

## Импульсно-фазовый метод обработки сейсмических сигналов. Часть II. Оценки разрешающей способности по дальности различных методов фазовых измерений

■ Шайдуров Г. Я., Детков В. А., Копылов М. А., Шайдуров Р. Г.,  
Сибирский федеральный университет, ОАО «Енисейгеофизика», г. Красноярск.

*Аннотация: Данная статья является продолжением статьи «Импульсно-фазовый метод обработки сейсмических сигналов. Часть I. Постановка задачи», представленной в выпуске журнала №1/2015. Во второй части статьи дается сравнительный анализ разрешающей способности различных методов фазовых измерений при возбуждении георазреза группой импульсных невзрывных излучателей при параллельном и последовательном режимах работы.*

Проведем сравнительный анализ эффективности реализации фазового метода для «последовательного» (ПСП) и «параллельного» (ПРП) возбуждения группы импульсных невзрывных источников (Рис. 1).

Заметим сразу, что для вибрационных источников подобный подход в принципе исключен, поскольку снятие за один свип фазово-частотной характеристики разреза не позволяет произвести разрешение по дальности за счет неоднозначности фазового параметра, а операция свертки свипа, разрешающая неоднозначность, дает чисто энергетический параметр, не содержащий параметр фазы.

Сравнение двух фазово-импульсных методов «последовательного ПСП» и «параллельного ПРП» будем вести с ограничением на энергию пачки импуль-

сов возбуждения, т.е. будем считать, что энергия силы удара  $n$  источников в режиме «ПСП» соответствует энергии, излучаемой этими же источниками, но в режиме «ПРП».

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = nI_1^2\tau_u, \quad \mathcal{E}_{\text{пс}} = nI_1^2\tau_u.$$

где  $\tau_u$  - длительность зондирующего импульса;

$n$  - число источников;

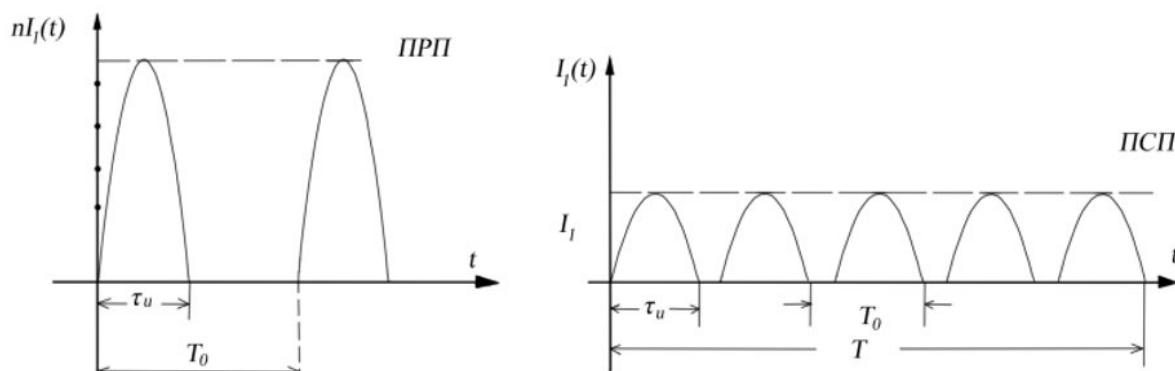
$I_1$  - сила удара одиночного источника.

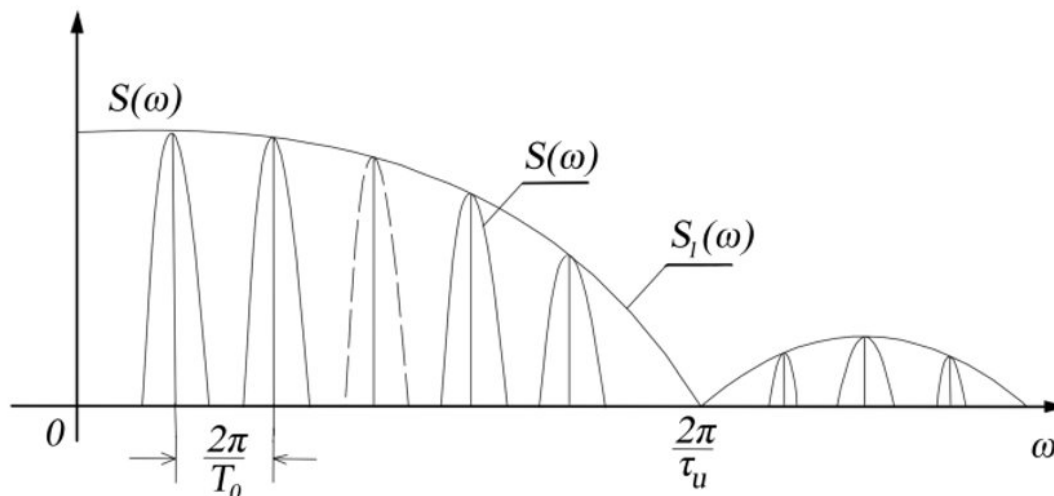
Спектр ПСП можно записать в виде:

(1)

По сравнению с ПРП спектр ПСП будет носить дискретный характер по гармоникам частоты повторения  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$  (Рис.2).

▼ Рис. 1. Временные эпюры зондирующих сигналов ПРП и ПСП видов.





▲ Рис. 2. Спектр ЗС, ПСП.

Согласно теорема Релея – Парсеваля:

$$\int_0^{T_0} I_1^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/\tau_u} S_1(\omega) d\omega \quad (2)$$

При  $T_0 = 2\tau_u$ , в первый лепесток спектра ЗС шириной полосы частот  $\frac{2\pi}{\tau_u}$ , содержащий 90% энергии сигнала, попадет одна первая гармоника частоты  $\frac{2\pi}{\tau_u}$ , куда и будет закачена основная энергия ЗС.

Запишем частотную характеристику сейсморазреза, без учета поглощения сейсмических волн горной породой как [1]:

$$F_1(j\omega) = \frac{(\alpha_1 + j\omega)(\alpha_2 + j\omega)}{(\beta_1 + j\omega)(\beta_2 + j\omega)} \quad (3)$$

Характерная резонансная частота (3) определяется полюсами  $\omega_0 = \gamma(\beta_1, \beta_2)$ .

Спектр отклика сейсморазреза, т. е. наблюдаемый на выходе сигнал сейсмоприемника на последовательность импульсов будем иметь в виде:

$$U(j\omega) = F_1(\omega) S_1(j\omega) [\sum_{i=1}^n e^{-j\omega T_0} + 1] \quad (4)$$

Ясно, что, возбуждая сейсморазрез на частоте  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ , мы используем максимум энергии ЗС для получения полезной информации содержащейся в фазе отраженного сигнала.

При этом неопределенность отсчета фазы снимается корреляционной обра-

боткой всей пачки излучаемого ЗС.

Собственно, таким образом, реализуется известный в радионавигации импульсно – фазовый метод измерения расстояний.

Далее сравним эффективность использования фазового метода для ПСП и ПРП – режимов при одинаковой энергии возбуждения сейсмических волн группой из n-источников.

В качестве параметра сравнения используем понятие разрешающей способности по дальности [2]. Для фазового метода

$$\Delta\varphi = \omega_0 \frac{\Delta r}{v_p} |\text{рад}|, \quad (5)$$

где  $v_p$  - скорость продольных сейсмических волн,  $r\Delta$  - разрешающая способность по дальности

$$\text{Согласно (7, часть I), } \Delta\varphi_{\min} \rightarrow \frac{U_n}{U_c} = \frac{1}{\sqrt{q}},$$

где q отношение с/ш по мощности q.

$$\text{Тогда } \Delta r_{\min} = \frac{v_p}{\omega_0 \sqrt{q}} \quad (6)$$

При задании разрешающей способности величиной  $\Delta r_{\min}$ , требуемое отношение сигнал/шум по мощности на частоте измерений  $\omega_0$  должно быть:

$$q_{\min} = \left( \frac{v_p}{\omega_0 \Delta r_{\min}} \right)^2 \quad (7)$$

При  $v_p = 4000$  м/с;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $f = 40$  гц,  $\Delta r_{\min} = 10$  м, из (7) получим требуемое отношение сигнал/шум по амплитуде:

$$q_u = \frac{4000}{2\pi \cdot 40 \cdot 10} \approx 1.6$$

Или  $q_p \approx 2.6$  - по мощности.

При оценке  $\Delta r$  импульсным методом, обычно  $\Delta r = v_p \frac{\tau_u}{2}$ , без учета влияния шумов.

Тогда для  $\tau_u = 5$  мс;  $v = 4000$  м/с, будем иметь:

$$\Delta r = 2.5 \cdot 4000 = 10 \text{ м.}$$

С учетом же влияния синхронных помех разрешающую способность по дальности оценивается не больше, чем:

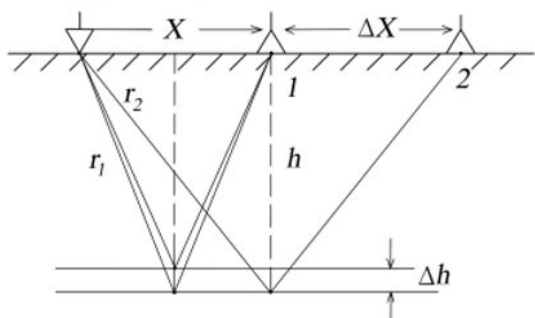
$$\Delta r_{\min} = \lambda / 2 = \frac{v}{f_0} \frac{4000}{2 \cdot 40} = 50 \text{ м.}$$

Сосредотачивая энергию всех  $n$  - источников на одной частоте  $\omega_0$ , мы тем самым в  $n$  раз увеличиваем плотность спектра мощности ЗС на этой частоте и во столько же раз улучшаем разрешающую способность по фазе.

С учетом (7):

$$\Delta r_{\min} = \frac{v}{\omega_0 \sqrt{qn}} \quad (8)$$

Для снижения влияния геологических неоднородностей на больших расстояниях между источником и приемником сейсмических колебаний, рассмотрим возможности дифференциального метода выделения фазового параметра путем сравнения разности фаз сигналов между двумя соседними сейсмоприемниками (Рис. 3.)



▲ Рис. 3. Реализация дифференциально-фазового метода.  $\Delta h$  - мощность отражающего слоя.

Фазовое запаздывание сигнала для двух соседних СП - 1 и 2:

$$\varphi_1 = \omega \cdot \frac{2r_1}{v_1}; \varphi_2 = \omega \cdot \frac{2r_2}{v_2} \quad (9)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  - скорости сейсмических волн на соответствующих трассах их распространения.

Разность фаз:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\omega \left( \frac{r_1}{v_1} - \frac{r_2}{v_2} \right)$$

$$\text{где } r_1 = \sqrt{h^2 + \frac{x^2}{4}}; \quad r_2 = \sqrt{h^2 + \frac{(x+\Delta x)^2}{4}}$$

Считая, что для двух соседних точек приема скорости распространения сейсмических волн примерно одинаковые для однородной среды, получим:

$$v_1 \approx v_2 = v$$

$$\begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= 2 \frac{\omega h}{v} \left[ \left( 1 + \left( \frac{x}{4h} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left( 1 + \left( \frac{x}{4h} \right)^2 + \left( \frac{\Delta x}{x} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \\ &= 2 \frac{\omega h}{v} \left\{ \left( 1 + \left( \frac{x}{4h} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 + \left( \frac{\Delta x}{x} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \end{aligned}$$

При малом  $x/h \rightarrow 0$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2 \frac{\omega h}{v} \left[ 1 - \left( 1 + \left( \frac{\Delta x}{x} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (10)$$

Разложение по малому параметру  $\Delta x/x \rightarrow 0$  даст

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2 \frac{\omega h}{v} \left( \frac{2\Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\text{при } \frac{\Delta x}{x} \rightarrow 0, \varphi_1 - \varphi_2 \rightarrow 0 \quad (11)$$

Появление малой геологической неоднородности мощностью  $\Delta h$  под вторым СП, изменяет разность фаз

$$\begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= 2 \frac{\omega(h + \Delta h)}{v} \left( \frac{2\Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= 2 \frac{\omega h}{v} \left( 1 + \frac{\Delta h}{h} \right) \left( \frac{2\Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12) \end{aligned}$$

Приращение разности фаз:

$$\Delta \varphi = 2 \frac{\omega h}{v} \Delta h \left( \frac{2\Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\text{Величина } \frac{\Delta\varphi}{\Delta h} = 2 \frac{\omega h}{v} \left( \frac{2 \Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ в (13)}$$

характеризует разрешающую способность (чувствительность) фазового метода, которая не зависит от глубины отражающего слоя и числа неизвестных циклов фазы, укладываемых на расстояние  $h$ , а лишь от заданных величин  $\Delta x, x, \omega$  и неизвестной скорости  $v$ .

Однако, отражающий слой вносит в (13) добавочный неизвестный параметр скорости  $\Delta v$ , т.е.

$$\text{или: } \Delta\varphi = \frac{2\omega\Delta h}{v + \Delta v} \left( \frac{2\Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\Delta\varphi = 2\omega \frac{\Delta h}{\Delta v} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta v}{v}\right)} \left( \frac{2\Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{при } \frac{\Delta v}{v} \rightarrow 0; \Delta\varphi = 2\omega \frac{\Delta h}{\Delta v} \left( \frac{2\Delta x}{x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Таким образом, измеряя приращение разности фаз сигналов между двумя соседними СП, мы можем выделить дифференциальный параметр неоднородности сейсмореза, однако только на краях неоднородности при ее горизонтальном положении и существенных по сравнению с  $\Delta x$  размерах.

Еще один способ устранения влияния неизвестного числа фазовых циклов, укладываемых на участке глубины отражающего слоя, является двухчастотный метод измерения разности фаз сигналов, снимаемых с одного СП, но на двух соседних частотах  $\omega_1$  и  $k\omega_1$ ,

где  $k = 2, 3 \dots 4$ ;

Приращение фазовых сдвигов на изменение расстояния  $\Delta r$  до отражающего слоя:

$$\Delta\varphi_1 = \omega_1 \frac{\Delta r}{v}; \quad \Delta\varphi_2 = k\omega_1 \frac{\Delta r}{v};$$

Измеряемая разность фаз:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = \omega_1 \frac{\Delta r}{v} (k - 1) \quad (16)$$

Разрешающая способность по дальности:

$$\Delta r = \frac{\Delta\varphi v}{\omega_1 (k - 1)} \quad (17)$$

$$\text{При } k=2; \Delta r = \frac{\Delta\varphi v}{\omega_1}.$$

Двухчастотный метод можно реализовать в обоих рассмотренных выше режимах ПРП и ПСП.

Однако при ПРП, за счет разности спектральной плотности мощности на измеряемых частотах  $\omega_1$  и  $k\omega_1$ , помехоустойчивость отсчетов будет хуже, чем для ПСП, поскольку в последнем случае энергетика сигнала при переходе на вторую частоту сохраняется, а изменяется лишь период повторения  $T$  последовательностей импульсов в группе при неизменном коэффициенте поглощения энергии сейсмических волн горной породой.

Недостатком двухчастотного режима является увеличение времени измерения и некоторое усложнение алгоритма обработки сигналов,.

Далее сопоставим разрешающую способность (РС) фазового метода по дальности при действии шумов по сравнению с импульсным методом, реализуемым системой «Енисей».

Согласно [1] разрешающая способность импульсного метода в виде среднеквадратичной оценки времени смещения определяется как:

$$\zeta_t = \left[ \frac{N_0}{4\pi^2 E f_0^2 + \alpha^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

где  $E$  – энергия сигнала на выходе сейсмоприемника

$$E = \int_0^T u_c^2(t) dt$$

$N_0$  – спектральная плотность мощнос-

ти шума;

$\alpha$  - параметр затухания сигнала;

$f_0$  - основная частота сигнала.

При различных  $\frac{\alpha}{f_0}$ ,

отношение сигнал/помеха  $q$ , можно оценить приближенно:

по времени:

$$\zeta_{t_{\min}} = 3.5q^{-1} \text{ мс} \quad (19)$$

Соответственно, РС по дальности получим в виде:

$$\Delta r_{\min} = v \zeta_{t_{\min}} = \frac{3.5v_p}{q} \quad (20)$$

Так, при  $q = \frac{U_c}{U_n}$  будем иметь:

$$\Delta r_{\min} = \frac{3,5 \cdot 4}{3} \approx 5 \text{ м}$$

Для фазового метода согласно (7, часть I):

$$\Delta \varphi = \frac{U_n}{U_c} = \frac{1}{q_\varphi} \text{ (рад)}$$

Так как  $\Delta \varphi = 2\pi f_0 \frac{\Delta r}{v_p}$  то:

$$\Delta r_\varphi = \frac{\Delta \varphi v_p}{2\pi f_0} = \frac{v_p}{q_\varphi 2\pi f_0} \quad (21)$$

Поскольку для ПСП отношение сигнал/помеха по мощности в  $n$  раз выше, чем для режима ПРП, где  $n$  – число используемых источников.

С учетом этого, из (21) будем иметь:

$$\Delta r_\varphi = \frac{\Delta \varphi v_p}{2\pi f_0} = \frac{v_p}{q_\varphi 2\pi f_0} \quad (22)$$

При  $f_0 = 40 \text{ Гц}$ ;  $n = 5$ ;  $v_p = 4000 \text{ м/с}$ ;  $q = 3$ . Из (22) получим:

$$\Delta r_\varphi = \frac{4000}{2\pi \sqrt{5} \cdot 3 \cdot 40} = \frac{100}{6,28 \sqrt{5} \cdot 3} \approx 2 \text{ м}$$

Полученные оценки – это потенциально-достижимая разрешающая способность по дальности импульсно-фазовой обработки сигналов при сейсморазведке в условиях белого шума.

Реальная разрешающая способность зависит от суммарного соотношения синхронная помеха плюс шум и на практике составляет величину порядка 10 м.

Таким образом, фазовый метод обработки сигналов, при использовании режима ПСП, по крайней мере, в  $\sqrt{n}$  улучшает разрешающую способность сейсморазведки по дальности.

Заметим, что вибрационная сейсморазведка не дает возможности производить фазовую обработку сигналов по причине неоднозначности фазового параметра.

## Выводы

1. Рассмотрена сравнительная разрешающая способность двух импульсно-фазовых методов обработки сейсмических сигналов, реализуемых с использованием группы источников «Енисей» при одновременном их возбуждении в параллельном (ПРП) и последовательном (ПСП) режимах.

2. За счет концентрации спектра мощности зондирующего сигнала в районе основной частоты в режиме ПСП разрешающая способность по дальности этого режима, при фазовых измерениях в  $\sqrt{n}$  раз выше, чем в режиме ПРП.

3. Возможна реализация фазового метода в виде:

- двухчастотного метода, путем сравнения приведенной к частоте измерения разности фаз на двух соседних гармониках.

- с использованием в качестве опорного - сигнал с сейсмоприемника расположенного вблизи излучателя.

- путем сопоставления разности фаз в двух соседних сейсмоприемниках (дифференциальный метод).

4. Фазовый параметр, за счет более высокой помехоустойчивости, дает возможность в потенциале выделить

более «тонких» информационных признаков из отраженного сигнала, чем существующие методы, однако этот вопрос требует специальных экспериментальных исследований.

### Литература

1. Детков В. А., Кашкин В. Б., Шайдуров Г. Я. «О сравнительной потенциальной точности измерений прихода волн от невзрывных источников». Технологии сейсморазведки, 2012, №3, с.89-93.

### Подробнее об авторах



Детков  
Владимир Алексеевич  
к. т. н, вице-президент по перспективным разработкам ЗАО «Геотек-Холдинг», управляющий директор ОАО «Эвенкиягеофизика»



Копылов  
Михаил Александрович  
директор Минусинского филиала ООО «Эвенкиягеофизика»



Шайдуров  
Георгий Яковлевич  
заслуженный деятель науки и техники РФ, д. т. н., профессор Военно-инженерного института Сибирского федерального университета



Шайдуров  
Роман Георгиевич  
зав. сектором Военно-инженерного института СФУ