

## Пространствено-множествена цифрова обработка на сеизмични повърхностни вълни

Светла Радева

*Spatial array signal processing of seismic surface waves: The paper considers the problems connected with active surface wave phase velocity estimation with the help of spatial array signal processing and filtration of seismic signals. With suggested advanced spectrum estimation techniques are solved the common problems associated with traditional analysis of seismic surface waves. The resolution characteristics and effects of filtration and normalization techniques are illustrated on numerical examples.*

**Key words:** Signals Processing, Seismic Waves, Structural Control.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Сеизмичната реакция на строителните конструкции притежава елементи на случайно поведение поради три независими една от друга причини: стохастичната природа на сеизмичните въздействия, голямото разсейване на енергията от сеизмичните въздействия, при нейното предаване на конструкцията и неопределеността при задаването на конструктивните характеристики. За да се анализира това поведение е необходимо да се изследва прородата на сеизмичните сигнали. Оценката на техния енергиен спектър и тяхното затихване, извършена след цифрова обработка дава възможност за използване на обработения сигнал в устройствата за активно и полу-активно управление на строителни конструкции.

При определянето на скоростта на активната фаза на повърхностни сеизмични вълни най-напред е необходимо да се определи броят на вълните, регистрирани за единица време. Съвременните методи за обработка на цифрови сигнали при определянето на броя на вълните предполагат, че са известни или посоката на разпространение на вълните или скоростта на вълната [1,2]. Тъй като обикновено разположението на източника е известно, анализът на активната фаза на повърхностни сеизмични вълни се опростява до скаларен проблем [2,3]. Скаларната променлива за броя на вълните  $k_x$  трябва да бъде оценена от полученото множество от едномерни сеизмични сигнали. Ако се приложат някои допускания за статистическите свойства на полето от фонов сеизмичен шум, то могат да се направят измервания с помощта на два сензора, като се варира разстоянието и фазовата честота, за да се оценят синтетичните сеизмични сигнали.

### ОЦЕНКА НА ЕНЕРГИЙНИЯ СПЕКТЪР НА ЕДНОМЕРЕН СИГНАЛ

При оценката на енергийния спектър на едномерен сигнал на сеизмични повърхностни вълни се разглеждат уравненията на вълните и геометрията на тяхното разпространение. Тъй като разпространението на сеизмичните вълни се извършва сферичното, то това разпространение може да бъде описано като

$$s(x,t) = \frac{A}{x} e^{j(\omega t - kx)}, \quad (1)$$

където  $s(x,t)$  е отместването на  $x$  в пространството по време  $t$ ,  $A$  – първоначалната амплитуда на вълната. Предполага се, че сферичното разпространение на вълните е симетрично, така че фронтът от вълни зависи само от скаларното разстояние до източника  $x$  и от скаларният брой на вълните  $k$ .

От друга страна, цилиндричните вълни следват закона на Хенкел [2] и могат да бъдат представени като

$$s(x,t) = AH_0(kx)e^{-j\omega t}, \quad (2)$$

където  $H_0$  е функцията на Хенкел. Експоненциалният множител в (2) задава

хармоничното движение, зависимо от времето. Функцията на Хенкел се определя съгласно

$$H_0(kx) = J_0(kx) + j Y_0(kx), \quad (3)$$

където  $J_0$  е функция на Бесел от първи вид от ред нула и  $Y_0$  - функция на Бесел от втори вид от ред нула. При фиксиране на времето  $t=0$ , реалните стойности на движението на вълните от източника с амплитуда  $A$  и честота  $\omega$  се задават от

$$s(x,0) = A J_0(kx). \quad (4)$$

Традиционният анализ на сеизмични повърхностни вълни използва функцията на Хенкел за апроксимация както на оценката за скоростната фаза, така и на енергията на затихване на сеизмичните вълни. Ако се пренебрегне затихването на вълните, което е по-бързо от  $1/\sqrt{x}$ , то за отдалечените полета (при големи стойности на  $kx$ ) апроксимацията на Хенкел може да бъде зададена чрез няколко различни форми за вертикалните движения по време на  $S$  – фазата на вълните като,

$$J_0(kx) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi kx}} \cos\left(kx - \frac{\pi}{4}\right) \quad (5)$$

Енергийният спектър на едномерен сигнал на сеизмични повърхностни вълни за разрушителните вертикални  $S$  – вълни се оценява чрез (5), при което хоризонталните движения, свързани с повърхностните вълни на Рейли са с  $\pi/2$  rad извън фазата при наслагването им с вертикалните движения в еластична среда. Асимптотичното разширяване на функцията на Хенкел показва затихването на вълните с  $1/\sqrt{x}$  и това, че при отдалечените полета уравнението на цилиндричните вълни отразява и поведението на вълните в равнината.

Съществува значителна разлика между генерирането на повърхностни вълни с основен режим на трептене и при всички допълнителни режими на трептене на Рейли [2,3]. Свойствата при всички режими на трептене са едни и същи и включват експоненциално закъснение в дълбочина, цилиндрично разпространение от точката на източника, хоризонтално и вертикално движение извън фаза от  $\pi/2$  rad в еластична среда.

### ПРОСТРАНСТВЕНО-МНОЖЕСТВЕНА ЦИФРОВА ОБРАБОТКА НА СИГНАЛА

Пространствено-множествената цифрова обработка се основава на определянето на спектралната корелационна матрица и на генерирането на синтетични линейни множества. Спектралната корелационна матрица  $R(\omega)$  се оценява посредством комбинирането на получените оценки за спектъра на реагиране за всички фазови разлики на закъснение на вълните в пространството, получени за една дадена честота. Въпреки че тази матрица не е необходимо да бъде нормализирана, без нормализация, по-отдалечените сензори от източника ще бъдат претеглени по-слабо в сравнение с по близките, тъй като магнитута на взаимно-спектралната плътност е по-малък за по-отдалечените полета.

Възможността да се комбинират няколко извадки на закъснения между две точки в пространството върху едно синтетично множество се основава на предположението за характеристиките на сигнала  $S$  и шума  $N$ . По такъв начин пространствено-спектралната корелационна матрица  $R(\omega)$  се задава съгласно

$$R(\omega) = R_S(\omega) + R_N(\omega). \quad (6)$$

Използването на един детерминистичен източник с един линеен, инвариантен модел на напластени почвени слоеве позволява  $R_S(\omega)$  да бъде разглеждана като една постоянна матрица, измерена при дадено наслагване на фонов шум.

Предполага се, че шумът е независим и еднакво разпределен по Гаусов закон за всеки сензор, като частта на шума в пространствено-спектралната корелационна матрица се представя като

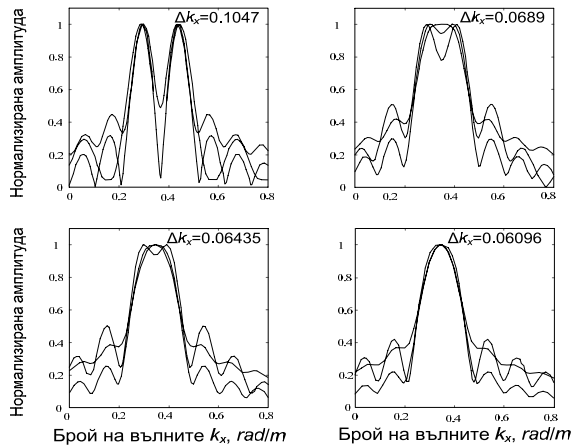
$$\mathbf{R}_N(\omega) = \mathbf{I} p_n(\omega), \quad (7)$$

където  $\mathbf{I}$  – единична матрица и  $p_n$  – силата на шума, измерена от всеки сензор, като функция от честотата. Тъй като всяко измерване между две точки се извършва при различни времена, то фоновият шум може да не бъде стационарен, т.е. статистиките на шума може да се променят по време на различните измервания.

За пресмятане на геометричното разпространение на енергията на повърхностните сеизмични вълни се използват цилиндрични симетрични полета на сеизмични вълни, в които се използва преобразуването на Хенкел за  $F(k)$ , а също функцията на радиалното разстояние до източника  $f(x)$  и функцията на Бесел  $J_0$  като

$$F(k) = 2\pi \int_0^{+\infty} f(x) J_0(kx) x dx. \quad (8)$$

При оценка на енергийния спектър на активни повърхностни сеизмични вълни се използва нормализация на геометричното разпространение на вълните по магнитут и по закъснение на вълновото поле за една от всички посоки в пространството. За нормализиране са използвани FDBF (*Frequency Domain Beam Former*) и MVDL (*Minimum Variance Distortionless Look*) филтри при различни честоти. Извършен е експеримент с мрежа от 16 сензора за оценяване на енергийния спектър на активни повърхностни сеизмични вълни. На фиг. 1 е показано отместването на върховете стойности при нормализирането по закъснение в зависимост от броя на вълните.



Фиг. 1. Отместването на върховете стойности при нормализирането по закъснение при различен брой на вълните

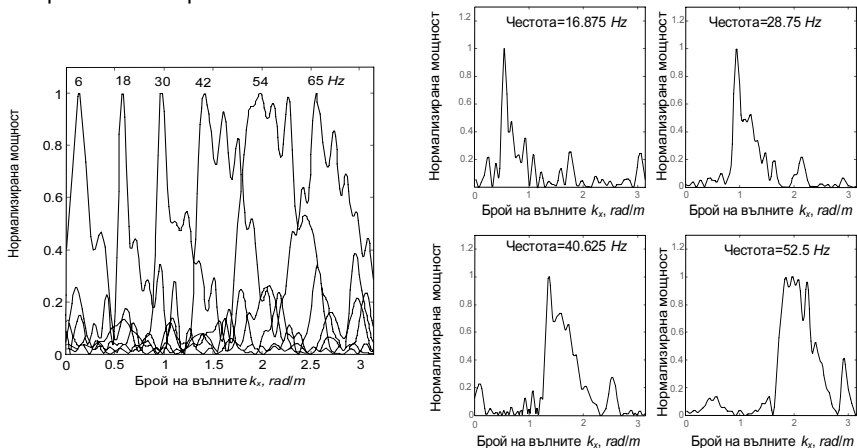
FDBF филтър е използван за оценка на спектралната плътност при различни честоти. Анализирани са повърхностни вълни от различни сеизмични източници. Сеизмичните вълни от пасивни източници се разпространяват с по-ниски честоти и имат по-голяма дължина на вълните. Импулсивните и хармоничните активни източници дават възможност да бъде регистрирана информацията за полетата от сеизмични вълни. Преимуществото на хармоничните източници се изразява във възможността на бъде генерирано значително енергийно съдържание при по-ниски честоти отколкото при импулсивните източници. Идеалният източник на

повърхностни вълни би бил хармоничен източник, при който се отстранява шума преди да бъде извършена оценката на енергийния спектър.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ОЦЕНКА НА ЕНЕРГИЙНИЯ СПЕКТЪР НА СИГНАЛА

Извлечането на информация за полетата от сеизмични вълни дава възможност за нейното практическо използване при изследване на нехомогенните свойства на материала в напластените почвени среди, изследване на статистическите свойства на шума, изследване на разпространението на сеизмичните вълни по различни траектории, изследване на дифракцията на насложени вълни и др.

За изкуственото генериране на полета от повърхностни вълни е използван уреда APS Dynamics, Inc. Model 400 Electro-Seis Shaker, който работи в два основни режима: на генериране на полета от синусоидални и на полета от случайни въздействия с вариране на честотата от 1 Hz до 200 Hz, като основните измервания бяха извършвани в диапазона от 5 Hz до 100 Hz. На фиг. 2 ляво са показани експериментално получените оценки на енергийния спектър при увеличаване на честотата от 6 до 65 Hz. На фиг. 2 дясно са показани оценките на енергийния спектър за няколко различни честоти.

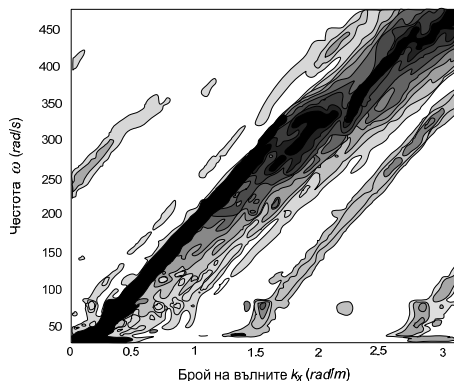


Фиг. 2. Оценки на енергийния спектър при различни честоти

Системата за събиране на експериментални данни включва система от компютър Hewlett-Packard (HP) VXI, 16 сензора, регулатор за сигнали, монитор. Системата се управлява от софтуер, създаден на MATLAB 6.5, който позволява да се управлява пространствената обработка на цифрови сигнали. Централният процесор на компютъра има вграден 133 MHz Pentium контролер, който позволява програмирането на анализатор на динамични сигнали през MATLAB 6.5 в средата на Windows NT. Шестнадесет каналният 16 битов дигитайзер HP E1432A и динамичният процесор за обработка на сигнали позволяват да бъдат получени извадки от всеки канал до 51,2 образеца за секунда. Сигналите постъпват от ICP сеизмични акселерометри и се селектират от PCB Piezotronics 440. Системата съдържа и 4 канални регулатора на сигнали PCB442A104. Високите характеристики за чувствителност и резолюция са сред основните изисквания към сеизмичните сензори. Използването на Сеизмичният акселерометър за ултра ниски честоти Wilcoxon Research 731A Ultra-Quiet, позволи регистрирането на честотни реакции между 0,2 Hz и 100 Hz при резонансна честота близка до 950 Hz и чувствителност от 10 V/g. За пространствените измервания е използвана отделна система от 16

сензора 713A при вариране на чувствителността от 9,4 до 10,6 V/g. Вертикалните премествания са регистрирани чрез Mark Products L4-C Geophone.

На фиг. 3 е представена оценка на спектралната плътност за разглеждания профил от напластени среди при вариране на честотата и броя на вълните.



Фиг. 3. Оценка на спектралната плътност

Вижда се, че с увеличаване на честотата и броя на вълните се увеличава възможността за поява на резонанс, изразена посредством наслагване на участъци с по-висока спектрална плътност.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направените измервания показват, че нормализирането по измерения магнитут води до значително намаляване на вълните близо до минималните измервания, докато нормализирането по закъснение води до нарастване на пиковите стойности на вълните. Оценка на спектралната плътност показват възможността за поява на резонанс, а също така се използват в системите за управление на реакцията на сгради и строителни съоръжения при сеизмични въздействия.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Caserta, A., Ruggiero, V., Lanicara, P. Numerical modelling of dynamical interaction between seismic radiation and near-surface geological structures: a parallel approach. *Journal of computer and geosciences* vol. 28, 2002, 1069-1077.

[2] Kristek J., Moczo, P. Seismic wave propagation in viscoelastic media with material discontinuities – a 3D 4<sup>th</sup> –order staggered-grid finite-difference modelling. *Bull. Seismic Society of America*, 93, 2003, 2273-2280.

[3] Радева, С. Управление на реакцията на строителни конструкции при сеизмични въздействия. Колбис. София, 2008, 178 стр.

### За контакти:

Доц. д-н Светла Радева, Катедра “Автоматизация на инженерния труд”, УАСГ, София, Тел.: 02 954 8867, E-mail: [svetla\\_fce@abv.bg](mailto:svetla_fce@abv.bg)

Докладът е рецензиран.