\bar{\rho}$  каждого слоя увеличиваются (или уменьшаются) на 10%, а другие параметры  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\mu}$ ,  $\bar{h}$  не изменяются.
4. коэффициенты  $\bar{h}$  каждого слоя увеличиваются (или уменьшаются) на 10%, а другие параметры  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{\mu}$  не изменяется.

При этих случаях с помощью уравнения (4) мы вычислили дисперсию и сравнили с результатами, вычисленными по исходной модели (рис. 1). Из рисунка 1 легко видно, что изменение коэффициента  $\bar{\mu}$  оказывает большое влияние на дисперсию (амплитуда изменения дисперсии более 5%, см. рис.1-(а)), толщина  $\bar{h}$  мало влияет на дисперсию (в дисперсию

были внесены мелкие изменения около 1.5%, см. рис.1-(d)), влияние  $\bar{\lambda}$  и  $\bar{\rho}$  на дисперсию в значительной степени можно пренебречь (дисперсия почти не изменяется, см. рис.1-(b), (c)).

Таким образом, в эксперименте обратной задачи, чтобы упростить сложность инверсии, мы только изучаем параметры  $\bar{\mu}$  и  $\bar{h}$ , которые оказывают большое влияние на дисперсию, а остальные параметры задаются как константы.

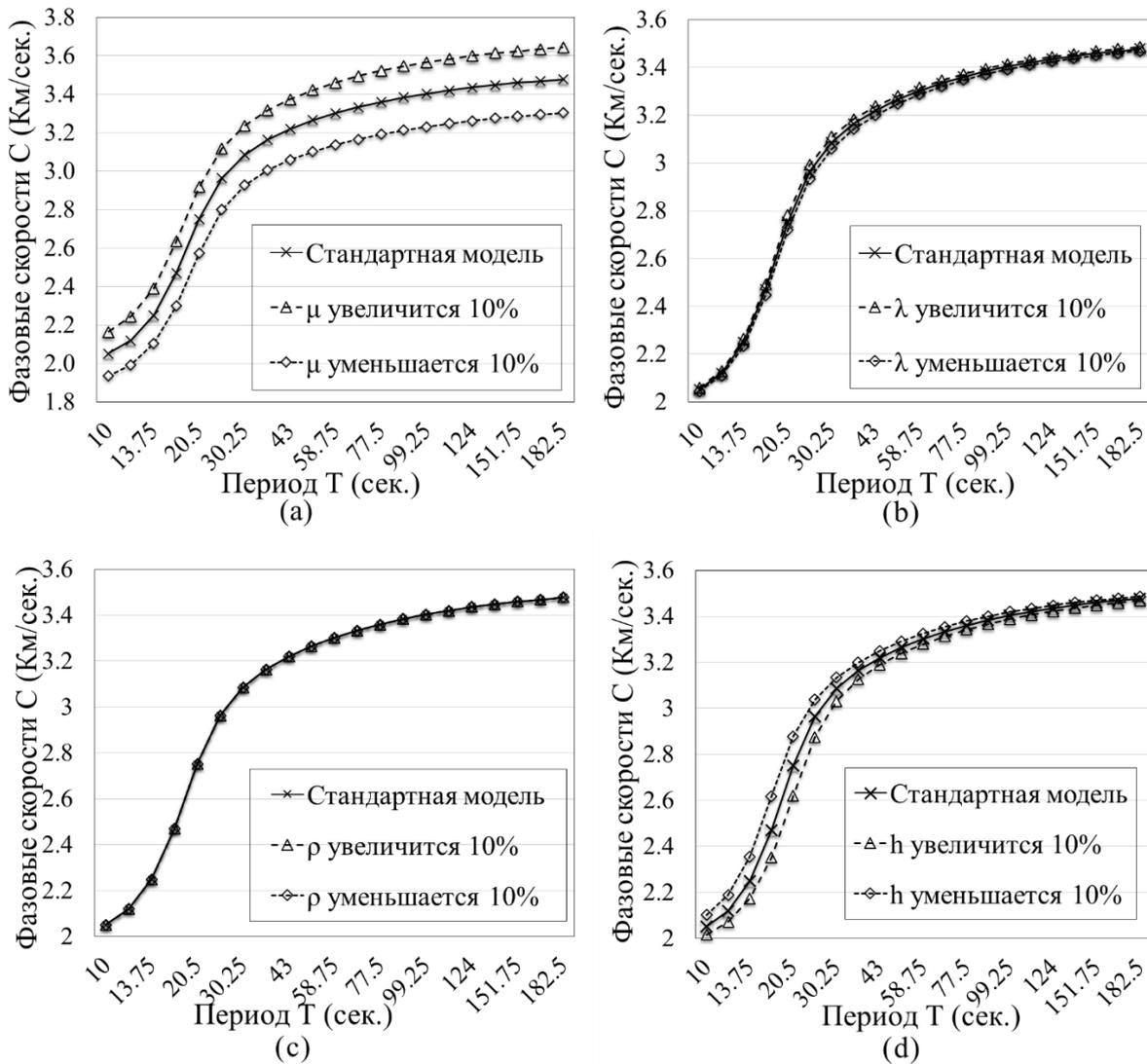


Рисунок 1. Влияние изменения параметров  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\mu}$ ,  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{h}$  на дисперсию.

### Метод ГАМРТ

Генетический алгоритм является одним из важнейших эволюционных алгоритмов. Это простой и эффективный новый метод, который был установлен путем моделирования эволюционного процесса биологических генов (наследование, мутация, воспроизведение и селекция) [16]-[17]. В последние годы он широко используется в геофизических проблемах [12]-[15]. Классический ГА состоит из операторов селекции-репродукции, скрещивания, мутации (рис.2).

Для решения обратной задачи дисперсии поверхностных волн установим целевую функцию в виде:

$$\Phi(F_j) = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (f_i^{obs} - f_i^{inv}(\bar{\mu}_j, \bar{h}_j))^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

где  $f_i^{obs}$  – измеряемые дисперсии в  $i$ -й точки периода,  $f_i^{inv}$  – вычисленные фазовые скорости поверхностных волн в каждой точке периода (по частоте) после определения параметров популяции каждого поколения,  $N$  – число точек периода (по частоте).



Рисунок. 2 Блок-схема генетического алгоритма поверхностных волн.

В описанном алгоритме используется термин популяция. Разъясним это понятие подробнее. Установка инвертируемых параметров  $\{\bar{\mu} \bar{h}\}$  и диапазона поиска, т.е.:

$$\mu_i \in [\tilde{\mu}_i - \Delta\mu_i, \tilde{\mu}_i + \Delta\mu_i], i = 1..N,$$

$$h_j \in [\tilde{h}_j - \Delta h_j, \tilde{h}_j + \Delta h_j], j = 1..N - 1$$

где  $\bar{\mu} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N\}$  – коэффициенты Ламе,  $\bar{h} = \{h_1, h_2, \dots, h_{N-1}\}$  – толщины,  $N$  – число слоя,  $\tilde{\mu}_i, \tilde{h}_j$  – соответствующие центральные точки (для решения фактических проблем некоторого района центральные точки могут быть заданы общим значением с помощью модели глобальной коры crust1.0 [22]-[23]).

При выборе начальных популяций инвертируемые параметры произвольно генерируют несколько индивидуумов в пределах диапазона поиска  $\{\bar{\mu} \bar{h}\}_m, m = 1..M, M$  – количество популяции (в нашей статье установим популяцию  $M = 50$ ). Для модели трехслойных сред имеем 5 инвертируемых параметров  $\bar{\mu} = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$   $\bar{h} = \{h_1, h_2\}$ , тогда при установке начальных популяций имеем следующие понятия:

- 1 Популяция=50 индивидуумов ( $\{\bar{\mu} \bar{h}\}_m, m = 1..M, M = 50$ );
- 1 индивидуум ( $\{\bar{\mu} \bar{h}\}$ ) = 5 инвертируемых параметров  $\bar{\mu} = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}, \bar{h} = \{h_1, h_2\}$ .

Фактически глобальный поиск на основе этой целевой функции слишком медленный. На начальном этапе поиска значение сходимости можно быстро найти, и оно попадает в локальную конвергенцию, что приводит к неспособности получить глобальное оптимальное решение. Поэтому введем оператор регуляризации в целевой функции:

$$J = \alpha_1 \sum_{k=1}^M (\bar{\mu}_k^* - \bar{\mu}_k)^2 + \alpha_2 \sum_{l=1}^{M-1} (\bar{h}_l^* - \bar{h}_l)^2 \quad (8)$$

где  $\bar{\mu}_k^*$  и  $\bar{h}_l^*$  – гипотезы строения,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – малые числа (параметры регуляризации). Функция  $J$  является устойчивой. В какой-то степени можно преодолеть неустойчивость проблемы. Теперь целевая функция переписана в виде:

$$OBJ(F_j) = \Phi(F_j) + J \quad (9)$$

## Экспериментальные результаты и сравнение с методами ГА и ГАМРТ для инверсии поверхностных волн в слоистой среде

Для проверки инверсии дисперсии поверхностных волн задаем простую слоистую модель. Из анализа дисперсионной прямой задачи мы узнали, что основными влияющими факторами являются коэффициенты  $\bar{\mu}$  и  $\bar{h}$ , поэтому в следующей инверсии мы только исследуем  $\bar{\mu}$  и  $\bar{h}$  и устанавливаем постоянные значения для  $\bar{\lambda}$  и  $\bar{\rho}$  (табл. 2).

Таблица 2. Трехслойная модель, параметры для инвертирования и диапазон поиска

Слои N	Плотность $\rho$ (Кг/М <sup>3</sup> )	$\lambda$	$V_s$	Для инверсии		Диапазон поиска	
				$\mu$	$h$ (Км)	$\mu$	$h$
1	2.4	8.232	2.1	10.584	10	9.6-12.7	8.0-12.0
2	2.5	14.175	2.7	18.225	10	15.6-21	8.0-12.0
3	3	12	4	48	$\infty$	43.3-52.9	-

Теперь в операторах и параметрах генетического алгоритма мы приводим следующие правила (детали о применении операторов ГА см. в [12]-[17]):

1. размер популяции 50, максимальной генетической алгебры - 200 поколений.
2. оператор селекции-репродукции: алгоритм рулетки,
3. оператор селекции: многоточечный селекции, вероятность селекции: 0.8.
4. оператор мутации: линейная мутации, вероятность мутации 0.01.

В соответствии с вышеупомянутыми условиями, мы выполнили четыре вычисления инверсии (табл. 3) с помощью классического алгоритма ГА. Нетрудно видеть, что результаты инверсии неустойчивы, особенно полученные параметры для второго слоя существуют большие погрешности. Для этого имеются две причины. Одна из них состоит в не единственности инверсии. Классический ГА является некорректным и может сходиться к некоторому локальному решению, не совпадающему с оптимальным решением. С другой стороны, ошибка связана с количеством частотных точек на выбранной дисперсионной кривой (рис.3). Кривая в низкочастотной части хорошо совпадает с постоянной моделью, по мере

того, как периоды становятся меньше, подобие кривой будет постепенно ухудшаться. Этот случай вызван неустойчивыми результатами инверсии первого и второго слой. (Чтобы более внимательно изучить эти ошибки, на рисунке 3 приведены увеличенные результаты для этого отрезка по частоте (период), и можно видеть, что эта полоса (этот отрезок) немного более смещен, чем низкочастотная полоса).

Таблица 3

Слой	Инверсия 1		Инверсия 2		Инверсия 3		Инверсия 4	
	$\mu$	h	M	h	$\mu$	h	$\mu$	h
1	10.508	9.646	10.159	9.464	10.676	10.442	10.374	9.881
2	17.594	10.44	16.737	10.986	19.812	10.733	18.517	10.08
3	47.964	-	47.936	-	48.132	-	47.857	-
О. п. (%)	0.72%	3.54%	4.02%	5.36%	0.87%	4.42%	1.98%	1.19%
	3.46%	4.44%	8.17%	9.86%	8.71%	7.33%	1.6%	0.83%
	0.08%	-	0.13%	-	0.28%	-	0.3%	-

О. п. - Относительная погрешность

Для решения этой проблемы мы введем оператор регуляризации Тихонова (9). Сначала необходимо определить гипотезы строения  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  (выбранные коэффициенты регуляризации  $\alpha$  показаны в таблицах), т.е. следующие случаи:

1. определены гипотезы строения  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  значениями левой границы определенного диапазона (табл.4).
2. определены гипотезы строения  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  значениями правой границы определенного диапазона (табл.5).
3. определены гипотезы строения  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  точными значениями заданной модели слоистой среды (табл.6).
4. определены гипотезы строения  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  средними значениями, полученными из 4 результатов с помощью классического алгоритма (табл.7-9).

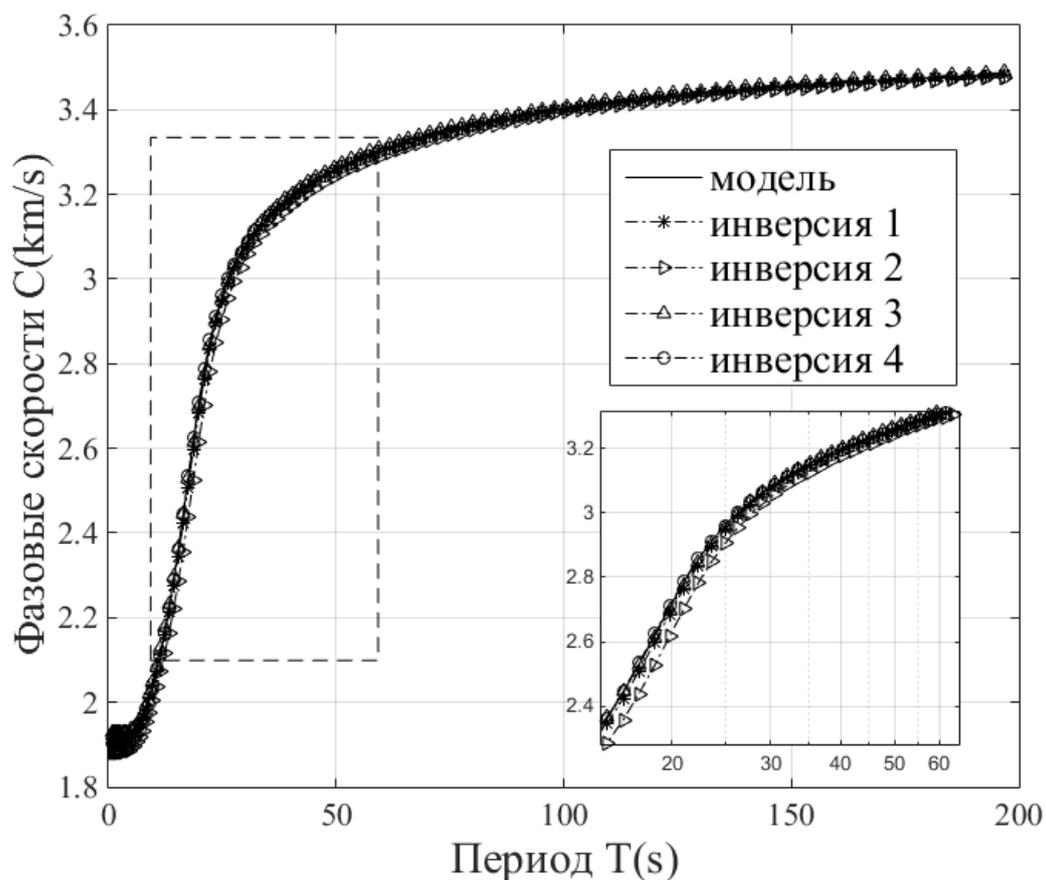


Рисунок 3. Сравнение кривых дисперсии между заданной модели и 4 инверсии.

Таблица 4.  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  берем значения левой границы диапазона из табл.2

Слой	Инверсия 1 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 2 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 3 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 4 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$	
	$\mu$	$h$	$M$	$h$	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$
1	10.156	8.13	9.718	8.579	9.095	8.2	10.157	9.308
2	16.339	10.85	17.594	10.91	17.544	9.858	16.077	10.61
3	47.308	-	47.815	-	46.8	-	47.823	-
О. п. (%)	4.044	18.7%	8.182%	14.2%	14.1%	18%	4.034%	6.92%
	10.4%	8.55%	3.46%	9.14%	3.74%	1.42%	11.8%	6.13%
	1.442%	-	0.385%	-	2.500%	-	0.369%	-

О. п. - Относительная погрешность

Таблица 5.  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  берем значения правой границы диапазона из табл.2

Слои	Инверсия 1 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 2 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 3 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 4 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$	
	$\mu$	$h$	$M$	$h$	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$
1	10.795	11.207	10.706	10.486	11.269	11.99	11.121	10.856
2	21.013	10.27	19.996	11.14	20.05	9.492	19.987	9.687
3	48.137	-	48.256	-	48.056	-	48.134	-
О. п. (%)	1.99%	12.1%	1.15%	4.86%	6.47%	19.9%	5.074%	8.560%
	15.3%	2.7%	9.72%	11.4%	10.1%	5.1%	9.67%	3.13%
	0.29%	-	0.53%	-	0.12%	-	0.28%	-

О. п. - Относительная погрешность

Таблица 6.  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  берем точные значения заданной модели слоистой среды

Слои	Инверсия 1 $\alpha_1=0.01$ , $\alpha_2=0.001$		Инверсия 2 $\alpha_1=0.01$ , $\alpha_2=0.001$		Инверсия 3 $\alpha_1=0.01$ , $\alpha_2=0.001$		Инверсия 4 $\alpha_1=0.01$ , $\alpha_2=0.001$	
	$\mu$	$h$	$M$	$h$	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$
1	10.543	9.923	10.585	9.988	10.59	9.998	10.585	10.013
2	18.253	10.152	18.182	10.019	18.172	9.973	18.168	9.94
3	48.025	-	48.013	-	48.023	-	48.005	-
О. п. (%)	0.39%	0.77%	0.009%	0.12%	0.057%	0.02%	0.01%	0.13%
	0.15%	1.52%	0.236%	0.19%	0.291%	0.27%	0.31%	0.6%
	0.05%	-	0.027%	-	0.048%	-	0.01%	-

О. п. - Относительная погрешность

Из таблиц 4-5 видно, что результаты близки к значениям левой и правой границы определенного диапазона. При выборе точных значений (табл. 6) результаты хорошо совпадают с заданной моделью слоистой среды (табл. 2). Таким образом, с помощью метод ГАМРТ результаты инверсии тесно связаны с гипотезой строения  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$ .

При фактическом наблюдении сейсмических данных мы не сможем узнать точные значения слоистой среды в некотором районе, поэтому мы выбираем средние значения, вычисленные через классический ГА несколько раз, как гипотезы строения для решения обратной задачи.

Таблица 7.  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  берем средние значения 4 результатов из табл.3

Слои	Инверсия 1 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 2 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 3 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$		Инверсия 4 $\alpha_1=0.0007$ , $\alpha_2=0.0004$	
	$\mu$	$h$	$M$	$h$	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$
1	10.502	9.7214	10.585	10.094	10.522	9.786	10.321	9.714
2	18.259	10.349	18.491	10.07	18.088	10.309	18.489	10.104
3	48.013	-	48.012	-	48.038	-	48.048	-
О. п. (%)	0.78%	2.79%	0.009%	0.94%	0.586%	2.14%	2.49%	2.86%
	0.19%	3.49%	1.460%	0.70%	0.752%	3.09%	1.45%	1.04%
	0.03%	-	0.025%	-	0.079%	-	0.1%	-

О. п. - Относительная погрешность

Таблица 8.  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  берем средние значения 4 результатов из табл.3

Слои	Инверсия 5 $\alpha_1=0.01$ , $\alpha_2=0.01$		Инверсия 6 $\alpha_1=0.01$ , $\alpha_2=0.01$		Инверсия 7 $\alpha_1=0.002$ , $\alpha_2=0.001$		Инверсия 8 $\alpha_1=0.001$ , $\alpha_2=0.001$	
	$\mu$	$h$	$M$	$h$	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$
1	10.497	9.827	10.505	9.758	10.592	9.687	10.585	10.096
2	18.29	10.31	18.175	10.23	17.627	10.151	18.649	10.219
3	48.024	-	48.054	-	48.032	-	48.016	-
О. п. (%)	0.82%	1.73%	0.744%	2.42%	0.076%	3.13%	0.009%	0.96%
	0.36%	3.10%	0.27%	2.23%	3.281%	1.51%	2.326%	2.19%
	0.05%	-	0.11%	-	0.067%	-	0.033%	-

О. п. - Относительная погрешность

Таблица 9.  $\bar{\mu}^*$  и  $\bar{h}^*$  берем средние значения 4 результатов из табл.3

Слои	Инверсия 9 $\alpha_1=0.001$ , $\alpha_2=0.005$		Инверсия 10 $\alpha_1=0.01$ , $\alpha_2=0.001$		Инверсия 11 $\alpha_1=0.008$ , $\alpha_2=0.005$		Инверсия 12 $\alpha_1=0.007$ , $\alpha_2=0.0045$	
	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$	$\mu$	$h$
1	10.585	10.096	10.939	10.857	10.509	9.892	10.462	9.858
2	18.649	10.219	18.575	9.205	18.449	10.46	17.997	9.92
3	48.016	-	48.059	-	48.085	-	48.081	-
О. п. (%)	0.006%	0.96%	3.35%	8.57%	0.71%	1.08%	1.15%	1.42%
	2.329%	2.2%	1.92%	7.95%	1.229%	4.63%	1.25%	0.80%
	0.033%	-	0.12%	-	0.177%	-	0.169%	-

О. п. - Относительная погрешность

В эксперименте вычислена инверсия 12 раз (табл. 7-9) для выбора различных коэффициентов регуляризации  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Из таблиц видно, что по сравнению с полученными результатами в классическом ГА с одной стороны уменьшается погрешность, а с другой значительно улучшается устойчивость.

### Заключение

В настоящей статье метод ГАМРТ не только преодолевает проблему сходимости к локальным минимумам, возникающих в классических ГА (рис.4), но и точность и устойчивость результатов инверсии значительно улучшается.

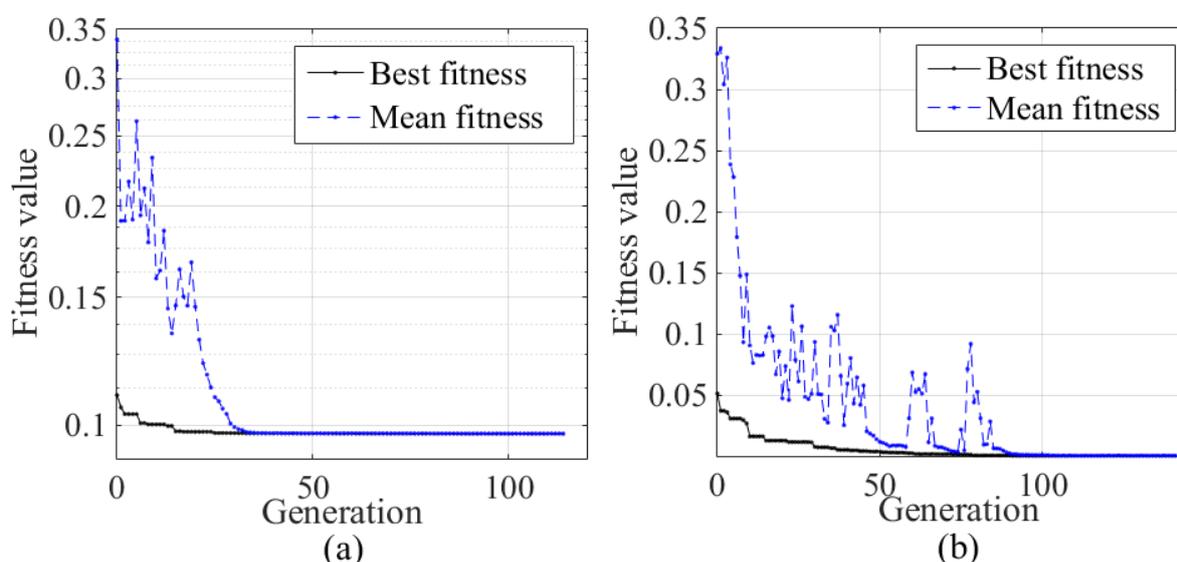


Рисунок 4. (а). классический ГА (алгоритм сходится через 37 поколений).  
 (б). метод ГАМРТ (алгоритм сходится через 96 поколений путем неоднократной минимизации до получения оптимального минимума).

В эксперименте измеряемые дисперсионные кривые, которые мы вводим в модель инверсии (уравнение 9), численно рассчитываются путем введения заданной модели слоистой среды в прямую задачу (4). Ошибкой и шумом кривой в принципе можно пренебречь, поэтому коэффициенты регуляризации  $\alpha$  не могут быть хорошо определены. Это также исследовательская работа в будущем времени (для определения коэффициентов регуляризации  $\alpha$  связи прямой/обратной задачи и фактическими измеренными дисперсиями, полученными из обработки сейсмических данных).

## Литературы

1. **Xia, J. H., Miller, R. D., Park, C. B.**, 1999. Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves. *Geophysics*, 64 (3): 691-700. doi: 10.1190/1.1444578
2. **Huang Zhong-Xian, Li Hong-Yi, Xu Yi**. 2014. Lithospheric S-wave velocity structure of west China and neighboring areas from surface wave tomography. *Chinese J. Geophysics*, 57(12): 3994-4004, doi: 10.6038/cjg20141212 (in Chinese).
3. **Pan Jia-Tie, Li Yong-Hua, Wu Qing-Ju, Yu Da-Xin**. 2014. 3-D S-wave velocity structure of crust and upper-mantle beneath the northeast China. *Chinese J. Geophysics*, 57(7): 2077-2087, doi: 10.6038/cjg20140705 (in Chinese)
4. **Zhang Bi-Xing, Xiao Bo-Xun, Yang Wen-Jie, Cao Si-Yuan, Mou Yong-Guang**. 2000. Mechanism of zigzag dispersion curves in Rayleigh exploration and its inversion study. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(04): 557-567.
5. **Xia, J. H., Chen, C., Li, P. H.**, et al., 2004. Delineation of a Collapse Feature in a Noisy Environment Using a Multichannel Surface Wave Technique. *Geotechnique*, 54 (1): 17-27. doi: 10.1680/geot.54.1.17.36326
6. **Pei, D. H., Louie, J. N., Pullammanappallil, S. K.**, 2007. Application of Simulated Annealing Inversion on High-Frequency Fundamental-Mode Rayleigh Wave Dispersion Curves. *Geophysics*, 72 (5): 77-85. doi: 10.1190/1.2752529
7. **Cui J W**. An improved global optimization method and its application to the inversion of surface wave dispersion curves. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47 (3): 521~527.
8. **Feng Hang jian, Zhou Aiguo, Yu Jianjun, Tang Xiaoming**. A comparative Study on Plum-Rain Triggered Landslide Susceptibility Assessment Models in West Zhejiang Province. *Chinese J. Earth Science*, 41(3): 402-415, 2016 (in Chinese).
9. **Shirazi, H., Abdallah, I., Nazarian, S.**, 2009. Developing Artificial Neural Network Models to Automate Spectral Analysis of Surface Wave Method in Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21 (12): 722-729
10. **Song, X. H., Tang, L., Lv, X. C.**, 2012. Application of Particle Swarm Optimization to Interpret Rayleigh Wave Dispersion Curves. *Journal of Applied Geophysics*, 84 (9): 1-13. doi: 10.1016/j.jappgeo.2012.05.011

11. **CaiWei, SongXianhai, YuanShichuan, HuYing**, A New Misfit Function for Multimode Dispersion Curve Inversion of Rayleigh Waves. Chinese J. Earth Science, DOI: 10. 3799/dqkx. 2017. 531(in Chinese).
12. **Malcolm Sambridge, Guy Drijkoningen**, Genetic algorithms in seismic waveform inversion. *Geophysical Journal International*, Volume 109, Issue 2, 1 May 1992, Pages 323–342.
13. **Gallagher K. L. Sambridge M. S. Drijkoningen G. G.**, Genetic Algorithms: an evolution on Monte Carlo methods in strongly non-linear geophysical optimization problems, *Geophys. Res. Lett.*, 1991.
14. **Paul L. Stoffa and Mrinal K. Sen** (1991). Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane-wave seismograms. *GEOPHYSICS*, 56(11), 1794-1810.
15. **Shi Y.L., Jin W.**, Genetic algorithms inversion of lithospheric structure from surface wave dispersion. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese) , 1995 , 38 (2) : 189~198
16. **Martin L. Smith, John A. Scales, and Terri L. Fischer.** (1992). Global search and genetic algorithms. *The Leading Edge*, 11(1), 22-26.
17. **Mrinal K. Sen and Paul L. Stoffa** (1992). "Genetic inversion of AVO." *The Leading Edge*, 11(1), 27-29.
18. **Haskell, N. A.**, 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 43, 17-34.
19. **Yang Jianxun**, Calculation of the Characteristics of Traveling Waves in Layered Media, *Computational Mathematics and Modeling*, Vol. 29, No. 3, July, 2018, 287-298
20. **Тухонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. – 288 с.
21. **Алексеев В.М., Тухомиров В.М., Фомин С.В.** Оптимальное управление. М.: Наука, 1979. – 432 с.
22. **Gabi Laske, Guy Masters, Zhitu Ma, and Mike Pasyanos**, Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust, *Geophysical Research Abstracts Vol. 15*, EGU2013-2658, 2013 EGU General Assembly 2013.
23. **Pasyanos, M.E., Masters, G., Laske, G. and Ma, Z.**, LITHO1.0 – An Updated Crust and Lithospheric Model of the Earth Developed Using Multiple Data Constraints, Abstract T11D-09 presented at 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 Dec, 2012.