

## Адаптивні сейсмічні дослідження: моделі реєстрації сейсмічних полів

© В. І. Роман<sup>1</sup>, Г. А. Шпортюк<sup>2</sup>, Д. М. Гринь<sup>1</sup>, Н. І. Мукоєд<sup>1</sup>, 2011

<sup>1</sup>Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Український державний геологорозвідувальний інститут, Київ, Україна

Надійшла 3 вересня 2011 р.

Представлено членом редколегії Пилипенком В. М.

В статье рассматриваются принципы адаптивных сейсмических наблюдений, являющиеся основой создания адаптивных сейсморегистрирующих комплексов сейсморазведочного и сейсмологического назначения.

Principles of adaptive seismic observations, which are the basis for creation of adaptive seismic-registering complexes applicative for seismic exploratory and seismological purpose have been considered.

Суттю адаптивних сейсмічних досліджень є урахування сейсмогеологічних умов їх виконання з метою отримання максимального обсягу інформації про геологічне середовище з мінімальними витратами енергії і матеріальних ресурсів [Теория ..., 1998; Жуков, Шнеерсон, 2000; Жуков и др., 2011].

Згідно з [Гурвич, Боганик, 1980], сейсмореєструвальним комплексом (далі — сейсмокомплексом) називають сукупність технічних і технологічних засобів збудження, приймання і реєстрування сейсмічних сигналів; фізичним спостереженням (далі — фізспостереженням) називають одиницю обсягів сейсмічних спостережень, яку визначають за сукупністю технічних і технологічних заходів і операцій, пов'язаних з отриманням звітних сейсмограм при незмінному положенні пунктів збудження і приймання сейсмічних сигналів.

Предмет статті — адаптивна технологія функціонування сейсмокомплексу в процесі відпрацювання фізспостережень.

Використання адаптивної технології спостереження й перетворення сейсмічних сигналів потребує кінематичної і динамічної повноти відображення сейсмічних явищ і процесів. Для відображення та аналізу кінематики сейсмічних полів визначальною є схема екіпараметричних поверхонь фронтів і годографів хвиль відповідно у просторовому і часовому вимірах. Для відображення і аналізу динаміки сейсмічних полів визначальною є схема, згідно з якою перетворення сейсмічного сигналу між фіксованими точками геологічного середовища розглядають, як результат дії деякої лінійної системи з певною передавальною функцією.

Завданням адаптивної технології сейсмічних спостережень є визначення передавальної функції геологічного середовища.

У сейсмореєструвальному сенсі входом і виходом зазначеної лінійної системи перетворення сейсмічних сигналів є відповідно пункти їх збудження і приймання, а передавальною функцією — імпульсна сейсмограма, яка є відгуком геологічного середовища на імпульсне (теоретично  $\delta$  — імпульсне, де  $\delta$  — дельта-функція) збудження сейсмічних хвиль.

Уподібнене дії лінійної системи перетворення сейсмічного сигналу геологічним середовищем в спектральній формі має вигляд

$$\tilde{u}(\omega) = \tilde{a}(\omega) \cdot \tilde{s}(\omega), \quad (1)$$

де  $\tilde{u}(\omega)$ ,  $\tilde{a}(\omega)$ ,  $\tilde{s}(\omega)$  — спектри, функції частоти  $\omega$ , відповідно спостережуваного сигналу, збуджуваного сейсмоджерелом зондувального сигналу та імпульсної сейсмограми, визначення якої є метою сейсмічних спостережень.

У часовій формі добуток (1) виражається згорткою [Гурвич, Боганик, 1980]

$$u(t) = a(t) * s(t), \quad (2)$$

де  $u(t)$ ,  $a(t)$ ,  $s(t)$  — функції часу  $t$ , фізичний зміст яких наведено вище.

З урахуванням завад, зумовлених впливами довкілля пунктів приймання, первинна спостережена сейсмограма має вигляд

$$v(t) = a(t) * s(t) + n(t), \quad (3)$$

де  $n(t)$  — сторонні завади, не пов'язані з передбаченою методикою і технологією сейсмічних досліджень цільовою дією сейсмоджерела.

В (1) і (2) вважається, що апаратурними мультиплікативними і адитивними ускладненнями спостережуваних сигналів можна знехтувати, оскільки вони можуть бути передбачені і по можливості усунути на стадії конструювання і виготовлення апаратури або враховані в (3) у процесі оброблення сейсмосаписів.

Далі незалежно від типу і характеру дії використовуваних сейсмоджерел вживається притаманна вібраційним сейсмічним дослідженням термінологія, згідно з якою первинна спостережена сейсмограма називається віброграмою, а отримана кореляційним перетворенням віброграми квазіімпульсна сейсмограма — корелограмою.

Для сучасних сейсмічних досліджень характерними є просторова дискретність систем спостережень (просторова локалізація пунктів збудження і приймання сейсмічних сигналів) та часова і амплітудна дискретизація сейсмосаписів, зумовлена використанням цифрової і комп'ютерної техніки їх реєстрування і оброблення. Відповідно, математичними засобами зображення сейсмічних сигналів та їх природних, технічних і технологічних перетворень є числові вектори і матриці скінченної розмірності, яка, однак, може бути значною і налічувати для векторів десятки (сейсморозвідка) – сотні (сейсмологія) тисяч елементів.

У позначеннях (3) для скінченновимірних векторів дискретизованих сигналів віброграма (3) у матрично-векторній формі має вигляд

$$v = As + n, \quad (4)$$

де  $A$  — прямокутна згорткова  $(i+j-1) \times j$  — матриця ( $i$  — розмірність вектора  $a$ ;  $j$  — розмірність вектора  $s$ ), стовпці якої отримані  $j$  зсувами зверху вниз доповнюваного нулями на початку (крім першого стовпця) і в кінці (крім останнього стовпця) вектора  $a$  у такий спосіб, що верхній правий і нижній лівий кути матриці заповнені нульовими елементами.

Відповідно, корелограма віброграми (4) у матрично-векторній формі має вигляд

$$k = A^T v = A^T As + A^T n, \quad (5)$$

де  $A^T$  — транспонована матриця  $A$ .

Наближення  $\hat{s}$  імпульсної сейсмограми  $s$  може бути отримане розв'язанням системи рівнянь

$$A^T A \hat{s} = k, \quad (6)$$

де  $A^T A$  — квадратна  $j \times j$ -матриця.

Розв'язок системи рівнянь (6)

$$\hat{s} = (A^T A)^{-1} k = s + (A^T A)^{-1} A^T n, \quad (7)$$

є шуканою імпульсною сейсмограмою, ускладненою залишковою завадою.

Отже, визначення імпульсної сейсмограми полягає у належному зменшенні величини залишкової завади в (7).

Звичайно якість спостережених сейсмограм характеризується відношенням сигнал-завада, яке є відношенням амплітуди цільового сигналу до середньоквадратичного значення завади [Теория..., 1998; Жуков, Шнеерсон, 2000; Жуков и др., 2011; Гурвич, Боганик, 1980]. Інтегральний (в частині завад) зміст такого показника не дає підстав для визначення того, яка область частот завади і якою мірою ускладнює досягнення потрібної якості спостережень, і не орієнтує дослідника на протидію довільним за спектральним складом завадам збудженням відповідних спектрально диференційованих зондувальних сигналів.

Вимогам адаптивних сейсмічних досліджень як показник якості спостережень відповідає спектр відношення сигнал-завада, який визначається як невід'ємна функція частоти, значеннями якої для кожного значення частоти є відношення відповідних значень модулів спектрів цільового сигналу і завади [Роман, 2005].

Дієвий характер такого показника якості спостережень зумовлений тим, що геологічні завдання сейсмічних досліджень можуть бути виражені у формі заданих спектрів відношення сигнал-завада, а алгоритм функціонування сейсмокомплексу в процесі відпрацювання фізспостереження визначається метою досягнення їх заданих параметрів.

Діапазон значущих частот заданих спектрів відношення сигнал-завада в технологічному розумінні визначає часову роздільну здатність сейсмічних спостережень, а в результативному сенсі — часову роздільність сигналів на звітних сейсмограмах фізспостережень. Аналогічно значення заданих спектрів відношення сигнал-завада як функції частоти в технологічному розумінні визначають амплітудну роздільну здатність сейсмічних спостережень, а в результативному сенсі — досягнуту точність визначення амплітуд сигналів на звітних сейсмограмах фізспостережень. Таким чином, заданими спектрами відношення сигнал-завада регламентується точність визначення кінематичних і динамічних параметрів сейсмічних хвиль, або, іншими словами, детальність сейсмічного вивчення геологічного середовища.

Регламентований заданими спектрами відношення сигнал-завада еталон якості відпрацювання фізспостережень встановлює стан

дарт якості виконуваних обсягів сейсмічних досліджень в цілому. Кількісні значення параметрів заданих спектрів відношення сигнал-завада визначаються вимогами і потребами інтерпретаційного оброблення і власне інтерпретації матеріалів сейсмічних досліджень.

Адаптивне функціонування сейсмокомплексу в процесі відпрацювання фізспостережень здійснюється у відповідності до результатів порівняння заданих і фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада.

У разі їхнього розходження параметри зондувальних сигналів для продовження відпрацювання фізспостереження визначаються дефіцитними ділянками частот фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада. Для вібраційних сейсмокомплексів межі дефіцитних ділянок визначають діапазон частот вібрації, а глибина дефіцитних ям — енергію зондувальних сигналів. Допустимі значення силових і енергетичних параметрів збуджуваних і спостережуваних вібраційних сигналів (амплітуди сили вібрації, тривалості віброграм і, відповідно, тривалості сеансів вібрації, швидкості регулювання амплітуди і частоти вібрації) обмежені технічними можливостями вібраційних сейсмокомплексів. Практично єдиним способом заповнення дефіцитних ям спектрів відношення сигнал-завада є збільшення числа сеансів вібрації, відповідно до квадратичної залежності необхідної тривалості вібрації від величини потрібного підвищення відношення сигнал-завада [Теоря ..., 1998].

Максимальна частотна диференційованість спектра відношення сигнал-завада, згідно з його наведеним визначенням, відповідає можливостям і потребам апостеріорного аналізу зареєстрованих сейсмозаписів. Можливість детальної диференціації зумовлена апостеріорною детермінованістю сигналів і їх спектрів, а її необхідність — інформаційною і економічною доцільністю, оскільки у разі осереднення фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада їхня фіктивна надлишковість суперечить дотриманню вимог якості спостережень, а фіктивна дефіцитність призводить до невикористаних витрат енергії і матеріальних ресурсів.

Однак за потреби продовження відпрацювання фізспостереження апріорне визначення параметрів зондувальних сигналів з притаманним йому використанням імовірних середніх значень спектрів відношення сигнал-завада є неминучим. Співвідношення апостеріорних здобутків і апріорних втрат визначається об-

числювальними можливостями комп'ютерного оснащення адаптивних сейсмокомплексів. Найприйнятнішими є щосеансове контролювання показників фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада і односеансовий термін використання визначених параметрів зондувальних сигналів. Зменшення зростаючих при цьому обсягів обчислювальних операцій може бути досягнуто алгоритмічно спрощеним сепаруванням сукупності сейсмореєструвальних каналів і цільових сигналів на предмет виявлення серед них найкритичніших стосовно досягнення показників заданих спектрів відношення сигнал-завада. Визначені у такий спосіб мажорантні для решти сейсмореєструвальних каналів і цільових сигналів параметри зондувальних сигналів використовують для продовження відпрацювання фізспостереження.

В міру поповнення сукупності застосованих у процесі відпрацювання фізспостереження зондувальних сигналів доповнюють і трансформують матрицю і праву частину системи рівнянь (6) і підвищують точність наближеного визначення імпульсних сейсмограм (7).

На кожному етапі відпрацювання фізспостереження відповідним розподілом спостережених сейсмозаписів забезпечують отримання двох статистично еквівалентних імпульсних сейсмограм (7), суму і різницю яких використовують для обчислення модулів спектрів цільових сигналів і модуля спектра завади та спектра відношення сигнал-завада.

Відпрацювання фізспостереження завершують досягненням фактично отриманими спектрами відношення сигнал-завада показників їх заданих відповідників для усіх цільових сигналів звітної сейсмограми фізспостереження.

Методичною і технологічною нормою глибинних сейсмічних досліджень (нафтогазова сейсморозвідка, сейсмічне зондування надр) є групування сейсмоджерел [Теоря..., 1998; Жуков, Шнеерсон, 2000; Жуков и др., 2011; Гурвич, Боганик, 1980]. Навіть у разі технічної ідентичності останніх збуджуваних сейсмоджерелами групи зондувальні сигнали мають відмінності, зумовлені локальними особливостями взаємодії кожного з сейсмоджерел з геологічним середовищем.

Технологічно прийнятний принцип адаптивного групування сейсмоджерел полягає у суміщенні в часі сеансів їх незалежної роботи з подальшим виокремленням з інтерференційних групових сейсмозаписів парціальних сейсмограм окремих сейсмоджерел.

Незалежність роботи сейсмоджерел групи досягають  $(a_{ij})$ -матричним ( $i=1, 2, \dots, p$ -індекс сеанса;  $j=1, 2, \dots, q$ -індекс сейсмоджерела;  $p \geq q$ ) урізноманітненням зондувальних сигналів, збуджуваних окремими сейсмоджерелами.

Аналогом виразу (3) у разі групування сейсмоджерел є виражена у згортковій формі сукупність інтерференційних сеансових віброграм

$$v_i = \sum_{j=1}^q a_{ij} * s_j + n_i, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (8)$$

яка у матрично-векторній формі є аналогом виразу (4) і має вигляд

$$v_i = \sum_{j=1}^q A_{ij} s_j + n_i, \quad i = 1, 2, \dots, p. \quad (9)$$

Аналогами векторних елементів  $a_{ij}$  матриці  $(a_{ij})$  в (8) є матриці  $A_{ij}$  в (9), які подібно матриці  $A$  в (4) є згортковими прямокутними матричними елементами блокової матриці  $(A_{ij})$ .

Відповідну матриці  $(A_{ij})$  матрицю корелювання віброграм (9)  $(A_{ij}^T)^T$  будують заміною матричних блоків  $A_{ij}$  матриці  $(A_{ij})$  їх транспонованими відповідниками  $A_{ij}^T$  і транспонуванням отриманої блокової матриці  $(A_{ij}^T)$ . Сукупність групових інтерференційних корелограм отримують аналогічно (5):

$$K = \mathbf{A}^T V = \mathbf{A}^T \mathbf{A} S + \mathbf{A}^T N, \quad (10)$$

де  $\mathbf{A} = (A_{ij})$ ,  $\mathbf{A}^T = (A_{ij}^T)^T$ , а отримані транспонуванням послідовностей векторів-рядків  $(k_1, k_2, \dots, k_q)$ ,  $(v_1, v_2, \dots, v_p)$ ,  $(s_1, s_2, \dots, s_q)$ ,  $(n_1, n_2, \dots, n_p)$  вектори-стовпці  $K, V, S, N$  є груповими аналогами векторів  $k, v, s, n$  в (5).

Розв'язком аналогічної (6) системи рівнянь

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \hat{S} = K \quad (11)$$

є аналогічний вектору (7) вектор-стовпець

$$\hat{S} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} K = S + (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T K \quad (12)$$

вертикальної послідовності вектор-стовпців наближень  $\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_q$  парціальних імпульсних сейсмограм  $s_1, s_2, \dots, s_q$  групованих сейсмоджерел.

Технологічно прийнятним способом урізноманітнення збуджуваних групою сейсмоджерел

зондувальних сигналів є побудова матриць  $(a_{ij})$ ,  $(A_{ij})$ ,  $\mathbf{A}$  та їх транспонованих відповідників на основі сигналу потрібного спектрального складу з присвоєнням йому знаків елементів матриць Адамара [Математическая..., 1977]. Порядок використуваної матриці Адамара має перевищувати, принаймні на одиницю, кількість сейсмоджерел групи. Отримані, згідно з (8)—(12), наближення парціальних нульових імпульсних сейсмограм відповідних уявних «німих» сейсмоджерел використовують для визначення модулів спектрів завад, потрібних для обчислення спектрів відношення сигнал-завада.

Для одинарного сейсмоджерела використання матриці Адамара другого порядку зводиться до обчислення суми і різниці статистично еквівалентних наближень імпульсної сейсмограми.

Актуальним у випадку використання групи сейсмоджерел у зв'язку зі збільшенням обсягів обчислювальних операцій є визначення мажорантних параметрів зондувальних сигналів.

Незалежність функціонування групованих сейсмоджерел у складі адаптивних сейсмокомплексів зумовлює просторову свободу їх використання на площах досліджень у відповідності до потреб методики робіт.

Таким чином, зняряддям здійснення адаптивної технології сейсмічних спостережень є адаптивні сейсмокомплекси.

Наявність критерію оптимального коригування і результативного завершення відпрацювання фізспостережень у вигляді спектрів відношення сигнал-завада є сприятливим чинником створення адаптивних автоматизованих сейсмокомплексів. У промисловій сейсморозвідці інтенсивна адаптивна технологія досліджень є альтернативним доповненням сучасної екстенсивної методології великих обсягів високопродуктивних спостережень з властивою їм надлишковістю валу первинної інформації і засобів її отримання. Повнота і детальність адаптивного вивчення геологічного середовища визначаються межею економічної доцільності їхнього підвищення, допоки є позитивний баланс вартості робіт і цінності отримуваних геологічних результатів. У сейсмології привабливою є перспектива створення адаптивної глобальної системи активного сейсмічного моніторингу надр.

### Список літератури

Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / Под ред. М. Б. Шнеерсона. — Москва: Недра, 1998. — 527 с.

Жуков А. П., Шнеерсон М. Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. — Москва: Недра, 2000. — 100 с.

Жуков А. П., Тищенко И. В., Калимулин Р. М., Горбунов В. С., Тищенко А. И. Адаптивная вибросейсморазведка в условиях неоднородного строения верхней части геологического разреза // Технологии сейсморазведки. — 2011. — № 2. — С. 5—12.

Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка:

учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. — Москва: Недра, 1980. — 551 с.

Роман В. І. Оптимальна віброімпульсна сейсморозвідка // Зб. наук. праць УкрДГРІ. — 2005. — № 2. — С. 154—157.

Математическая энциклопедия. — Москва: Сов. энцикл., 1977. — Т. 1. — С. 85.