

АСТРОНОМИЯ

УДК 550.34.052

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ГВ-ВСПЛЕСКОВ НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА**

А. В. Гусев, В. К. Кравчук

(ГАИШ)

Рассматривается возможность использования лазерного деформографа как приемника низкочастотных ГВ-всплесков при активной фильтрации сейсмических помех в условиях неполной априорной информации.

Геофизическая программа поиска низкочастотных ГВ-всплесков в диапазоне $f_g \leq 10^{-1}$ Гц не имеет разумной альтернативы [1, 2]. Стимулирующим фактором подобных исследований оказывается благоприятный астрофизический прогноз для величины амплитуды изменений метрики $h \leq 10^{-16} \div 10^{-17}$ против $h \leq 10^{-19} \div 10^{-22}$ в килогерцевом диапазоне. Принципиальная возможность подавления микросейсмических низкочастотных шумов приемной системой из N однородных элементов (сейсмометров) основана на различии пространственных спектров случайных полей и акустической волны, генерируемой ГВ-всплеском в длинноволновом приближении [3].

Настоящая работа посвящена анализу помехозащищенности многоканального обнаружителя низкочастотных ГВ-всплесков на основе лазерного деформографа с базой L .

1. Реакция плоской (x) неоднородной среды ($y \geq 0$) на ГВ-всплеск в длинноволновом приближении

В соответствии с результатами работы [1] компоненты вектора смещения $u(x, y, \omega)$ в поле ГВ определяются следующим образом:

$$u_n = z_n + (1/2) h_{mn} x^m, \tag{1}$$

где z_n — решение системы однородных уравнений:

$$-\rho \omega^2 z_n = \partial \sigma_{mn} / \partial x^m \tag{2}$$

с граничными условиями на свободной поверхности $y=0$: $(\sigma_{yn} + \mu h_{yn})_{y=0} = 0$.

Здесь использованы следующие обозначения: ρ — плотность среды; $\sigma_{mn} = \delta_{mn} \lambda z_{ii} + 2m z_{mn}$ — тензор напряжений, λ и μ — параметры Ламе.

Решение подобной краевой задачи приводит к следующему результату:

$$z_x = -(j/k_t) k_{xy}, \quad z_y = -(j/k_t) [(1-2\sigma)/2 (1-\sigma)]^{1/2} h_{yy}, \tag{3}$$

где $k_t = \omega/v_t$, $v_t = (\mu/\rho)^{1/2}$ — скорость поперечной волны, σ — коэффициент Пуассона. В длинноволновом приближении

$$h_{xy} = h_{xy}(j\omega), \quad h_{yy} = h_{yy}(j\omega), \quad h_{xx} = h_{xx}(j\omega).$$

Пусть $s(x, 0, j\omega)$ — поверхностная сейсмическая волна. Тогда, принимая во внимание (1), (3), для горизонтальной составляющей вектора смещения u_x запишем при $y=0$

$$u_x(x, 0, j\omega) = z_x(j\omega) + (1/2) h_{xx}(j\omega) + s_x(x, 0, j\omega). \tag{4}$$

Если $(x_{1,2}, 0)$ — координаты зеркал лазерного интерферометра с аппаратной функцией (АФ) $k_0(j\omega)$, то для выходного сигнала подобного устройства можем записать

$$\xi_0 = k_0 [u_x(x_2) - u_x(x_1)] + \eta_0 = k_0 \left[\left(\frac{1}{2} \right) h_{xx} + \left(\frac{\partial s_x}{\partial x} \right)_x L \right] + \eta_0, \quad (5)$$

где $L = x_2 - x_1$, и η_0 — база и собственные флуктуации интерферометра соответственно.

В дальнейшем предполагаем, что АФ интерферометра известна приближенно:

$$k_0 = \widehat{k}_0 + \widetilde{k}_0. \quad (6)$$

Здесь использованы следующие обозначения: $\widehat{k}_0(j\omega)$ — ожидаемая АФ, $\widetilde{k}_0(j\omega)$ — возможная погрешность в ее определении, априорная информация о которой минимальна:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |\widetilde{k}_0|^2 d\omega \leq \Delta. \quad (7)$$

Реакция сейсмометров с координатами $(x_{1,2}, 0)$ на упругую волну (4) может быть представлена в виде [1]

$$\xi_i = H_i \left[u_x(x_i) - \frac{1}{2} h_{xx} x_i + s_x(x_i) \right] + \eta_i = k_i \left[-\frac{j}{k_i} h_{xy} + s_x(x_i) \right] + \eta_i, \quad (8)$$

$i = 1, 2,$

где $k_i(j\omega)$ — АФ сейсмометров, η_i — их внутренние флуктуации. С целью упрощения АФ $k_{1,2}(j\omega)$ предполагаем известными.

2. Активная фильтрация сейсмических помех в многоканальном приемном устройстве

Анализ выходных откликов лазерного деформографа (5) и сейсмометров (8) показывает, что при коррелированных шумовых составляющих, обусловленных поверхностной сейсмической волной, сигнальные компоненты принципиально различны: $\xi_0 \sim h_{xx}$, $\xi_i \sim h_{xy}$ при $i = 1, 2$. Это позволяет осуществить активную фильтрацию мощных сейсмических помех на выходе лазерного деформографа, используя выходные отклики сейсмометров в качестве «обучаемого» генератора помехи. Действительно, из (8), (5) при инверсной фильтрации имеем

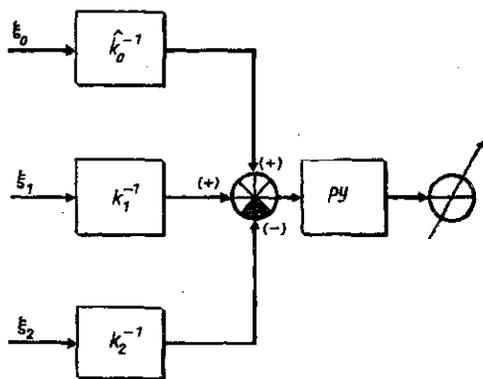
$$k_i^{-1} \xi_i = -\frac{j}{k_i} h_{xy} + s_x(x_i) + f_i, \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

$$\widehat{k}_0 \xi_0 \approx (1 + \widehat{k}_0^{-1} \widetilde{k}_0) \left(\frac{\partial s_x}{\partial x} \right)_{x_1} L + \frac{1}{2} h_{xx} L + f_0,$$

где $f_0 = \widehat{k}_0^{-1} \eta_0$, $f_{1,2} = k_{1,2}^{-1} \eta_{1,2}$ — внутренние шумы отдельных элементов приемной системы, пересчитанные ко входу. Интенсивность этих флуктуаций предполагается малой.

Из (9) находим

$$k_1^{-1} \xi_1 - k_2^{-1} \xi_2 + \widehat{k}_0^{-1} \xi_0 = F \approx \left[\frac{1}{2} h_{xx} + \widehat{k}_0^{-1} \widetilde{k}_0 \left(\frac{\partial s_x}{\partial x} \right)_{x_1} \right] L + (f_0 + f_1 - f_2). \quad (10)$$



Левая часть соотношения (10) определяет алгоритм обработки выходных данных в (5), (8) в многоканальном приемном устройстве (МПУ), блок-схема которого приведена на рисунке, где РУ — решающее устройство.

3. Оценка помехозащищенности многоканального приемного устройства

При расчете предельной разрешающей способности приемной системы из трех элементов (лазерный деформограф и два сей-

смометра) рассмотрим две предельные ситуации.

1. АФ лазерного деформографа точно известна, $\Delta=0$. Из (10) при $\tilde{k}_0=0$ находим

$$F_1 \approx \frac{1}{2} h_{xx} L + (f_0 + f_1 - f_2). \quad (11)$$

Таким образом, в ситуации 1 разрешающая способность МПУ зависит только от интенсивности достаточно слабых внутренних флуктуаций отдельных элементов. При широкополосных сторонних источниках шума в (11) потенциальную чувствительность МПУ можно выразить через разрешающую способность отдельных элементов приемной системы δ_i (см \cdot Гц $^{-1/2}$):

$$h_{\min} \geq 2 \left[\frac{2}{\tau} \sum_{i=0}^3 \epsilon_i \left(\delta_i \frac{1}{L} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

где ϵ_i — символ Неймана, $\hat{\tau}$ — длительность ГВ-всплеска.

Основным источником шума в лазерном деформографе оказывается нестабильность частоты накачки $\omega_0: f_0 \approx L(\Delta\omega/\omega_0)$. Тогда $(\delta_0/L)^2 \approx N_\omega(\omega_0)\omega_0^{-2}$, где $N_\omega(\omega)$ — энергетический спектр технических флуктуаций частоты [4]: $N_\omega \approx A[(\omega/\omega_0)^\gamma \omega_0]^{-1}$, A и γ — характерные параметры фликкерных шумов.

Близкие к (12) результаты дает расчет разрешающей способности активных сейсмометров типа модулятор—демодулятор, где основным источником шума оказываются флуктуации параметра реактивного элемента — переменной емкости [5].

2. Противоположная ситуация: $f_i=0$, $\Delta \neq 0$ — доминирует специфическая мультипликативная помеха, обусловленная отсутствием необходимой априорной информации о АФ интерферометра:

$$F_2 = \left[\frac{1}{2} h_{xx} + \tilde{k}_0^{-1} \tilde{k} \left(\frac{\partial s_x}{\partial x} \right)_{x_1} \right] L.$$

При известной зависимости \tilde{k} от частоты ω отношение сигнал/шум при оптимальной фильтрации дается формулой [6]:

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{(1/2)^2 |h_{xx}|^2 d\omega |\tilde{k}_0|^2}{|\tilde{k}|^2 N_x}, \quad (13)$$

где $N_x = \left\langle \left| \left(\frac{\partial s_x}{\partial x} \right)_{x_1} \right|^2 \right\rangle$ — энергетический спектр упругой волны деформации (в символической записи).

Задача минимального обнаружения полезного сигнала в МПУ при отсутствии точной априорной информации о АФ интерферометра состоит в отыскании минимума функционала (13), как целевой функции,

$$\text{при дополнительном условии } \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |\tilde{k}_0|^2 d\omega = \Delta.$$

Используя метод неопределенных коэффициентов Лагранжа [7], можем получить

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\min \max} \approx \frac{1}{\Delta} \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{|h_{xx} \tilde{k}_0| d\omega}{N_x^{1/2}} \right]^2. \quad (14)$$

АФ двухлучевого интерферометра Майкельсона может быть записана в виде $\tilde{k}_0 = 2\pi\lambda_0^{-1}\Gamma$, где $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$ — длина волны накачки, c — скорость света, $\Gamma = \Gamma(j\omega)$ — АФ системы регистрации. Тогда из (14) для широкополосных помех при $|\Gamma| = 1$ находим

$$(S/N)_{\min \max} \approx (h_0/\lambda_0)^2 [\Delta N_x(\omega_g)]^{-1}. \quad (15)$$

При съеме полезной информации только с интерферометра отношение сигнал/шум в соответствии с (5) при $\eta_0 = 0$ равно

$$(S/N)_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{(1/2)^2 |h_{xx}|^2 d\omega}{N_x} \approx \frac{1}{8\pi} h_0^2 \tau N_x^{-1}(\omega_g). \quad (16)$$

Сравнение полученных формул (15) и (16) позволяет определить выигрыш в чувствительности МПУ по сравнению с одноканальной схемой на основе лазерного деформографа:

$$q = \frac{(S/N)_{\min \max}}{(S/N)_0} \approx 8\pi (\lambda_0^2 \tau \Delta)^{-1}. \quad (17)$$

4. Выводы

1. Использование многоканальной приемной системы из трех элементов (лазерный деформограф и два сейсмометра) при сейсмографическом детектировании низкочастотных ГВ-всплесков позволяет значительно ослабить влияние мощных поверхностных сейсмических помех на чувствительность. Коэффициент подавления q зависит от погрешности в определении АФ интерферометра с базой $L \approx 100$ м (15). В пределе достижимая чувствительность определяется только разрешающей способностью отдельных элементов (12).

2. Важным преимуществом подобной приемной системы по сравнению с приемной системой из n однородных элементов — сейсмометров [3] — оказывается независимость разрешающей способности МПУ от АФ упругой среды и априорной информации об источниках сейсмических помех.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ashby N., Dreitlein J. // Phys. Rev. 1975. D12, N 2. P. 336. [2] Брагинский В. Б., Гусев А. В., Митрофанов В. П., Руденко В. Н. // УФН. 1985. 147. С. 4227. [3] Gusev A. V., Kravchuk V. K., Rudenko V. N. // Nuovo Sim. 1990. N. 6. P. 1221. [4] Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М., 1974 [5] Гусев А. В., Кравчук В. К., Рытик И. Ф. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1990. 31, № 2. С. 38. [6] Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М., 1983. [7] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., 1978.