

УДК 550.3:622.83

В.Л. Шкуратник

**КОНТАКТНЫЕ УСЛОВИЯ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С МАССИВОМ КАК ПОМЕХОВЫЙ ФАКТОР
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ
ГЕОКОНТРОЛЯ**

Рассмотрены особенности влияния помех, обусловленных несовершенством контактных условий пьезоэлектрических преобразователей с геосредой, на ультразвуковые измерения в массиве.

Ключевые слова: ультразвуковые методы, геоконтроль, контактные помехи, пьезопреобразователи, синхронное накопление.

При решении задач геоконтроля, связанных с исследованием структуры, свойств и состояния горных пород в окрестностях выработок, широкое распространение получили ультразвуковые (УЗ) методы [1]. Их практическая реализация неизбежно сопровождается влиянием помех различной физической природы, которые могут приводить к искажению, а в ряде случаев и полной потере геофизической информации. К наиболее значимым из этих помех относятся так называемые контактные помехи. По характеру проявления последние могут быть разбиты на две группы. Первую из них образуют аддитивные помехи. Они связаны с плохим, но постоянным в течение цикла измерений качеством контактных условий (КУ) пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) и геосреды в местах их сопряжения, и приводят к частичной потере акустической энергии сигнала, а также определенному подавлению его высокочастотной составляющей. Вторая группа объединяет так называемые модуляционные помехи, связанные с изменением качества КУ в процессе каждого цикла измерений, что приводит к некоррелированным случайным флуктуациям параметров УЗ сигнала.

Если контактные помехи первой группы могут быть скомпенсированы увеличением чувствительности электроакустического тракта УЗ приборов, то борьба с помехами второй группы возможна только на основе статистических методов, например, синхронного накопления, которое теоретически позволяет выделить на фоне помех сколь угодно малые сигналы. В то же время реализация способа накопления сопряжена с увеличением времени измерений и значительным удорожанием аппаратного обеспечения последних. Поэтому на практике стремятся всячески уменьшить влияние КУ ПЭП с контролируемой средой. Традиционно это достигается использованием специальных контактных смазок, согласующих четвертьволновых протекторов и протекторов из полиуретана и акустической резины в сочетании с избыточным давлением прижатия ПЭП P_0 . Однако опыт УЗ измерений показывает, что роль последнего в обеспечении надёжных КУ далеко не однозначна и требует отдельного рассмотрения, которому и посвящена настоящая работа.

Граничные условия в месте контактирования акустического преобразователя с поверхностью контролируемой области зависят от испытываемого им прижимного усилия. В работе [2] показано, что для учета этой зависимости в режиме излучения вместо условия $\sigma_{zz} = -P_0$ (где P_0 - давление преобразователя, σ_{zz} - вертикальная компонента тензора напряжений) следует использовать условие

$$\sigma_{zz} = K_B \cdot U_z - P_0, \quad (1)$$

где U_z - вертикальная компонента смещения в области контакта, K_B - коэффициент влияния статического давления $P_{CT} = F/(\pi a^2)$, F - величина прижимающей силы, a - радиус преобразователя, $P_0 \sim \exp(-i\omega t)$.

Оценим область давлений P_{CT} , в пределах которой изменение граничных условий еще достаточно мало, чтобы значимо влиять на параметры излучаемого сигнала. Для этого воспользуемся первой краевой задачей из рассмотренного в [3] итерационного ряда:

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zz}^{(0)} + \sigma_{zz}^{(1)}, \quad (2)$$

где $\sigma_{zz}^{(0)} = -P_0$; $\sigma_{zz}^{(1)} = K_B U_z^{(0)}$;

$$0 \leq r \leq a \quad 0 \leq r \leq a$$

r - текущее значение цилиндрической координаты для задания граничных условий на поверхности z_0 .

Отметим, что в (2) $\sigma_{zz}^{(0)}$ и $U_z^{(0)}$ - соответственно компоненты напряжения и смещения при $P_{CT} = 0$, а $\sigma_{zz}^{(1)}$ - член, учитывающий влияние $P_{CT} \neq 0$.

Представляя в (2) смещения и напряжения в виде интегралов Фурье-Бесселя, аналогично работе [3], получаем, что скалярный потенциал Φ и компонента векторного потенциала Ψ имеют вид

$$\Psi(\lambda) = [i2\lambda v_p / (2\lambda^2 - K_S^2)] \cdot \Phi(\lambda); \quad (3)$$

$$\Phi(\lambda) = -aP_0 \cdot (2\lambda^2 - K_S^2) \cdot [J_1(\lambda a) + Q(\lambda)] / [\mu' \cdot W(\lambda)], \quad (4)$$

где $Q(\lambda) = (\lambda \cdot i \cdot K_B \cdot K_S^2 / \mu') \int_0^\infty \sqrt{K_p^2 - \xi^2} J(\xi a) V(\xi, \lambda) \cdot W^{-1}(\xi) d\xi$,

$$V(\xi, \lambda) = a(\xi^2 - \lambda^2)^{-1} [\xi J_0(\lambda a) J_1(\xi a) - \lambda J_0(\xi a) \xi_1(\lambda a)],$$

$$W(\xi) = (2\lambda^2 - K_S^2)^2 + 4\lambda^2 \cdot v_p \cdot v_s, \quad v_{p,s} = \sqrt{K_{p,s}^2 - \lambda^2},$$

$v_{p,s}$ и $K_{p,s}$ - скорости распространения и волновые числа продольных и поперечных волн, соответственно, λ - параметр интегрального разложения; μ' - коэффициент Ламе; J_0, J_1 - цилиндрические функции Бесселя нулевого и первого порядка; ξ - переменная интегрирования, K_p и K_s - волновые числа продольных и поперечных волн, соответственно.

Используя соотношения (3), (4) и результаты работы [3] (проводя в дальней зоне оценку интегралов методом перевала) получаем смещение продольной волны, распространяющейся в направлении максимума диаграммы направленности

$$U_p = a^2 P_0 (2\mu')^{-1} \cdot K_p^2 \cdot K_S^{-2} \cdot R \cdot \exp(iK_p R) \cdot F_p, \quad (5)$$

где $F_p = 1 + Q$;

$$Q \approx - \left[\sqrt{2} K_B \cdot \exp(-i\pi/4) / \mu' K_p^2 a \right] \left\{ \left[2\pi^{1/2} (K_S \cdot K_p / K_R^2)^2 \cdot \sqrt{K_p a} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times J_1(K_R a) \exp(iK_R a) \right] / \left[W'(K_R) / K_R^3 \right] - \left[\sqrt{2} K_p \cdot J_1(K_p a) \exp(iK_p a) \right] / \left[a K_S^2 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (2K_p^2 / K_S^2 - 1)^2 \right] - 2\sqrt{2} K_p^2 (1 - K_p^2 / K_S^2) J_1(K_S a) \cdot \exp(iK_S a) / a K_S^3 \right\};$$

R - расстояние до преобразователя; K_R - волновое число рэлеевской волны.

Если $|Q| \leq 0,3$, то влияние P_{CT} на граничные условия достаточно мало. При $|Q| > 3$ граничные условия определяются в основном прижимом.

Численная оценка по формуле (5) проводилась для следующих значений входящих в них параметров:

$$v_p = 4500 \text{ м/с}, \quad v_p / v_s = 1,8, \quad a = 0,015 \text{ м}, \quad f = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Гц}. \text{ При этом}$$

$$Q \approx 8,97 \cdot 10^{-4} (K_B / \mu') \cdot (1 - i \cdot 0,307),$$

где $K_B \left[\text{Н/м}^3 \right]$, $\mu' = 5,26 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Условия слабого нагружения выполняется при $(K_B / \mu') \leq 3,72 \cdot 10^2 \text{ 1/м}$.

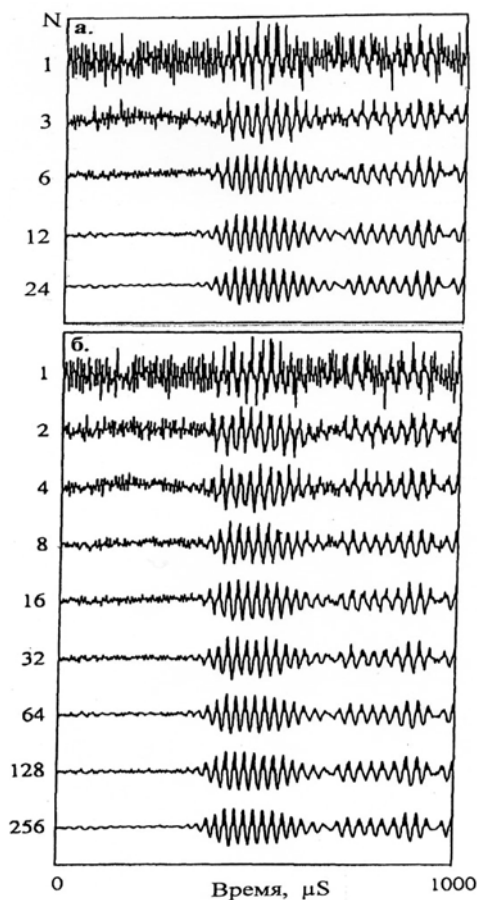
Из результатов работы [2] следует, что при $P_{CT} \leq 0,077 \text{ МПа}$ отношение $K_B / (\mu' \cdot P_{CT})$ может быть заменено постоянной величиной $\tilde{K} \approx 3,71 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 / \text{Н}$. Поэтому условие слабого нагружения справедливо при

$P_{CT} = (K_B / \mu' \cdot \tilde{K}) \leq 10^4 \text{ Н/м}^2 = 0,01 \text{ МПа}$. Такое давление, хотя и не требует принятия особых мер по стабилизации КУ, но как правило оказывается недостаточным для обеспечения малого уровня потерь на границе преобразователь-массив.

Увеличение P_{CT} до $0,1 \text{ МПа}$ и более приводит к преобладающему влиянию нагрузки на имеющие место граничные условия. В результате наряду с повышением чувствительности тракта увеличивается влияние стабильности контактных условий на уровень акустического сигнала, то есть фактически возрастает уровень модуляционной помехи. Отмеченное можно проиллюстрировать результатами следующего эксперимента.

Было осуществлено УЗ прозвучивание блока тёмно-серого крупнозернистого алевролита базой $L = 1,37 \text{ м}$. При этом на одной стороне блока на расстоянии $0,1 \text{ м}$ друг от друга размещались два излучающих ПЭП с рабочей частотой $38,5 \text{ кГц}$, первый из которых подключался к выходу УЗ прибора УД2-16, а второй (с полосой частот $40 - 50 \text{ кГц}$) – к генератору шума. Причём амплитуды импульсного сигнала и шумовой помехи (со средним равным нулю) были равны между собой. В УЗ приборе была предусмотрена возможность синхронного накопления принятых сигналов, а его приёмный ПЭП размещался на противоположной стороне блока симметрично относительно излучающих ПЭП.

На рисунке представлены осциллограммы принятых сигналов при изменении числа N реализаций, накопленных в рамках одного цикла измерений.



Осциллограммы УЗ сигналов при воздействии шумовой помехи и различном числе N накопленных реализаций а условиях слабого (а) и сильного (б) нагружения излучающего ПЭП

При этом осциллограммы на рис. 1, а соответствуют случаю, когда КУ первого излучающего ПЭП менялись после каждой из реализаций и при этом соблюдались условия слабого нагружения. Осциллограммы на рис. 1, б отражают результаты накопления в случае, когда условия слабого нагружения первого ПЭП не соблюдались, то есть при $|Q| > 3$.

Из сравнения данных на рис. 1, а и 1, б следует, что для надёжного выделения полезного сигнала на фоне шумовой помехи в условиях слабого нагружения ПЭП с геосредой требуется реализовать синхронное накопление примерно в 10 раз меньшего числа сигналов по сравнению с сильным нагружением ПЭП. Физически достигаемый эффект становится вполне понятным, если учесть, что при слабом нагружении уменьшается роль модуляционной помехи и, соответственно, увеличивается синхронность накапливаемых сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы. – М.: МГИ, 1990, с. 103.
2. Кондратьев А.И. Метод приближенного расчета формы ультразвуковых импульсов. – Дефектоскопия, 1985, № 1, с. 53-59.
3. Данилов В.Н. О влиянии статического давления прямого преобразователя на направленность поля излучения. – Дефектоскопия, 1986, № 5, с. 24-28.
4. Ямщиков В.С., Данилов В.Н., Шкуратник В.Л. Особенности возбуждения и приема упругих волн в твердом слое преобразователем прошневого типа. – Дефектоскопия, 1983, № 3, с. 16-23. **МАБ**

Коротко об авторе

Шкуратник В.Л. – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Физико-технический контроль процесс горного производства», Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru