

ЧИСЛЕННАЯ КОРРЕКЦИЯ СЕЙСМОГРАММ И ШУМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

А.Н. Беседина, Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян, Д.В. Павлов

В статье рассматривается численная коррекция сейсмограмм, полученных экспериментально и последующее их сравнение с сигналами, записанными более широкополосными датчиками. Сейсмограммы, численно откорректированные до более низкой граничной частоты, находятся в хорошем соответствии с волновыми формами, зарегистрированными широкополосными сейсмическими датчиками. Определен уровень собственного шума измерительного канала и выявлен частотный диапазон, в котором можно проводить численную коррекцию сейсмограмм.

Введение

На практике экспериментатор не всегда обладает сейсмическими датчиками, которые имеют параметры (собственная частота и затухание системы), необходимые для решения поставленной физической задачи. В некоторых случаях улучшить характеристики измерительного канала удастся с помощью специальных методов коррекции. Приборная коррекция электромеханических преобразователей заключается в присоединении к прибору дополнительных блоков, параметры которых подбираются таким образом, чтобы частотная характеристика всего получившегося устройства была более широкой. Разработаны разные методы коррекции, например, введение большого затухания через нагружение катушки сейсмометра отрицательным сопротивлением. Коррекция обратным фильтром является универсальным средством понижения нижней граничной частоты датчика [Navskov, 2004]. Интегратор с дифференцирующей цепочкой в петле обратной связи, описанный в работе [Al-Alaoui, 2001], можно рассматривать как элемент корректирующей цепи. Альтернативой коррекции частотной характеристики сейсмического датчика с помощью приборного корректирующего фильтра является численная коррекция сейсмограммы, зарегистрированной датчиком.

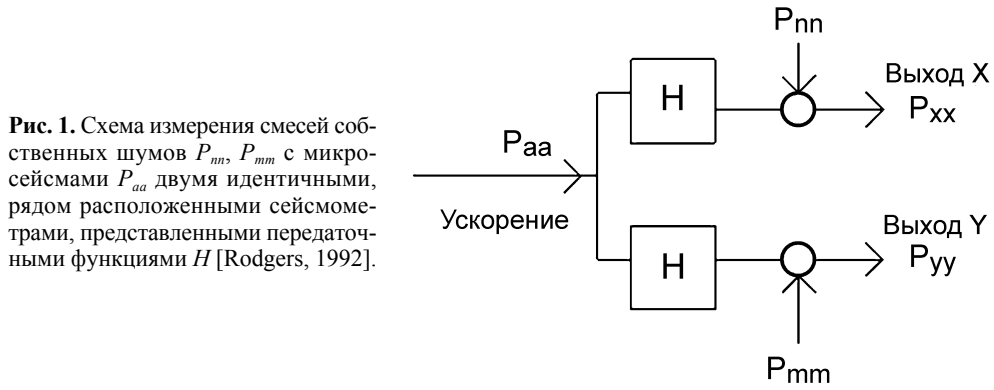
В настоящей статье рассматривается вопрос о границах применимости метода численной коррекции сейсмограмм.

Методика определение шума сейсмоприемника

Для выяснения критерия применимости численной коррекции важно определить нижнюю граничную частоту, до которой можно выполнять коррекцию: ниже этой частоты сигнал не выделяется на фоне шума, и коррекция теряет смысл.

При использовании сейсмометра для проведения измерений канал регистрации состоит из собственно сейсмометра и усилителя. Собственные шумы механической части сейсмографа весьма невелики. Современные усилительные схемы также незначительно увеличивают общий шум и поэтому непосредственно измерить шум сейсмометра затруднительно, так как сейсмический фон создает большие помехи и не представляется возможным четко определить, где шум, а где фон.

Для измерения шума канала регистрации в наших экспериментах использовалась методика, описанная в [Rodgers, 1992], в основе которой лежит регистрация одного и того же процесса двумя одинаковыми приборами. На рис. 1 показана схема для измерения собственных шумов сейсмических датчиков. Два одинаковых канала регистрации с передаточными функциями H устанавливались рядом друг с другом для проведения записи. Предполагается, что шумы сейсмометров некогерентны, а общим сигналом для них является сейсмический фон. Фоновое ускорение грунта со спектральной плотностью мощности P_{aa} воздействует на оба сейсмометра. Некоррелированные между собой собственные шумы со спектральными мощностями P_{nn} и P_{mm} суммируются с выходными сигналами каналов, образуя результирующие выходные сигналы x и y . Предполагается также, что система линейна, все 3 процесса m , n и a независимы.



Используя эти предположения, можно записать выражения для спектральной плотности мощности выходного сигнала каждого из датчиков:

$$P_{xx} = P_{ss} + P_{nn}, \text{ В}^2/\text{Гц}, \quad (1)$$

$$P_{yy} = P_{ss} + P_{mm}, \text{ В}^2/\text{Гц}, \quad (2)$$

где

$$P_{ss} = |H|^2 \cdot P_{aa}, \text{ В}^2/\text{Гц}. \quad (3)$$

Если рассмотреть взаимный спектр мощности выходных сигналов двух датчиков P_{xy} , то окажется, что он имеет только одну составляющую, когерентную и с x и с y , так как процессы m , n и a независимы:

$$P_{xy} = P_{ss}. \quad (4)$$

Поскольку P_{ss} является реальной, положительной и четной функцией, то эти свойства относятся и к P_{xy} , что позволяет извлечь в дальнейшем из P_{xy} квадратный корень. Нормированная функция когерентности между x и y запишется следующим образом:

$$\gamma^2 = \frac{|P_{xy}|^2}{P_{xx} \cdot P_{yy}}. \quad (5)$$

Предполагалось, что m и n независимые произвольные процессы, поэтому

$$P_{mm} = P_{nn}. \quad (6)$$

Используя (6), равенство (5) после извлечения корня можно переписать в следующем виде:

$$\gamma = \frac{P_{xy}}{P_{xx}}. \quad (7)$$

Из равенства (1) можно получить собственные шумы измерительного канала:

$$P_{nn} = P_{xx} - P_{ss} = P_{xx} - P_{xy} = P_{xx} \cdot \left(1 - \frac{P_{xy}}{P_{xx}}\right), \quad (8)$$

$$P_{nn} = P_{xx} \cdot (1 - \gamma), \text{ В}^2/\text{Гц}. \quad (9)$$

Аналогично для P_{mm} :

$$P_{mm} = P_{yy} \cdot (1 - \gamma), \text{ В}^2/\text{Гц}. \quad (10)$$

Обычно эти шумы относят ко входам сейсмометров:

$$P_{NN} = \frac{P_{xx}}{|H|^2} \cdot (1 - \gamma), (\text{м/с}^2)^2/\text{Гц} \quad (11)$$

$$P_{MM} = \frac{P_{yy}}{|H|^2} \cdot (1 - \gamma), (\text{м/с}^2)^2/\text{Гц}. \quad (12)$$

Использование данного метода не позволяет получить запись собственного шума канала в виде функции времени. Для получения шумовой дорожки можно использовать следующую методику. Также как и в предыдущем случае рассматриваются два одинаковых измерительных канала «сейсмограф – усилитель» (рис. 1). Предполагается, что шумы сейсмометров n и m некогерентны, а общим сигналом s для них является сейсмический фон, то есть выходной сигнал одного измерительного канала $x = s + n$, а второго $y = s + m$. Если случайные величины x и y являются нормально распределенными и коэффициент корреляции для них составляет $\gamma = 1$, это означает, что между величинами имеется линейная зависимость [Вентцель, 1969]. Для получения некогерентных компонент (шума измерительного канала) необходимо привести систему нормально распределенных величин x и y к каноническому базису, в котором коэффициент корреляции для них $\gamma = 0$ [Вентцель, 1969]. При этом координатные оси совпадут с главными осями эллипса рассеивания (переход к новому базису осуществляется путем параллельного переноса начала координата и поворота координатных осей).

Экспериментальные результаты

Измерение собственных шумов геофона GS-20DX и сейсмометра СМ-3 проводилось описанной выше методикой в лабораторных условиях. На постаменте, расположенном в подвале здания ИДГ РАН, устанавливались 2 одинаковых датчика GS-20DX и 2 одинаковых СМ-3 для измерения вертикальной компоненты микросейсмического фона. Для анализа взяты реализации двух сейсмограмм длительностью 15 мин, записанных при частоте дискретизации 100 Гц.

Используя, описанные выше методы определения шума измерительного канала, удалось выделить квазистационарный шум в выходном сигнале датчиков. Эффективные значения шума и сигнала, определенные по первому методу, составляют для геофона $2,2 \cdot 10^{-8}$ м/с и $5,8 \cdot 10^{-7}$ м/с, соответственно, в полосе 1–50 Гц. На рис. 2 представлен амплитудный спектр скорости выходного канала и доли шума в выходном канале геофона GS-20DX, определенные по первому методу. Соотношение сигнал-шум становится близко к 1 при частотах ниже 1 Гц. Это говорит о том, что на более низких частотах коррекцию проводить бессмысленно.

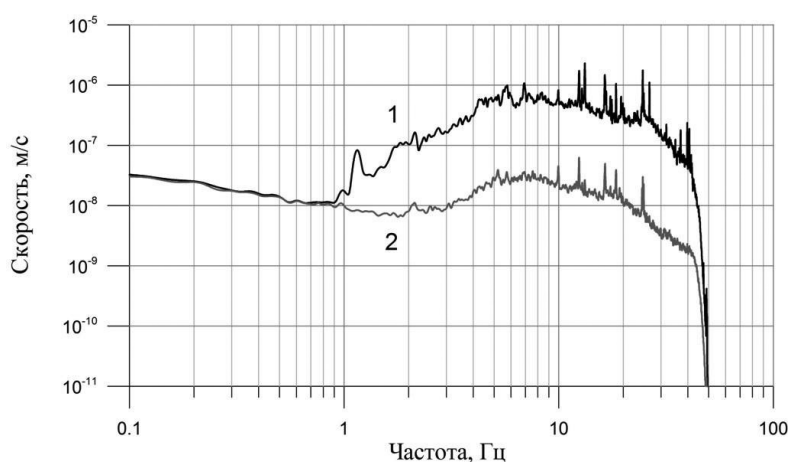


Рис. 2. Амплитудный спектр скорости: выходного сигнала регистрирующего канала GS-20DX (1); компонента шума в выходном сигнале регистрирующего канала GS-20DX (2).

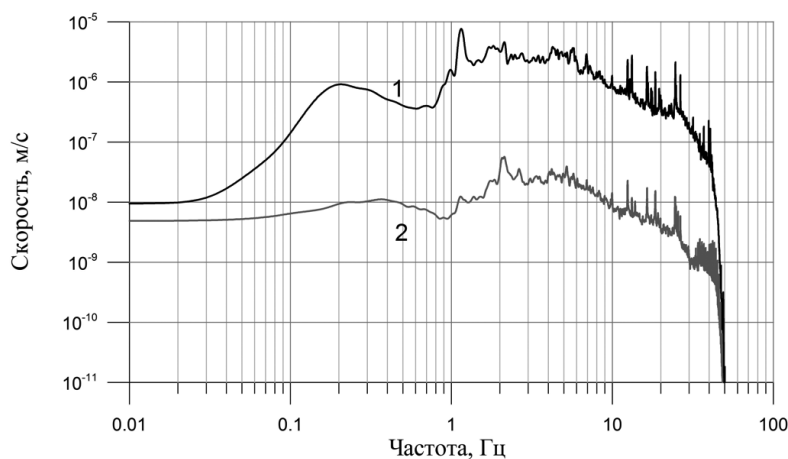


Рис. 3. Амплитудный спектр скорости: выходного сигнала регистрирующего канала CM-3 (1); компонента шума в выходном сигнале регистрирующего канала CM-3 (2)

На рис. 3 приведены спектры скорости шума и выходного сигнала сейсмометра CM-3. Стоит отметить, что данные на рис. 2 и 3 приведены без какой-либо коррекции. По результатам проведенного анализа получено, что эффективное значение

ние шума сейсмоприемника СМ-3 составляет $1,7 \cdot 10^{-8}$ м/с, что на два порядка ниже уровня сейсмического фона в месте проведения измерений $1,8 \cdot 10^{-6}$ м/с в диапазоне частот 0,01–50 Гц. На частотах ниже 0,1 Гц соотношение сигнал-шум становится близко к 1, поэтому коррекцию разумно проводить до нижней граничной частоты 0,1 Гц.

Используя второй метод выделения шума, можно получить шумовую дорожку датчика. На рис. 4 представлены микросейсмы и шум измерительного канала геофона GS-20DX. Эффективные значения амплитуды микросейсм и шума для геофона составляют, соответственно, $5,9 \cdot 10^{-7}$ м/с и $2,9 \cdot 10^{-8}$ м/с. Для сейсмометра СМ-3 эффективное значение шума – $1,6 \cdot 10^{-8}$ м/с, а амплитуды микросейсм – $1,9 \cdot 10^{-6}$ м/с.

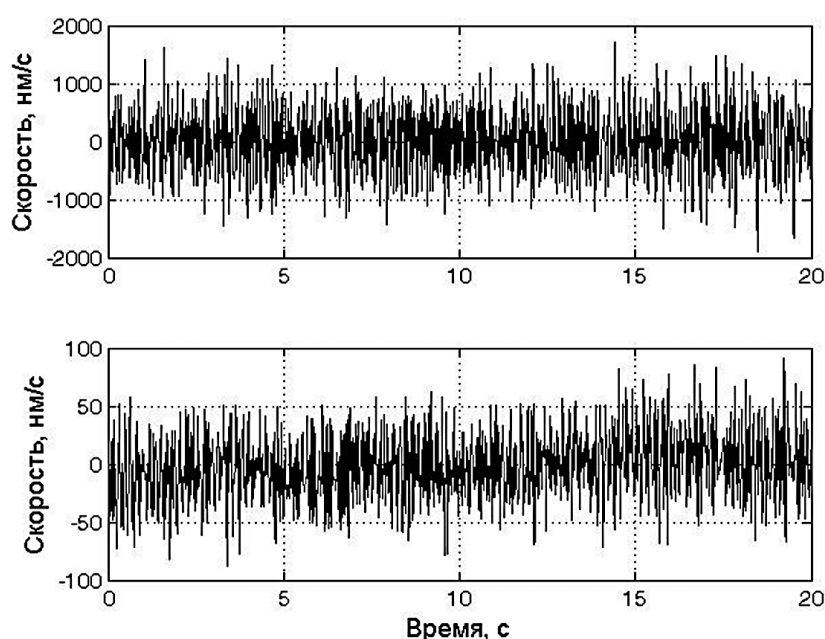


Рис. 4. Микросейсмы (сверху) и шум (снизу), полученные на постаменте ИДГ РАН для геофона GS-20DX.

Эффективное значение собственных шумов измерительного канала, полученных описанными выше методами, находятся в хорошем соответствии и дополняют друг друга. Заметим, что полученные критерии применимости численной коррекции справедливы в том случае, если сейсмический датчик регистрирует сейсмический фон. И граничная частота, до которой возможна коррекция, будет зависеть от уровня микросейсмического фона в месте конкретного размещения датчиков.

Численная коррекция сейсмограммы

Численная коррекция проводится по методу умножения частотных характеристик. Математически процесс коррекции описывается следующим образом [Гик, Карандеев, 1962]:

$$(s_1 \cdot v_1) \cdot (s_k v_k) = s_2 v_2, \quad (13)$$

где v_1 – частотная характеристика корректируемого датчика в относительных единицах, v_k – частотная характеристика корректирующей схемы в относительных единицах, v_2 – частотная характеристика для устройства, получаемого в результате коррекции, s_1, s_k, s_2 – коэффициенты пропорциональности. Общее уравнение корректирующей схемы имеет вид [Гик, Карандеев, 1962]:

$$v = \frac{\sum_{i=0}^m a_i p^i}{\sum_{j=0}^n b_j p^j}. \quad (14)$$

Коэффициенты a_i, b_i и порядок многочленов в числителе и знаменателе i и j различны для каждого конкретного случая и задаются численно. В нашем случае $i = j = 2, a_0 = \omega_0^2, a_1 = 2 \cdot h_0 \cdot \omega_0, a_2 = 1, b_0 = \omega_1^2, b_1 = 2 \cdot h_1 \cdot \omega_1, b_2 = 1$, где ω_0 – собственная частота сейсмического датчика, а ее требуется понизить до $\omega_1 \ll \omega_0$.

Для апробации метода численной коррекции была проведена серия экспериментов. На первом этапе выполнялась численная коррекция сейсмограмм, записанных геофоном GS-20DX с целью уменьшения нижней граничной частоты геофона и последующего сравнения скорректированных сейсмограмм с волновыми формами, записанными сейсмоприемником СМ-3. Согласно паспортным данным, нижняя граничная частота СМ-3 составляет 0,5 Гц, GS-20DX – 10 Гц. На постаменте были установлены сейсмоприемник СМ-3 и геофон GS-20DX для записи вертикальной компоненты микросейсмического фона. Регистрация велась с частотой опроса 200 Гц на 3-канальную сеймостанцию «ТИМ».

Как было показано выше, численную коррекцию сейсмограмм, зарегистрированных геофоном, разумно проводить до частоты 1 Гц. На рис. 5 представлены записи СМ-3 и откорректированного геофона GS-20DX, отфильтрованные в диапазоне 1–10 Гц полосовым фильтром. Сейсмограммы 2 и 3 на рис. 5 схожи и имеют коэффициент корреляции 0,84. Таким образом, численная коррекция позволила расширить диапазон нижних частот геофона GS-20DX с исходного значения 10 Гц до 1 Гц.

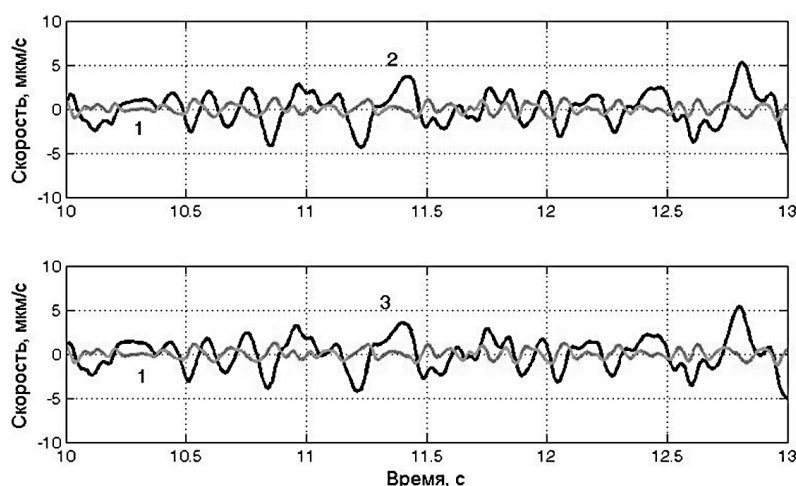


Рис. 5. Сигналы в частотном диапазоне 1–10 Гц, зарегистрированные некорректированным геофоном GS-20DX (1); сейсмоприемником СМ-3 (2); откорректированным геофоном GS-20DX (3)

Далее проводилась коррекция сейсмограмм сейсмоприемника СМ-3 и последующее сравнение с сейсмограммами, записанными сейсмоприемником REFTEK-151-60. Согласно паспортным данным, нижняя граничная частота REFTEK-151-60 составляет 0,017 Гц. Запись микросейсмического фона датчиком REFTEK-151-60 и сейсмоприемником СМ-3 велась на шестиканальную станцию REFTEK-130 с частотой опроса 100 Гц на постаменте в ИДГ РАН. В этом случае коррекция проводилась до частоты 0,1 Гц. Соответствующие микросейсмы откорректированного сейсмоприемника СМ-3 и датчика REFTEK-151-60 в полосе от 0,1 Гц до 0,5 Гц приведены на рис. 6.

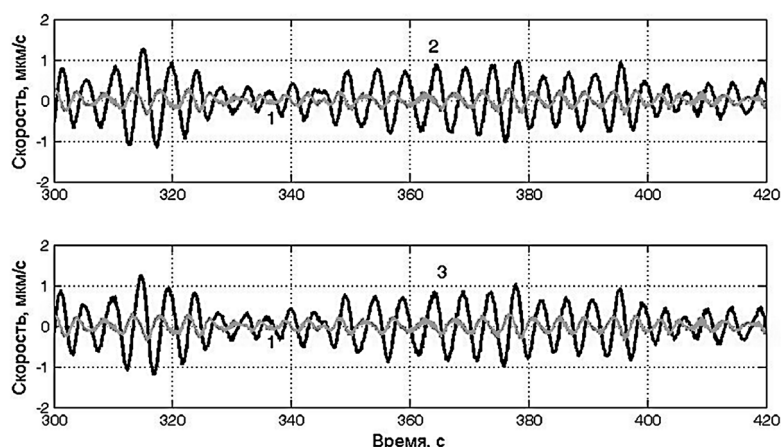


Рис. 6. Сигналы в частотном диапазоне 0,1–0,5 Гц, зарегистрированные: некорректированным сейсмоприемником СМ-3 (1); датчиком REFTEK (2); откорректированным сейсмоприемником СМ-3 (3).

Записи откорректированного сейсмоприемника СМ-3 и REFTEK-151-60 практически совпадают, коэффициент корреляции составляет 0,998. К сожалению, соотношение сигнал – шум исходных записей СМ-3 близко к 1 на частотах ниже 0,1 Гц, что не позволило провести коррекцию СМ-3 во всем рабочем диапазоне сейсмоприемника REFTEK-151-60, то есть, до нижней граничной частоты 0,017 Гц. В том, случае, если микросейсмический фон будет выше уровня фона, зарегистрированного на постаменте ИДГ, коррекцию можно проводить и до более низких частот. Это справедливо не только для фона, но и для низкочастотных сигналов, амплитуда которых значительно превышает уровень шума.

Помимо численной коррекции сейсмограмм микросейсмического фона, была проведена коррекция сейсмической записи, зарегистрированной при Японском землетрясении 11.03.2011 с $M = 8,8$. Анализировались сейсмограммы, зарегистрированные сейсмометром СМ-3, входящим в малоапертурную группу, расположенную на территории геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН, и широкополосным сейсмоприемником СМ-3-Д, установленном в шахте на глубине 20 м в массиве известняка. Сейсмический датчик СМ-3 установлен в приямке глубиной около 1 м на глинистом грунте на расстоянии 130 м от широкополосного датчика СМ-3-Д. Нижняя граничная частота СМ-3 составляет 0,01 Гц. На рис. 7 представлены откорректированные сейсмограммы СМ-3 до новой нижней граничной частоты 0,01 Гц и сейсмограммы, зарегистрированные СМ-3-Д. Обе зависимости профильтрованы в диапазоне 0,01–10 Гц.

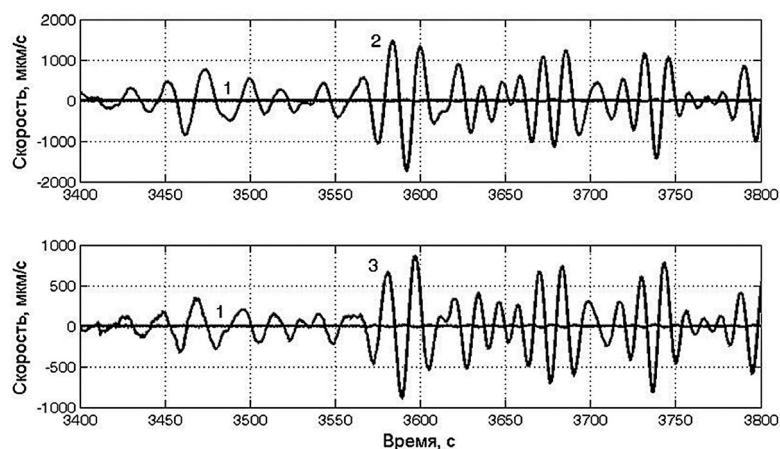


Рис. 7. Сигналы в частотном диапазоне 0,01–10 Гц, зарегистрированные: некорректированным сейсмоприемником СМ-3 (1); датчиком СМ-3-Д (2); откорректированным сейсмоприемником СМ-3 (3).

Заметим, что в последнем случае удалось восстановить АЧХ СМ-3 до частоты 0,01 Гц, так как амплитуда колебаний при Японском землетрясении существенно превышала уровень микросейсмического фона.

Выводы

На основе измерений микросейсмического фона определены собственные шумы измерительных каналов, содержащих геофон GS-20DX или сейсмоприемник СМ-3. Установлено, что метод численной коррекции сейсмограмм можно использовать для существенного расширения частотного диапазона измерительных приборов в направлении низких частот по сравнению с их паспортными данными. Показано, что критерием применимости этого метода является значительное превышение амплитуды регистрируемого сигнала над собственными шумами системы измерительного канала в исследуемом диапазоне периодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-05-01064-а), НШ-341.2008.2005 и программа № 6 ОНЗ РАН.

Литература

- Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука. 1969. 576 с.
 Карандеев К.В., Гук Л.Д. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск: Сиб. отд. АН СССР. 1962. 130 с.
 Al-Alaoui M.A. Low-frequency differentiators and integrators for biomedical and seismic signals // Circuits and systems I: fundamental theory and applications, IEEE Transactions on. 2001. V. 48, N. 8. P. 1006–1011.
 Havskov J. Instrumentation in earthquake seismology. Dordrecht [Netherlands]: Springer, 2004.
 Rodgers Peter W. Frequency limits for seismometers as determined from signal-to-noise ratios. Part 2. The feedback seismometer // Bull. Seismol. Soc. Amer. 19926. V. 82. P. 1099–1123.