

Спектри відношення сигнал-завада адаптивних геофізичних досліджень

© В. І. Роман, 2014

Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна
Надійшла 25 лютого 2013 р.

Представлено членом реколегії В. М. Пилипенко

Спектр отношения сигнал-помеха — определяющий и решающий фактор адаптивной технологии геофизических, в частности, сейсмических исследований, является соответственно специализированным образцом универсального двуединого детерминистически-стохастического показателя адаптивного приближения физических реалий к их принципиально недостижимым математическим идеалам.

Ключевые слова: адаптивные исследования, спектр отношения сигнал-помеха, оптимальные фильтры, деконволюция, функционалы.

Спектр відношення сигнал-завада є характеристикою якості спостереження сигналів і визначається як невід'ємна функція частоти, значеннями якої для кожного значення частоти є відношення відповідних значень модулів спектрів сигналу і завади [Роман та ін., 2011]. В енергетичній формі спектр відношення сигнал-завада є відношенням квадратів значень модулів спектрів сигналу і завади. Оскільки застосування спектрів відношення сигнал-завада має порівняльний характер, використання їх у тій чи іншій формі є питанням зручності і не супроводжується жодними відмінностями оцінок.

Звичайно якість спостережень характеризують відношенням сигнал-завада, яке є відношенням амплітуди сигналу до середньоквадратичного значення завади, а по суті — інтегралом спектра відношення сигнал-завада [Гоноровський, 1977; Гурвич, Боганик, 1980]. Інтегральний зміст такого показника не дає підстав для висновків, який діапазон частот завади і якою мірою ускладнює досягнення потрібної якості спостережень, і не орієнтує дослідника на протидію довільним за інтенсивністю і спектральним складом завадам збудженням відповідних енергетично і спектрально диференційованих зондувальних сигналів.

Сигналами називають фізичні процеси — носії інформації [Гоноровський, 1977]. Геофізичні сигнали є, зокрема, носіями інформації про геологічне середовище. Особливість геофізичних сигналів полягає у тому, що інформація, отримання якої опікується дослідник, спонтанно набувається сигналами в процесі їх ви-

никнення і поширення в геологічному середовищі. Основою пасивних геофізичних досліджень є спостереження сигналів, спонтанно випромінюваних геологічним середовищем. Основою активних геофізичних досліджень є спостереження штучно збуджуваних зондувальних сигналів, спонтанно модульованих геологічним середовищем в процесі поширення у ньому.

Об'єктивною реальністю є ускладнення сигналів — носіїв інформації, завадами, які не несуть ніякої інформації про досліджувані об'єкти. Неіснуючі у неускладненому завадами вигляді сигнали, які номінально фігурують у понятті спектра відношення сигнал-завада, є теоретичною ідеалізацією. Практично можливим є підвищення точності визначення сигналів та їх інформативних параметрів, яке ґрунтується на статистичному ефекті повторюваності сигналів у їх повторних реалізаціях. Однак ідеальні значення і форми сигналів не досягаються ніколи.

Ефективними у сенсі гарантованого забезпечення потрібної якості досліджень є адаптивні геофізичні спостереження, визначальним і вирішальним чинником яких є спектри відношення сигнал-завада. Вимоги геологічних завдань досліджень можуть бути виражені у формі заданих спектрів відношення сигнал-завада. В процесі спостережень на основі зіставлення заданих і фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада параметри спостережень коригують таким чином, щоб регламентовані заданими спектрами відношення сигнал-завада показники якості досліджень були досягнуті.

Досягнення або перевищення заданих спектрів відношення сигнал-завада їх фактично отриманими відповідниками є критерієм завершення спостережень.

Для пасивних геофізичних досліджень єдиним суб'єктивним чинником протидії об'єктивно існуючим завадам з метою підвищення якості досліджень є збільшення статистики спостереження сигналів. Для активних геофізичних досліджень крім статистики спостережень суттєвим є суб'єктивний чинник розподілу енергії зондувальних сигналів у діапазоні частот досліджень. Контрольоване спектрами відношення сигнал-завада оптимальне використання енергії зондувальних сигналів є предметом і результатом адаптивної технології досліджень.

Метою цієї роботи є установлення фізичної і математичної суті поняття спектра відношення сигнал-завада порівнянням його з відомими фізичними і математичними аналогами. Робота ініційована розробленням адаптивної технології активних сейсмічних досліджень [Роман та ін., 2011], у контексті яких виконано подальший розгляд питання.

Спектр відношення сигнал-завада $\frac{B_s(\omega)}{B_n(\omega)}$ у його реальному наближенні є спектром вихідного сигналу оптимального фільтра виявлення $D(\omega) = \frac{S^*(\omega)}{B_n(\omega)}$ сигналу $s(t)$ зі спектром $S(\omega)$ в його реалізації $u(t)=s(t)+n(t)$, де $B_s(\omega)=S(\omega)S^*(\omega)=|S(\omega)|^2$ — спектр функції автокореляції сигналу $s(t)$; $S^*(\omega)$ — спектр, комплексно спряжений зі спектром $S(\omega)$; $B_n(\omega)$ — спектр функції автокореляції завади $n(t)$, некорельованої з сигналом $s(t)$; ω — частота, незалежна змінна сигналів у спектральній формі; t — час, незалежна змінна сигналів у часовій формі [Гурвич, Боганик, 1980].

Спектром відношення сигнал-завада односторонньо визначається оптимальний вінерівський фільтр відтворення

$$R(\omega) = \frac{B_s(\omega)}{B_s(\omega) + B_n(\omega)} = \frac{B_s(\omega)/B_n(\omega)}{1 + B_s(\omega)/B_n(\omega)}$$

сигналу $s(t)$ за його реалізаціями $u(t)$. У свою чергу, оптимальний фільтр відтворення є множителем спеціалізованих оптимальних вінерівських фільтрів, узагальнений вираз яких визначають 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 $v(t)$, до якого спостережені реалізації $u(t)$ сигналу $s(t)$

зводяться спеціалізованим фільтром $G(\omega)$ з мінімальною середньоквадратичною похибкою [Гурвич, Боганик, 1980].

Отже, спектр відношення сигнал-завада є основою оптимальної фільтрації природно ускладнених завадами спостережених сигналів, наслідком якої є мінімізація середньоквадратичного значення завад і, відповідно, максимізація фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада. Якщо для завершення відпрацювання фізичного спостереження цього недостатньо, виконують додаткове збудження зондувальних сигналів, за рахунок енергії яких здійснюють подальше наближення фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада до їх заданих відповідників.

Параметри заданих спектрів відношення сигнал-завада визначають за потребами інтерпретаційного оброблення і власне інтерпретації матеріалів сейсмічних досліджень. Діапазон значущих частот заданих спектрів відношення сигнал-завада визначає часову роздільну здатність, а значення їх як функції частоти — амплітудну роздільну здатність досліджень. Таким чином, відповідно до вимог геологічних завдань досліджень заданими спектрами відношення сигнал-завада регламентується точність визначення кінематичних і динамічних параметрів сейсмічних хвиль або, іншими словами, детальність сейсмічного вивчення геологічного середовища.

На кожному етапі відпрацювання фізспостереження шляхом деконволюції відповідно розподілених спостережених сейсмозаписів обчислюють дві статистично еквівалентні імпульсні сейсмограми, суму яких використовують для обчислення наближених значень модулів спектрів цільових сигналів, а різницю — для обчислення модуля спектра завади. Відношення модуля спектра цільового сигналу до модуля спектра завади дає наближене значення фактично отриманого спектра відношення сигнал-завада цільового сигналу.

Адаптивне відпрацювання фізспостережень здійснюють у відповідності до результатів порівняння заданих і фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада. У разі їх розходження параметри зондувальних сигналів для продовження відпрацювання фізспостереження визначають за дефіцитними ділянками частот фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада. Для вібраційних сейсмокомплексів частотні межі дефіцитних ділянок визначають діапазон частот вібрації, а величина дефіциту фактично отриманих

спектрів відношення сигнал-завада — енергію зондувальних сигналів. Допустимі значення 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 зменшення дефіциту фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада є збільшення кількості сеансів вібрації, відповідно до квадратичної залежності необхідної тривалості вібрації від величини потрібного підвищення відношення сигнал-завада [Теория..., 1998].

Адаптивне урахування просторової своєрідності сейсмогеологічних умов (поверхневих і глибинних особливостей будови і складу геологічного середовища та енергетичної і спектральної специфіки завад) полягає в конкретизації відпрацювання кожної фізичної точки спостережень. Якщо робота сейсмоджерел (або груп сейсмоджерел) і сейсмокомплексів здійснюється на віддальх їх сейсмічних взаємовпливів, технологічно необхідним і економічно доцільним є забезпечення одночасної незалежної дії сейсмоджерел з подальшим перетворенням спостережених інтерференційних сейсмозаписів у процесі їх оброблення до вигляду сейсмограм, отриманих з одинарними сейсмоджерелами. Альтернативою є малопродуктивна і економічно не виправдана послідовна польова реєстрація сейсмограм коливань, збуджуваних послідовно діючими одинарними сейсмоджерелами.

Відпрацювання фізспостереження контролюється вимогою прогресуючого наближення до заданих спектрів відношення сигнал-завада цільових сигналів їх фактично отриманих відповідників на відокремлених у результаті оброблення спостережених групових інтерференційних сейсмозаписів парціальних сейсмограмах кожного з одночасно працюючих сейсмоджерел. Відпрацювання фізспостереження завершують, якщо задані спектри відношення сигнал-завада досягнуті або перевищені їх фактично отриманими відповідниками для усіх цільових сигналів на парціальних сейсмограмах усіх одночасно працюючих сейсмоджерел.

Звичайно цільові сигнали, які відповідають різним структурним елементам або параметричним неоднорідностям геологічного середовища, характеризуються значним, подеколи надзвичайно великим динамічним діапазоном

амплітуд або інтенсивностей, як, наприклад, для відбитих хвиль за великої глибини досліджень. Необхідність продовження відпрацювання фізспостереження або можливість його завершення природно оцінювати за найбільш критичними сейсмозаписами, які характеризуються наявністю на них найменш інтенсивних цільових сигналів, ускладнених найбільш інтенсивними завадами. Достатнім для завершення відпрацювання фізспостережень є досягнення заданих спектрів відношення сигнал-завада їх фактично отриманими критичними відповідниками. Перевищення заданих спектрів відношення сигнал-завада у такому разі не має сенсу, оскільки потрібна їх норма передбачається геологічним завданням під час планування робіт, а її збільшення в процесі відпрацювання фізспостережень призводить до не виправданих витрат енергії, матеріальних ресурсів і робочого часу. Для некритичних ситуацій перевищення заданих спектрів відношення сигнал-завада їх фактично отриманими відповідниками є природним наслідком значної амплітудної відмінності цільових сигналів. При роботах методом відбитих хвиль такі обставини (великий динамічний діапазон цільових сигналів) можуть бути використані для урахування і виключення впливу нестабільної верхньої частини розрізу на динаміку сигналів у залягаючих глибше консолідованих породах.

Прогресуюче покращення фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада і наближення їх до заданих відповідників є вимогою забезпечення геологічної і економічної ефективності досліджень. Для цього параметри зондувальних сигналів для відпрацювання фізспостережень розраховують у такий спосіб, щоб ефективно співвідношення спектрів виконувалось.

Випадковий характер завад і ускладнених ними спостережених сигналів зумовлює необхідність імовірнісного аналізу суті спектра відношення сигнал-завада. Вичерпною характеристикою випадкової величини є функція розподілу ймовірностей її значень або однозначно відповідні їй характеристична і твірні функції [Корн, Корн, 1974]. Згідно з просторовою і часовою дискретністю систем спостережень і виражальних засобів сучасних сейсмічних досліджень, достатнім є аналіз розподілів імовірностей $p(x)$ дискретних випадкових величин та їх характеристичних $\chi(q) = \sum_x p(x)e^{iqx}$ (i — уявна одиниця, q — дійсний аргумент) і твірних

$\pi_x(s) = \sum_x p(x)e^{sx}$ (s — комплексний аргумент) функцій. Характеристична функція є образом оберненого перетворення Фур'є, твірна — образом оберненого двостороннього перетворення Лапласа функції розподілу ймовірностей значень випадкової величини. Оскільки перетворення Фур'є узагальнюється двостороннім перетворенням Лапласа, можна обмежитись розглядом твірних функцій.

За формою твірна функція розподілу ймовірності значень випадкової величини відповідає розв'язку диференціального рівняння зі сталими коефіцієнтами. Враховуючи навідний характер зазначеної аналогії, розглянемо однорідне диференціальне рівняння зі сталими дійсними коефіцієнтами, характеристичний многочлен якого є добутком квадратних характеристичних многочленів однорідних диференціальних рівнянь другого порядку зі сталими дійсними коефіцієнтами.

Однорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталими дійсними коефіцієнтами і комплексно спряженими коренями його характеристичного многочлена є математичною моделлю фізичної коливальної системи. Відповідне неоднорідне диференціальне рівняння вимушених коливань з гармонійною змущувальною силою моделює резонансні коливання монорезонансної фізичної системи. Відношення резонансної частоти до кількісно визначеної подвоєним значенням коефіцієнта згасання ширини резонансної характеристики для швидкості коливань (похідної по часу величини, що коливається) в околі резонансної частоти називають добротністю коливальної системи [Яворский, Делтаф, 1968].

Зіставивши параметри диференціальних рівнянь та їх розв'язків і твірних функцій розподілів випадкових величин у зворотному порядку, встановлюємо, що значення спектра відношення сигнал-завада на певній частоті є аналогом добротності монорезонансної коливальної системи. При цьому математичне сподівання сигналу як випадкової величини є аналогом циклічної частоти вільних незгасаючих коливань ідеальної коливальної системи, а середньоквадратичне значення (корінь квадратний з дисперсії) завади як центрованої випадкової величини — аналогом коефіцієнта згасання реальної коливальної системи. Семантично в сенсі характеристики якості цілком прийнятно спостереження та їх результати з достатньо високими значеннями відношення сигнал-завада називати добротними.

Математичне сподівання і дисперсія, як і моменти вищих порядків, є функціоналами розподілів імовірностей випадкових величин [Корн, Корн, 1974]. Загальний вираз імовірнісних функціоналів має вигляд

$$My(x) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x)d\Phi(x) = \begin{cases} \sum_{-\infty}^x y(x)p(x), \\ \int_{-\infty}^{\infty} y(x)\phi(x). \end{cases}$$

Тут M — символ математичного сподівання, $y(x)$ — функція випадкового аргументу x , $\Phi(x)$ — функція розподілу ймовірності значень випадкової величини x ; $p(x)$ — імовірності значень дискретної випадкової величини; $\phi(x)$ — щільність розподілу ймовірності значень неперервної випадкової величини.

Для математичного сподівання $\alpha_1 = m$ $y(x) = x$, для дисперсії $\mu_2 = \sigma^2$ $y(x) = (x - m)^2$. У загальному випадку для початкових моментів α_r і центральних моментів μ_r порядку r відповідно $y(x) = x^r$ і $y(x) = (x - m)^r$.

Характеристичні функції $\chi_x(q)$ і твірні функції $\pi_x(s)$ розподілів імовірностей випадкових величин є функціоналами, залежними від параметрів q і s відповідно. Для характеристичних функцій $y(x) = e^{iqx}$, для твірних функцій $y(x) = e^{sx}$.

На відміну від спектральної локалізації резонансів добротних коливальних систем, використання ймовірнісних функціоналів спектрів відношення сигнал-завада поширюється на дискретні скінченні і злічені та неперервні континуальні сукупності їх значень.

Значення добротності і спектрів відношення сигнал-завада узагальнюються ньютонівським визначенням числа [Математическая..., 1977, с. 868] — поняттям, яким було започатковано математичне освоєння фізичної дійсності. Виражена у понятті числа спільність названих та їм подібних сутностей полягає у поєднанні дробовим виразом чисельника — вимірюваної фізичної величини, і знаменника — однорідного з нею статистично усередненого мірчого еталона — фізичного еквівалента числової одиниці.

Історичними прикладами визначення числових еквівалентів фізичних величин є зважування мас і вимірювання довжин. Новітнім прикладом є аналого-цифрове перетворення електричних сигналів. Електричне копіювання фізичних процесів та їх подальше аналого-цифрове перетворення разом з використанням числової інформації, добутої іншими способами, зумовлює сучасні можливості масштабної комп'ютерної адаптації багатогалузевої люд-

ської практики та відповідних об'єктивних сутностей природи.

Утримувана на певних ділянках діапазону частот досліджень збіжність фактичних і заданих спектрів відношення сигнал-завада, які за своєю природою є відношеннями ймовірнісних функціоналів, властива фінітним основним функціям, простір яких є областю визначення узагальнених функцій — лінійних неперервних функціоналів [Шилов, 1965]. Носіями основних функцій є дефіцитні ділянки частот спектрів відношення сигнал-завада, а власне основні функції — елементами їх апроксимації. У вібраційній сейсмозв'язці фактично отримані поточні спектри відношення сигнал-завада покращують і наближують до їх заданих граничних відповідників за допомогою, зокрема, лінійно частотно-модульованих зондувальних сигналів. Спектри цих сигналів, зосереджені на відповідних ділянках діапазону частот досліджень, подібні до фінітних основних функцій.

Природна ускладненість сигналів випадковими завадами зумовлює природну фундаментальність ймовірнісних функціоналів. Унаслідок об'єктивної невідокремлюваності сиг-

налів і завад феноменологічні характеристики реальної дійсності можуть бути фундаментально виражені ймовірнісними функціоналами. В математичних моделях коливних процесів феноменологічний коефіцієнт згасання коливальних має своєю фундаментальною першоосновою стохастичні явища в елементах коливальних систем. Першоосновою феноменологічної класичної фізики є фундаментальна квантова механіка. Невипадково розроблення теорії узагальнених функцій ініційоване фізиками.

Декларативна філософська теза про всезагальний зв'язок речей в природі має бути доповнена конструктивним твердженням про адаптивний характер їх взаємодії. Репрезентативною моделлю такої закономірності є адаптивні сейсмічні дослідження з властивою їм взаємозалежністю сейсмогеологічних умов і технології спостережень.

Відповідно, поняттям спектра відношення сигнал-завада спеціалізується універсальний двосдиний детерміністично-стохастичний показник адаптивного наближення фізичних реалій до їх принципово недосяжних математичних ідеалів.

Список літератури

- Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Сов. радио, 1977. 608 с.
- Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. Москва: Недра, 1980. 541 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука, 1974. 831 с.
- Математическая энциклопедия. Москва: Сов. энциклопедия, 1977. Т. 5. С. 868.
- Роман В. І., Шпортюк Г. А., Гринь Д. М., Мукоєд Н. І.
- Адаптивні сейсмічні дослідження: моделі реєстрації сейсмічних полів. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. с. 152—156.
- Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки (Под ред. М. Б. Шнеерсона). Москва, Недра, 1998. 527 с.
- Шилов Г. Е. Математический анализ. Москва: Наука, 1965. 327 с.
- Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Москва: Наука, 1968. 939 с.

Signal-noise ratio of adaptive geophysical studies

© V. I. Roman, 2014

Spectrum of signal-noise ratio is a conclusive and ultimate factor of adaptive technology of geophysical and particularly seismic studies and thereafter it is specialized example of universal twofold deterministic-stochastic index of adaptive approximation of physical actuality to their principally unachievable mathematical ideals.

Key words: adaptive research, the spectrum of the signal-to-noise ratio, optimal filters, deconvolution, functionals.

References

- Gonorovskij I. S.*, 1977. Radiotechnical Circuits and Signals. Moscow: Sovetskoe radio, 608 p. (in Russian).
- Gurvich I. I., Boganik G. N.*, 1980. Seismic exploration. Moscow: Nedra, 541 p. (in Russian).
- Korn G., Korn T.*, 1974. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Moscow: Nauka, 831 p. (in Russian).
- Mathematical Encyclopaedia, 1977. Moscow: Sovetskaja jenciklopedija, vol. 5, P. 868. (in Russian).
- Roman V. I., Shportjuk G. A., Grin' D. M., Mukoed N. I.*, 2011. Adaptive seismic survey: seismic model registration fields. *Geofizicheskij zhurnal* 33(6), 152³/4156 (in Ukrainian).
- Theory and practice of non-explosive seismic ground (Ed. B. M. Schneerson). Moscow, Nedra, 527 p. (in Russian).
- Shilov G. E.*, 1965. Mathematical analysis. Moscow: Nauka, 327 p. (in Russian).
- Javorskij B. M., Detlaf A. A.*, 1968. Handbook of physics. Moscow: Nauka, 939 p. (in Russian).

Опечатка

В «Геофизическом журнале» № 1, Т. 36. 2014 г. в статье А. В. Кудельского «Геолого-геохимическая несостоятельность газосланцевого бума» произошла досадная опечатка, искажающая смысл.

В подрисуночной надписи к рис. 4 напечатано «Территориальное соотношение сланцевых (1) и нефтегазоносных (2) бассейнов США».

Следует читать наоборот: «Территориальное соотношение нефтегазоносных (1) и сланцевых (2) бассейнов США».