

МЕТОД СИГНАЛЬНОГО ПІДПРОСТОРУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ШАРУВАТИХ СТРУКТУР.

О.М. Ахметшин, О.О. Степаненко

Дніпропетровський національний університет, Запорізький національний технічний університет
alex@zntu.edu.ua

Абстракт

Розглянуто новий підхід до аналізу ехо-імпульсних зображень, що дозволяє підвищити чутливість аналізу і забезпечує можливість керованої компенсації впливу багаторазових перевідображень. Представлено результати експериментальної перевірки інформаційних можливостей методу.

Уведення

Аналіз ехо-імпульсних зображень є основним джерелом інформації стосовно до задач геофізичної розвідки запасів вуглеводнів. У силу великої практичної важливості цієї проблеми завжди приділялася особлива увага. Найбільше часто, математична модель локальної земної структури розглядається у виді аналога шаруватої структури, що дозволяє представити окрему сейсмічну трасу у вигляді:

$$s(t) = a(t) * \sum_{i=1}^M r_i \delta(t - t_i) + n(t), \quad (1)$$

де $a(t)$ - початковий імпульс сейсмічного збудження; r_i - коефіцієнти відбиття, що характеризуються співвідношеннями акустичних імпедансів границь шарів; t_i - затримки часу, що характеризують акустичні товщини шарів і їхніх комбінацій; $*$ - операція згортки; $n(t)$ - вимірювальний і структурний шуми. У рамках моделі (1) основним індикатором наявності вуглеводнів є локальна зміна амплітуди (так звана модель "яскравої плями") [1], що, однак, може містити помилкову інформацію через вплив інтерференційних ефектів, що обумовлюються впливом багаторазових перевідображень сейсмічних імпульсів між шарами. Це виражається в тім факті, що у формулі (1) число імпульсів M , що спостерігаються, може зовсім не відповідати числу значимих L шарів проаналізованої земної структури ($L \leq M$). У цьому зв'язку особливе значення, з погляду підвищення чутливості й вірогідності візуального аналізу ехо-імпульсних зображень, представляє розробка методів нейтралізації впливу багаторазових перевідображень.

Найбільш часто використовується підхід, заснований на прямій «підгонці» параметрів математичної моделі шаруватої структури під дані обмірюваної сейсмічної траси. У даному випадку

передбачається відома геометрична модель ділянки що аналізується, а підстроювання параметрів здійснюється на основі використання нелінійного алгоритму найменших квадратів [2]. Цей підхід можливий тільки при наявності даних розвідницького буровлення (украї дорога операція), що і визначає його практичну обмеженість. Інший підхід базується на принципах теорії зворотного розсіювання і зводиться до підсумовування ряду зворотного розсіювання Борна[3]. З теоретичної точки зору цей метод не вимагає апріорного знання моделі геологічної структури, однак по своїй суті він відноситься до категорії некоректних задач математичної фізики, що в умовах наявності істотних вимірювальних перешкод, характерних для задач розвідницької геофізики, робить його практичне застосування дуже проблематичним. Метою даної роботи є демонстрація інформаційних можливостей нового методу нейтралізації впливу багаторазових перевідображень, стійкого до впливу вимірювальних і структурних шумів і не потребуючого апріорного знання параметрів модельованої геологічної структури, що входять у формулу (1). Як і раніше передбачається, що досліджувана ділянка має шарувату будову. Суть же методу полягає в переході до такого інформаційного базису, у якому корисний (інформативний) і перепонний підпростори є ортогональними, а вплив багаторазових перевідображень нейтралізується за рахунок контрольованого вибору розмірності інформаційного підпростору.

1. Метод дослідження

Базисна ідея передбачуваного підходу полягає в переході з тимчасової області первісних вимірів у спектральну область Фур'є-перетворення, тобто:

$$S(f) = \int_0^T s(t) \exp(j2\pi ft) dt = A(f) \sum_{i=1}^M r_i \exp(j2\pi t_i f) + N(f); \quad (2)$$

$$f_L \leq f \leq f_T,$$

де $S(f)$ - спектральна характеристика сейсмічної траси; $A(f)$ - спектральна характеристика зондувального імпульсу; $N(f)$ - спектральна характеристика шуму. З розгляду вираження (2) видно, що затримки часу t_i у функції $S(f)$ кодуються комплексними пульсаціями в частотній області (період яких обернено пропорційний

величині t_i), що відкриває можливість використання методів параметричного адаптивного спектрального аналізу [4] стосовно до задач компенсації впливу багаторазових перевідображень. Щодо вираження (2) необхідно зробити ще одне зауваження. Сейсмічні вимірювальні системи є низькочастотними, їхня смуга пропуску обмежена шириною спектрального діапазону $\Delta F = f_T - f_L$, де f_T і f_L - верхня і нижня частоти діапазону відповідно. Оскільки розрізняльна здатність у часовій області обмежена саме ΔF величиною, то застосування методів параметричного спектрального аналізу відкриває і додаткову можливість підвищення розрізняльної часової здатності, (так само дуже важлива практична задача) аналізу ехо-імпульсних зображень, однак, у даній роботі це питання розглядатися не буде.

Як уже відзначалося, метод подавлення кратних перевідображень у спектральній області математично базується на ідеї сигнального підпростору, уперше викладений в роботі [5]. Такий вибір обумовлений високою стабільністю методу до впливу вимірювальних шумів і структурних перешкод і, зокрема, до впливу зміни форми (а отже, і спектра) зондувального імпульсу з глибиною. Оскільки функцію $A(f)$ можна припустити досить гладкою, то в рамках методу сигнального підпростору її вплив можна не враховувати. Вся обробка ведеться на ЕОМ (тобто в дискретній формі) і вираження (2) можна представити у виді:

$$S(f_k) = \sum_{i=1}^M r_i \exp(-j2\pi t_i f_k) + N(f_k), \quad (3)$$

$$k = 1, \dots, K,$$

де K - число частот у спектральній характеристиці $S(f)$. У векторно-матричній формі запису вираження (3) має вид:

$$S = Hr + N, \quad (4)$$

де H - матриця, що характеризує сукупність комплексних експонент, що відповідають за часові затримки t_i в спектральній Фур'є-області.

Передбачається, що статистичні характеристики перешкоди $N(f)$ задовольняють умовам:

$$E\{N_i N_j\} = \sigma^2 \delta(i - j); \quad E\{HN\} = 0, \quad (5)$$

де E - оператор математичного очікування.

Основна ідея методу сигнального підпростору базується на використанні властивостей кореляційної матриці спектральної характеристики сейсмічної траси, що аналізується, тобто:

$$R = E\{SS^T\} = Srr^T S^T + \sigma^2 I = SQS^T + \sigma^2 I, \quad (6)$$

де $Q = E\{rr^T\}$ - кореляційна матриця, що характеризує взаємозв'язок комплексних гармонік у спектральній області; I - одинична матриця. У якості нового інформаційного ортогонального базису в методі сигнального підпростору розглядається лінійний векторний простір, утворений власними векторами кореляційної матриці R , що знаходяться з рішення задачі на власні значення:

$$R\Phi = \Lambda\Phi, \quad (7)$$

де $|\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_K|$ - матриця власних векторів;

Λ - діагональна матриця власних значень, причому $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_K$. По припущенню матриця H являє собою суперпозицію комплексних експонент, причому їхнє число менше числа відліків спектральної характеристики, тобто $K \geq M$. Отже, ранг матриці R дорівнює N , що дозволяє розбити діагональну матрицю власних чисел на дві частини:

$$\lambda_i = \lambda_{s_i} + \lambda_{n_i}, i=1, \dots, M; \lambda_i = \lambda_{n_i}, i=M+1, \dots, K, \quad (8)$$

де λ_{s_i} і λ_{n_i} - власні числа відповідно сигнальної SQS^T і перешкодної $\sigma^2 I$ частинам матриці R відповідно. Тоді, відповідно до вираження (8), весь K мірний простір, утворений власними векторами, можна розбити на два підпростори: M - мірний сигнальний підпростір, утворений першими власними векторами, що відповідають найбільшим власним числам, і $(K - M)$ - мірний перешкодний підпростір, утворений власними векторами, що залишаються, і ортогональний першому, тобто:

$$\Phi = \{\Phi_S^{(M)} | \Phi_N^{(K-M)}\} \quad (9)$$

З урахуванням вираження (7), матрицю R можна представити у виді:

$$R = \sum_{i=1}^M \lambda_i \Phi_{s_i} \Phi_{s_i}^T + \sum_{i=M+1}^K \lambda_i \Phi_{n_i} \Phi_{n_i}^T = R_S + R_N, \quad (10)$$

тобто вона також складається із суми двох частин: сигнальної R_S і перешкодної R_N . З виражень (6) - (8) випливає, що:

$$\begin{aligned} \Phi_N^T R \Phi_N &= \sigma^2; \\ \Phi_N^T R \Phi_N &= \Phi_N^T SQS^T \Phi_N + \sigma^2 \Phi_N^T \Phi_N. \end{aligned} \quad (11)$$

Оскільки власні вектори є ортонормованими, тобто $\Phi_N^T \Phi_N = I$ і з (11) випливає:

$$\Phi_N^T S Q S^T \Phi_N = 0. \quad (12)$$

З урахуванням припущення $Q \neq 0$, останнє вираження дає:

$$\Phi_N^T [s_1 s_2 \dots s_M] = 0. \quad (13)$$

У такий спосіб із проведеного розгляду випливає, що на основі розподілу кореляційної матриці спектральної характеристики реєстрованої сейсмічної траси на сигнальну і перешкодну компоненти, з наступним проектуванням спектральної характеристики в підобласть, утворену власними векторами перешкодного простору, можна керувати процедурою виділення значущих гармонік, а тим самим і часовими затримками в часовій області, що і дозволяє здійснювати контрольований процес придушення кратних перевідображень.

З практичної точки зору, замість вираження (13), орієнтованого на виділення нулів, більш зручно використовувати вираження:

$$\frac{1}{s_i^T R_N s_i} \Rightarrow \max; i = 1, \dots, M. \quad (14)$$

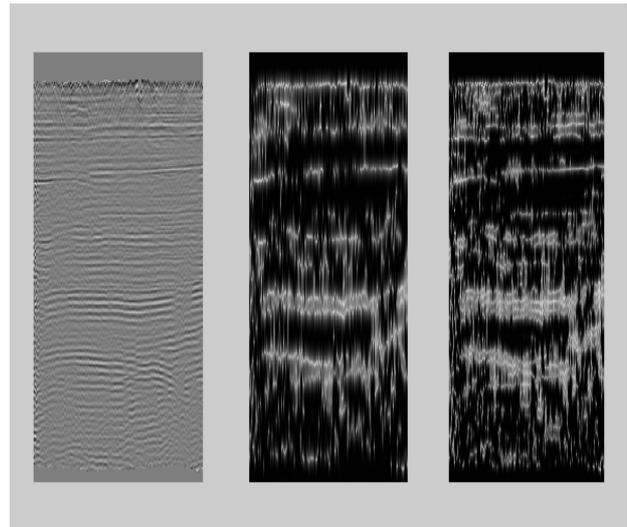
До особливостей аналізу сейсмограми на основі вираження (14) варто віднести наступні фактори:

- 1) аналіз здійснюється саме в спектральній області, але результат виходить у часовій області, тому що відбувається процедура знаходження спектра від спектра;
- 2) візуалізуються полюси вираження (14), а не фізичні амплітуди як у вихідній залежності $s(t)$;
- 3) оскільки реальне число значимих шарів невідомо, те селекція перевідображень здійснюється за рахунок варіації вибору значень M у моделі (1);
- 4) з математичної точки зору, синтез нової сейсмограми на основі вираження (14) являє собою істотно нелінійний процес, що відкриває додаткові можливості підвищення вірогідності і чутливості візуального аналізу ехо-імпульсних зображень.

2. Експериментальні результати

Дослідження інформаційних можливостей нового методу було проведено на прикладі сейсмічного зображення ділянки газо-конденсатного родовища, представленого на мал.1а, візуальний аналіз якого утруднений через наявність численних перевідображень, що утворюють характерну інтерференційну картину. На мал.1б і мал.1в представлені результати застосування нового методу

для розмірності сигнального підпростору $M=10$ і $M=20$ відповідно. Зіставлення результатів показує, що новий метод дозволяє чітко виділити верхню і нижню границі газо-конденсатного колектора. Особливо наочно цей результат виявляється при використанні псевдокольорового кодування. Застосування цього підходу до даних мал.1а не дало ніяких позитивних результатів, тоді як для методу сигнального підпростору результат був відмінним, що, очевидно, зв'язане з істотно-нелінійним характером відображення інформації в цьому методі.

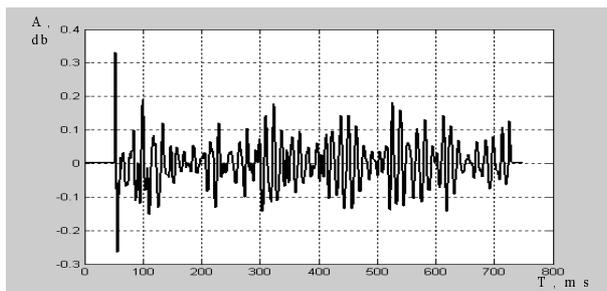


а б в

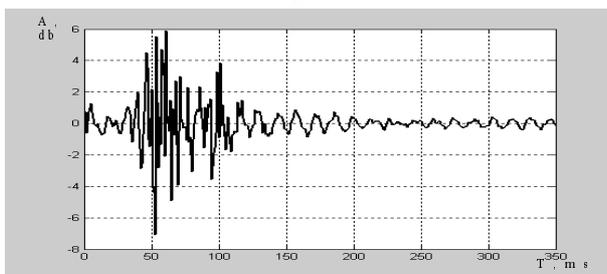
Рис.1. Ехо-імпульсні зображення: а – вихідне зображення ділянки газо-конденсатного родовища; б – результат методу сигнального підпростору (облік 10 найбільш значимих сигнальних компонентів); в – те ж, але для 20 сигнальних компонентів

Аналіз результатів мал.1 показує, що основна інформація виділилася при розмірності сигнального підпростору рівній 10. Подальше збільшення приводить до виділення тонких додаткових деталей (шарів), але з погляду виділення границь родовища це вже не дає істотно нової інформації.

Додаткову інформацію про особливості методу сигнального підпростору дає аналіз графічних зрізів зображень. Так на мал.2а показаний графік 100-го стовпця зображення на мал.1а, на якому зовсім чітко видний ефект впливу багаторазових перевідображень, що особливо негативно впливають при зондуванні слабконтрастних ділянок із близькими значеннями імпедансів границь шарів. На мал.2б представлена реальна частина спектральної характеристики цієї траси, що є вихідною "сировиною" для методу сигнального підпростору. На мал.3а і мал.3б представлене відображення в часовій області результатів методу сигнального підпростору ($M=10$ і $M=20$ відповідно) для даних, представлених на мал.2а і 2б.

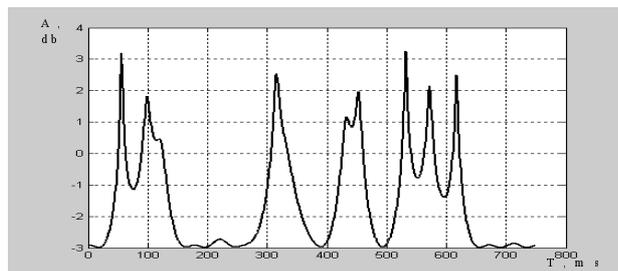


а

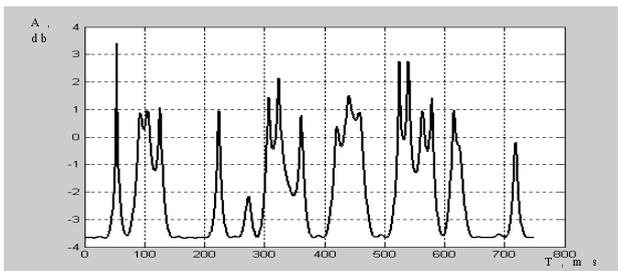


б

Рис.2 Графічне відображення результатів: а – 100-й стовпець вихідного зображення мал.1а; б – реальна частина спектральної характеристики сигналу "а", що є вихідною інформацією для методу сигнального підпростору. (Т – час, мс; А – амплітуда, db)



а



б

Рис.3. Результати методу сигнального підпростору: а - розмірність сигнального підпростору $M=10$; б – $M=20$; (Т – час, мс; А – амплітуда, db)

З зіставлення даних на мал.2 і мал.3 впливає, що метод сигнального підпростору дозволяє ефективно придушувати кратні перевідображення за допомогою вибору оптимального значення розмірності сигнального підпростору. Усунення впливу багаторазових перевідображень дозволяє підвищити вірогідність візуального аналізу (порівняйте мал.2а і мал.3а). Додатковим фактором, що обумовлює

інформаційну значимість методу, є, як це було відзначено вище, і більш висока розрізнявальна здатність аналізу у часовій області, оскільки піки на мал.3 є більш гострими в порівнянні з вихідними даними на мал.2а. З зіставлення даних на мал.3а, і мал.3б наочно впливає, що збільшення розмірності сигнального підпростору веде до підвищення чутливості виділення деталей зображення, що може зіграти важливу роль у задачах аналізу низьких-контрастних сейсмічних ехо-імпульсних зображень.

ВИСНОВКИ

1. Метод аналізу ехо-імпульсних зображень шаруватих структур являє собою типовий приклад комп'ютерного бачення, оскільки візуальний аналіз спирається на відображення полюсів вираження (14), а не фізичних амплітуд відбитих сигналів.
2. Принципово важливою особливістю методу є необхідність переходу з часової області первісних вимірів у спектральну Фур'є-область наступного аналізу.
3. Результати експериментальних досліджень показують, що метод сигнального підпростору дозволяє ефективно нейтралізувати вплив негативного ефекту багаторазових перевідображень, що серйозно утрудняє візуальний аналіз ехо-імпульсних зображень у рамках традиційних підходів.
4. Компенсація впливу багаторазових перевідображень здійснюється за рахунок оптимізації вибору розмірності сигнального підпростору.
5. Новий метод має значний потенціал подальшого розвитку і допускає узагальнення на інші області застосування ехо-імпульсної діагностики (ультразвукова медична інтроскопія, ультразвуковий неруйнівний контроль).

Перелік посилань

1. Уотерс К. Отражательная сейсмология. – М.: Мир, 1981. – 231 с.
2. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. – М.: Мир, 1982. – 419 с.
3. Berkhout A.J., Verschuur D., J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion. Part 1: Theoretical consideration. Geophysics, 1997. - v.62, - 1586-1595 pp.
4. Кей С.М., Марпл С.М. Современные методы спектрального анализа. Обзор.- М.: Мир, ТИИЭР, - 1981. - т.69, - №11, С. 5-51.
5. Cantoni A., Godara L. Resolving the directions of sources in a correlated field incident on an array. – J. Acoust. Soc. Amer. – 1980. - v.67. - №4. - 1247-1255 pp.