

© М.П. Рогачук

М.В. Тищенко

С.В. Оломський

Ю.А. Василюк

ДП «Науканафтогаз»

Національної акціонерної компанії

«Нафтогаз України»

С.М. Рябошапко

ЗАТ «ГеоСейсКонтроль», м. Москва

В.І. Роман

канд. фіз.-мат. наук

Н.І. Мукоєд

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

## Автоматизація супервізії сейсмічних досліджень

УДК 550.834.02-047.64

*У статті викладено алгоритмічні основи роботи програмно-технічних засобів автоматизованого супервайзерського контролю сейсмічних досліджень у складі адаптивних сейсмокомплексів.*

**Ключові слова:** сейсморозвідка, супервізія, сигнал-завада, фізпостереження.

*В статті изложены алгоритмические основы работы программно-технических средств автоматизированного супервайзерского контроля сейсмических исследований в составе адаптивных сейсмокомплексов.*

**Ключевые слова:** сейсморозведка, супервизия, сигнал-помеха, физнаблюдения.

*The paper presents algorithmic basics of software and hardware tools for automated supervisory control of seismic surveys within the adaptive seismic complexes.*

**Key words:** seismic survey, supervision, noise, observation.

Відповіддю на потреби і запити сучасної сейсморозвідки є розроблення та використання адаптивної технології сейсмічних досліджень і програмно-технічних засобів її здійснення [1, 2]. Техніко-технологічні можливості створення і застосування засобів адаптивної сейсморозвідки на сучасному етапі її розвитку ґрунтуються на новітніх досягненнях науки і техніки, зокрема її електронної, комп'ютерної та інформаційної галузей. Органічна кінематично-динамічна повнота адаптивної технології відповідає сучасним потребам і тенденціям розвитку сейсморозвідки, мотивованим збільшенням ролі та обсягів деталізації структурних об'єктів і не менш методично та технологічно складних пошуків і розвідки неструктурних геологічних утворень. Контрольованість і керованість адаптивних сейсмокомплексів за показниками якості сейсмозаписів надає можливість автоматичної комп'ютерної супервізії відпрацювання фізпостережень початкової і основної ланки технологічного циклу сейсмічних досліджень, включаючи і геологічну інтерпретацію отриманих результатів. Автоматична адаптивна супервізія ресстрації фізпостережень та їх відповідне коригування з метою досягнення заданих показників якості досліджень здійснюються в процесі відпрацювання проектного обсягу фізпостережень і, на відміну від існуючої практики супервізії, не призводять до порушення планомірності та поступальності польових робіт.

Кінцевою метою супервізії сейсморозвідувальних робіт є дотримання проектних показників їх якості, які передбачені інструкціями, вимогами замовника та геологічними завданнями сейсмічних досліджень. Ефективність упереджувальних проектних заходів щодо забезпечення якості досліджень

зазвичай спростовується непрогнозованістю і неможливістю належного урахування просторової і часової мінливості глибинних і поверхневих сейсмогеологічних умов виконання робіт і небажаних сейсмічних впливів довкілля. Ситуація ускладнюється високими темпами, продуктивністю сучасних сейсмічних досліджень і великими обсягами отримуваної при цьому інформації. Зазначені обставини зумовлюють недостатність існуючої практики супервізії сейсмічних досліджень, яка ґрунтується на апостеріорному аналізі матеріалів виконаних робіт і повторному відпрацюванні спостережень, якість яких виявилася такою, що не відповідає вимогам замовника.

Ключовим поняттям адаптивної технології сейсмічних досліджень і основою функціонування адаптивних сейсморозвідувальних комплексів є спектр відношення сигнал–завада, який визначається як невід'ємна функція частоти, значеннями якої є частка від ділення значення модуля спектра цільового сигналу на значення модуля спектра завади для кожного значення частоти в діапазоні частот досліджень [2]. Вимоги геологічних завдань досліджень виражаються у формі заданих спектрів відношення сигнал–завада, якими у сейсмічному сенсі регламентується часова і амплітудна роздільна здатність досліджень, в геологічному сенсі – просторова детальність і параметрична точність відтворення розрізу. В процесі відпрацювання фізпостережень за результатами зіставлення фактично отриманих спектрів відношення сигнал–завада та їх заданих відповідників визначають достатність відпрацювання фізпостереження або необхідність його продовження. В останньому випадку визначають параметри зондувальних сигналів для подальшого відпрацювання фізпостереження

і коригують його таким чином, щоб бажані показники заданих спектрів відношення сигнал–завада були досягнуті. Порівняння фактично отриманих і заданих спектрів відношення сигнал–завада і коригування відпрацювання фізспостереження може бути багатоетапним. Критерієм завершення відпрацювання фізспостереження є досягнення або перевищення фактично отриманими спектрами відношення сигнал–завада значень їх заданих відповідників для усіх цільових сигналів. У подальшому відпрацюванні обсягів сейсмічних досліджень з'являється можливість корекції застосування методичних прийомів у складних поверхневих чи глибинних сейсмогеологічних умовах.

Наявність критерію оптимального коригування і результативного завершення відпрацювання обсягу фізспостережень зумовлює можливість створення адаптивних автоматизованих систем контролю якості зареєстрованих сейсмічних даних.

Оскільки використання спектрів відношення сигнал–завада має порівняльний характер, правомірним є вживане далі їх енергетичне визначення як відношення квадратів модулів сигналів і завад.

За своєю суттю спектр відношення сигнал–завада  $\rho(\omega) = \frac{B_f(\omega)}{B_n(\omega)}$  є спектром вихідного сигналу оптимального фільтра виявлення  $D(\omega) = \frac{F^*(\omega)}{B_n(\omega)}$  довільного відомого вхідного сигналу  $f(t)$  зі спектром  $F(\omega)$  на фоні завад  $n(t)$ ,

$$\rho(\omega) = D(\omega)F(\omega) = \frac{F^*(\omega)F(\omega)}{B_n(\omega)} = \frac{|F(\omega)|^2}{B_n(\omega)} = \frac{B_f(\omega)}{B_n(\omega)}, \text{ де } F^*(\omega) - \text{ комп-}$$

лексно спряжений спектр сигналу  $f(t)$ ,  $B_f(\omega)$  – спектр його автокореляційної функції  $f(t)$ ,  $B_n(\omega)$  – спектр автокореляційної функції завади  $n(t)$  [3]. Оптимальний фільтр виявлення незалежно від інтенсивності спостережуваного сигналу забезпечує максимум  $\rho_m$  відношення квадрату заданого зазвичай амплітудного значення сигналу до дисперсії завади

$$\rho_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|F(\omega)|^2}{B_n(\omega)} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_f(\omega)}{B_n(\omega)} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\omega) d\omega.$$

Інтегральний характер такого числового 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 відповідно спектрально диференційованих зондувальних сигналів.

Таким вимогам відповідає спектр відношення сигнал–завада  $\rho(\omega)$ , який як функція частоти забезпечує спектрально диференційоване коригування спостережень із метою їх оптимізації в мінливих сейсмогеологічних умовах робіт залежно від особливостей будови і складу геологічного середовища та інтенсивності і характеру завад.

Спектром відношення сигнал–завада однозначно визначається оптимальний вінерівський фільтр відтворення  $R(\omega) = \frac{B_s(\omega)}{B_s(\omega) + B_n(\omega)}$  сигналу  $s(t)$  за його реалізаціями  $u(t) = s(t) + n(t)$ . У свою чергу, оптимальний фільтр відтворення є спектральним множитком спеціалізованих оптимальних вінерівських фільтрів, узагальнений вираз яких визначається як фільтр коригування  $G(\omega) = R(\omega)S^{-1}(\omega)V(\omega)$ , де  $S^{-1}(\omega)$  – ідеальний

фільтр стиснення сигналу  $s(t)$ ,  $V(\omega)$  – спектр сигналу спеціалізації фільтра  $v(t)$ , до якого спостережені реалізації сигналу  $s(t)$  приводяться фільтром  $G(\omega)$  із мінімальною середньоквадратичною похибкою [3]. Для фільтра відтворення, зокрема,  $v(t) = s(t)$ ,  $V(\omega) = S(\omega)$ ; для фільтра стиснення  $v(t) = \delta(t)$ , де  $\delta(t)$  – дельта-функція,  $V(\omega) = 1$ .

Отже, спектри відношення сигнал–завада визначають алгоритмічну й технологічну упорядкованість і спрямованість оптимального відпрацювання фізспостережень. Оптимізація спостережень полягає в контрольномуаному і керованому протиставленні енергії збудження інформативних сейсмічних сигналів об'єктивно існуючим негативним чинникам впливу на якість досліджень із метою досягнення її заданих показників.

Вище розглянуто особливості оптимальної адаптації сейсмічних досліджень у їх спектрально-часовому викладі. Просторовий аспект питання має місце у разі одночасної роботи сейсмоджерел або груп сейсмоджерел, розміщених на площі робіт, на відстанях їх можливих сейсмічних взаємовпливів. Використання адаптивної технології з мінімальними наслідками для продуктивності спостережень обумовлює необхідність здійснення одночасної незалежної роботи згрупованих сейсмоджерел шляхом поєднання у часі сеансів збудження ними зондувальних сигналів із подальшим виокремленням сейсмограм окремих сейсмоджерел групи в процесі оброблення інтерференційних групових сейсмосаписів.

Технологічно прийнятним способом поєднання у часі сеансів одночасної незалежної роботи згрупованих сейсмоджерел є урізноманітнення збуджуваних ними зондувальних сигналів за схемою знаків елементів матриць Адамара [4]. Порядок використаної матриці Адамара повинен бути більшим або дорівнювати кількості одночасно працюючих сейсмоджерел, а кількість сеансів збудження і спостереження групових інтерференційних сейсмограм – кратною порядку матриці. Перевагою використання матриць Адамара порівняно з іншими можливостями забезпечення одночасної незалежної роботи сейсмоджерел є достатність маніпулювання полярністю збуджуваних ними сигналів. Амплітуда і форма останніх можуть бути довільними, але сталими для сеансів певного технологічного етапу відпрацювання фізспостереження.

Зазначені вимоги використання матриць Адамара є необхідними і достатніми для обчислення спектрів відношення сигнал–завада на сейсмограмах, збуджуваних кожним із одночасно працюючих сейсмоджерел, і відповідного коригування продовження відпрацювання кожним із них фізспостереження або його завершення у разі досягнення заданих показників якості досліджень.

У технічному відношенні автоматизація супервізії сейсмічних досліджень потребує збільшення обчислювальної потужності сейсмокомплексів і забезпечення необхідного обсягу двостороннього обміну інформацією між сеймостанцією і кожним із одночасно працюючих сейсмоджерел. Ці вимоги можна задовольнити шляхом встановлення додаткового комп'ютера на сеймостанції та відповідного вдосконалення системи керування сейсмокомплексів.

Відповідно до геологічного завдання досліджень та методи і технічного оснащення польових робіт на момент відпрацювання фізспостереження визначальними для його здій-

снення є задані спектри відношення сигнал–завада цільових сигналів і засоби кодування зондувальних сигналів одночасно і незалежно працюючих сейсмоджерел та сейсмокомплексів (на основі використання матриць Адамара).

На початковому етапі відпрацювання фізпостереження збудження зондувальних сигналів здійснюється у діапазоні частот, передбаченому геологічним та технічним завданнями. Початковий етап завершується, якщо забезпечена можливість виявлення осей синфазності цільових сигналів або найбільш інтенсивних із них за умови, що відомі кількісні співвідношення їх амплітуд із амплітудами решти цільових сигналів. Необхідні для цього дані на нових площах можуть бути отримані шляхом відпрацювання відповідних дослідних робіт або з досвіду відпрацювання попередніх обсягів на площах, дослідження яких продовжується.

Першочерговою ланкою оброблення спостережених сейсмограм початкового і взагалі будь-якого іншого виконаного етапу відпрацювання фізпостереження є виокремлення з групових інтерференційних сейсмозаписів сейсмограм, збуджуваних окремими одночасно працюючими сейсмоджерелами, та сейсмограм завад.

Далі виконується обчислення фактично отриманих спектрів відношення сигнал–завада цільових сигналів на виокремлених сейсмограмах одночасно працюючих сейсмоджерел, порівняння обчислених спектрів відношення сигнал–завада з їх заданими відповідниками і визначення за результатами порівняння спектрів спектральних і енергетичних параметрів зондувальних сигналів для продовження відпрацювання фізпостереження або спектральних і енергетичних показників для його завершення.

Найбільш придатними для використання у складі адаптивних сейсмокомплексів є спектрально керовані вібраційні сейсмоджерела. Виходячи з цього, подальший виклад особливостей застосування адаптивної технології для потреб супервізії сейсмічних досліджень виконується в термінах вібраційної сейсморозвідки.

Для об'єктивного геологічного аналізу матеріали спостережень повинні бути позбавлені технологічних наслідків їх отримання, подібно до того, як первинні сейсмограми вібраційної сейсморозвідки реєструються у формі віброграм, а інтерпретуються у формі корелограм. Однак корелограми не є остаточною формою відтворення геологічного середовища, не завуальованого технологічними деталями типу кореляційних завад. Вимогам адаптивної технології відповідають імпульсні сейсмограми, отримані в результаті деконволюції корелограм.

Незважаючи на проблеми деконволюційної інтенсифікації завад, позитивний ефект деконволюції полягає в тому, що завади відмежовуються нею від інформації про середовище і можуть бути нейтралізовані відповідною спектральною адресацією енергії збудження зондувальних сигналів.

Обчислення фактично отриманих спектрів відношення сигнал–завада цільових сигналів відповідно до алгоритму адаптивної технології виконується після виокремлення з групових сейсмозаписів сейсмограм окремих сейсмоджерел у формі віброграм або корелограм та їх деконволюційного перетворення в імпульсні сейсмограми.

Деконволюція корелограм в імпульсні сейсмограми є найбільш громіздкою і обтяжливою ланкою обчислювального

супроводження адаптивної технології, особливо у разі використання надбагатоканалних мегасистем спостережень [5]. З точки зору мінімізації енергії збудження сейсмічних сигналів і економії матеріальних ресурсів доцільним, крім того, є багаторазове за час відпрацювання фізпостереження коригування параметрів зондувальних сигналів із обчисленням фактично отриманих спектрів відношення сигнал–завада і необхідних для цього імпульсних сейсмограм [2]. Актуальним у зв'язку з цим є виявлення резервів зменшення обсягів обчислень передусім за рахунок зменшення обсягів деконволюційного перетворення корелограм в імпульсні сейсмограми, що досягається визначенням параметрів продовження відпрацювання фізпостереження або підстав його завершення лише для критичних обставин, які мають місце для найменш інтенсивних цільових сигналів на сейсмозаписах, ускладнених найбільш інтенсивними завадами. Для решти менш критичних сейсмозаписів такі мажорантні параметри є автоматично прийнятними. Відбір критичних сейсмозаписів здійснюється за обчислювально-економічними алгоритмами, що зумовлює належну оперативність функціонування адаптивних сейсмокомплексів.

#### Висновок

За результатами порівняння фактично отриманих і заданих спектрів відношення сигнал–завада прогнозується тривалість відпрацювання фізпостереження із досягненням заданих показників якості досліджень, яка для критичних сейсмозаписів може не відповідати встановленим нормам продуктивності виконання сейсмічних досліджень. У такому разі питання можливості вилучення сейсмозаписів окремих каналів системи спостережень із подальшого використання або доцільності продовження відпрацювання фізпостереження вирішуються відповідно до директивних настанов.

Порівняно з практикою суб'єктивної супервізії, здатної виявляти лише грубі порушення проектних показників сейсмічних досліджень, об'єктивна комп'ютерна супервізія має перспективу застосування у всьому діапазоні метрологічних можливостей адаптивної технології сейсмічних досліджень, який визначається межею економічної доцільності підвищення повноти і детальності вивчення надр, допоки існує позитивний баланс вартості робіт і цінності кінцевих геологічних результатів.

#### Список літератури

1. Жуков А.П. Сейсморазведка с вибрационными источниками / А.П. Жуков, С.В. Колесов, Г.А. Шехтман, М.Б. Шнейерсон. – Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2011. – 412 с.
2. Роман В.І. Адаптивні сейсмічні дослідження: моделі реєстрації сейсмічних полів / В.І. Роман, Г.А. Шпортюк, Д.М. Гринь, Н.І. Мукоєд // Геофизический журнал. – 2011. – № 6. – С. 152–156.
3. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка: учебн. для вузов / И.И. Гурвич, Г.Н. Боганик. – 3-е изд., перераб. – М.: Недра, 1980. – 551 с.
4. Математическая энциклопедия. – М.: Сов. энцикл., 1977. – Т.1. – С. 85.
5. Череповский А.В. Сейсморазведка с одиночными приемниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съемок / А.В. Череповский. – Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2012. – 134 с.