

УДК 621.391

Определение длительности последовательности сейсмических импульсов, возбуждаемых при движении человека по поверхности грунта*

С.Г. ФИЛАТОВА

Параметры сейсмического сигнала, возбуждаемого при движении человека по поверхности грунта являются важной информацией при решении некоторых задач, возникающих при создании сейсмического средства охраны территорий. Таким параметром является длительность последовательности импульсов, соответствующая законченному проходу человека мимо сейсмического датчика. В статье разрабатывается статистический алгоритм оценки указанного параметра.

Ключевые слова: сейсмические системы охраны, длительность, пачка импульсов.

1. МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОТ ШАГОВ ЧЕЛОВЕКА

Движение человека с точки зрения разработки алгоритмов извлечения информации в системах охраны, основанных на анализе сейсмических сигналов, может быть представлено в виде имеющей конечную длительность последовательности (пачки) ударных воздействий на поверхность грунта через интервалы, равные длине шага [1, 2]. Каждый шаг вызывает импульсные колебания поверхности грунта и акустические волны, достигающие датчика, регистрирующего сейсмический сигнал, по многим путям в поверхностных слоях грунта [3].

Интенсивность импульсов, соответствующих шагам человека, изменяется в зависимости от расстояния между источником сейсмосигнала и датчиком, а также определяется силой удара. Максимальная интенсивность импульса возрастает с приближением к датчику и уменьшается при удалении от него (рис. 1). Наблюдаемый сигнал имеет выраженный максимум. Он соответствует моменту прохождения человеком точки минимального удаления траектории (траверза) от места установки сейсмического датчика [3].

Сигнал на входе датчика является результатом сложения большого количества элементарных волн, а поскольку совместное воздействие среды распространения и датчика на каждую волну можно представить в виде узкополосной линейной фильтрации [2, 4, 5, 6], то на выходе сейсмического датчика наблюдается нормализованный процесс [7, 8]. При этом существенное отличие области полезного сигнала от области сейсмического шума состоит в различии мощностей [5, 9].

Сейсмический фон представляет собой гауссовский процесс с неизвестным видом функции спектральной плотности мощности. В работах [1, 5, 10, 11, 12] успешно применяется модель марковского процесса для описания сейсмического сигнала, поэтому первым этапом обработки наблюдаемых сигналов может быть их адаптивное выбеливание, при котором отсчеты входного сигнала преобразуются в дельта-коррелированные гауссовские последовательности [13].

* Статья получена 9 октября 2012 г.

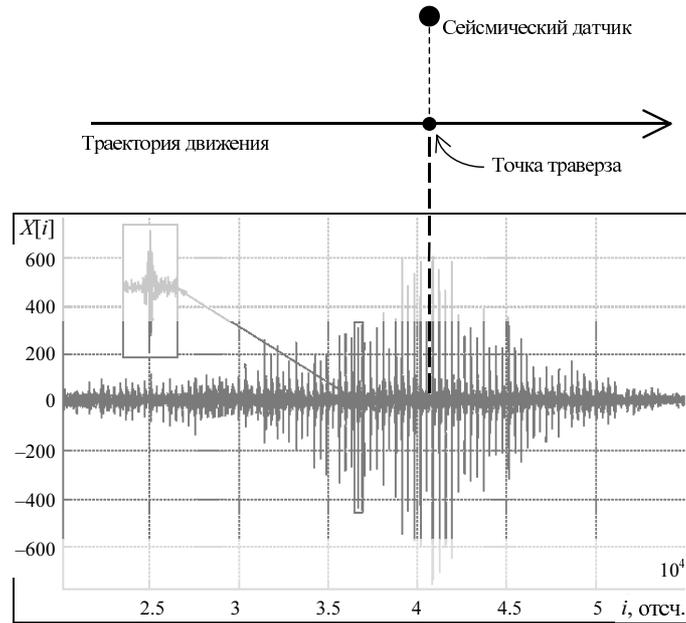


Рис. 1. Пример сейсмического сигнала движущегося человека

Полученные после выбеливания данные $\bar{X} = \| X[1], X[2] \dots X[I] \| ^T$ (I – количество отсчётов наблюдаемого сигнала) представляются в виде суммы двух гауссовых случайных процессов [14]:

$$\bar{X} = \bar{\Phi} + \bar{S},$$

где $\bar{\Phi} = \| \Phi[1], \Phi[2] \dots \Phi[I] \| ^T$ – фон, который является белым шумом с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D_{Φ} , $\bar{S} = \| S[1], S[2] \dots S[I] \| ^T$ – полезный сигнал, обусловленный воздействием объекта, с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, меняющейся по правилу

$$D[i, i_{mu}] = F_n[i, i_{mu}] \sum_{k=1}^K F_k[i], \quad i = 1 \dots I. \quad (1)$$

Функции $F_k[i]$ описывают распределения интенсивности K сигналов (импульсов), соответствующих шагам человека, а $F_n[i, i_{mu}]$ – огибающую пачки импульсов, соответствующую законченному проходу человека мимо сейсмического датчика. Огибающая пачки импульсов аппроксимируется функцией вида:

$$F_n[i, i_{mu}] = D_n e^{\left(-\frac{(i-i_{mu})^2}{2 \tau_{mu}^2} \right)}, \quad i = 1 \dots I, \quad (2)$$

где D_n – максимальная интенсивность пачки импульсов, i_{mu} – временное положение пачки, τ_{mu} – параметр, определяющий её длительность. Качественные исследования имеющихся записей реальных сейсмических сигналов человека и анализ работ [1, 3, 15] показывают, что

приемлемой является аппроксимация огибающей элементарного импульса при помощи гауссовой экспоненты:

$$F_k[i] = e^{\left(-\frac{(i-i_k)^2}{2\tau_k^2}\right)}, \quad i=1 \dots I, \quad (3)$$

здесь i_k – временное положение k -го импульса, τ_k – его длительность. Неравномерный характер перемещения объекта наблюдения вводится в модель соотношением:

$$i_k - i_{k-1} = T + \Delta T_k, \quad k = 1 \dots K, \quad (4)$$

в котором T – средний период следования импульсов (средняя длительность шага), ΔT_k – случайная составляющая, определяющая отклонение от среднего периода для k -го импульса и имеющая нулевое математическое ожидание.

2. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПАЧКИ ИМПУЛЬСОВ

Важным параметром, характеризующим сейсмический сигнал, является длительность пачки импульсов. В ходе натуральных статистических исследований было выявлено, что она может меняться в достаточно широких пределах, поскольку зависит как от свойств грунта и чувствительности сейсмического датчика, так и от скорости перемещения объекта.

Если зафиксировать скорость перемещения объекта, а также вид траектории (например, прямолинейная) и её удалённость от датчика, то можно поставить в соответствие определённой длительности пачки свойства грунта на исследуемом объекте. А это в свою очередь дает возможность полуавтоматической настройки сейсмической системы охраны при установке на новом объекте или при функционировании в изменяющихся условиях.

Согласно предложенной математической модели (1) – (3), информация о длительности заключена в функции $D[i, i_{mu}]$, описывающей изменение дисперсии в пределах пачки импульсов. Таким образом, основой измерений служит анализ текущей интенсивности сейсмического сигнала.

Для построения алгоритма определения длительности пачки формируется вспомогательная последовательность $\bar{U} = \{ \bar{U}_k, k = 1 \dots K \}$, K – количество импульсов в пачке. Элементами этой последовательности будут векторы

$$\bar{U}_k = \{ X[i], i \in [i_k - \Delta i_k; i_k + \Delta i_k] \},$$

состоящие из отсчётов исходного наблюдения, попадающих в окрестность $2\Delta i_k$ точки i_k , которая является временным положением k -го импульса (рис. 2).

Совместная плотность распределения вероятностей для последовательности $U_k[i]$ задаётся выражением:

$$w(\bar{U} | \tau_{mu}) = \prod_{k=1}^K \prod_{i_k - \Delta i_k}^{i_k + \Delta i_k} w(U_k[i] | \tau_{mu}). \quad (5)$$

Если окрестность Δi_k достаточно мала, а оценки i_k^* (4) достаточно точны, можно предположить, что максимальная дисперсия выборки на k -м шаге согласно (2) будет приблизительно постоянной:

$$d_k(\tau_{mu}) = D_n e^{\left(-\frac{(i_k - i_{mu})^2}{2\tau_{mu}^2}\right)}, \quad (6)$$

а одноэлементная функция правдоподобия $w(U_k[i] | \tau_{mi})$ будет гауссовой:

$$w(U_k[i] | \tau_{mi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(d_k(\tau_{mi}) + D_\Phi)}} e^{-\left(\frac{U_k^2[i]}{2(d_k(\tau_{mi}) + D_\Phi)}\right)}. \quad (7)$$

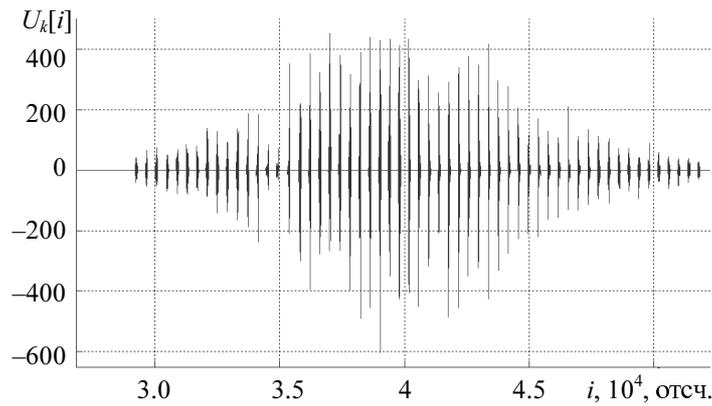


Рис. 2. Пример выборочной последовательности \bar{U}

При этом за величину D_n можно принять значение локальной мощности в окрестности Δi_j точки i_j^* , которая является оценкой временного положения j -го импульса, наименее удалённого от центра пачки i_{mi} . Из (5) и (7) получаем:

$$w(\bar{U} | \tau_{mi}) = \prod_{k=1}^K \left[2\pi(d_k(\tau_{mi}) + D_\Phi) \right]^{-2\Delta i_k} e^{-\left(\frac{\sum_{k=1}^K \frac{i_k + \Delta i_k}{2} U_k^2[i]}{\sum_{k=1}^K \frac{i_k - \Delta i_k}{2} (d_k(\tau_{mi}) + D_\Phi)} \right)}.$$

Оценка длительности пачки находится из уравнения максимального правдоподобия:

$$\frac{\partial \ln w(\bar{U} | \tau_{mi})}{\partial \tau_{mi}} = 0.$$

После выполнения соответствующих процедур получаем, что для нахождения длительности пачки импульсов необходимо решить уравнение:

$$\sum_{k=1}^K \frac{d_k(\tau_{mi})(i_k - i_{mi})^2}{(d_k(\tau_{mi}) + D_\Phi)} \left(\frac{\sum_{k=1}^K \frac{i_k + \Delta i_k}{2} U_k^2[i]}{\sum_{k=1}^K \frac{i_k - \Delta i_k}{2} (d_k(\tau_{mi}) + D_\Phi)} - 2\Delta i_k \right) = 0. \quad (8)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование алгоритма, построенного на основе численного решения уравнения (8), производилось методом цифрового статистического моделирования. Путем сопоставления истинной τ_{mi} и измеренной τ_{mi}^* длительностей пачки импульсов определялась ошибка измерения

$$\varepsilon_\tau = \tau_{mi} - \tau_{mi}^* .$$

Затем находились смещение оценки и среднеквадратическая ошибка (СКО):

$$m_\varepsilon = \overline{\tau_{mi} - \tau_{mi}^*} ;$$

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\overline{(\varepsilon_\tau - m_\varepsilon)^2}} .$$

При проведении экспериментов предполагалось, что временные положения импульсов известны точно. Очевидно, что при наличии ошибки в измерении временных положений импульсов, погрешность измерения длительности пачки увеличивается.

Рис. 3 иллюстрирует зависимости смещения и СКО оценки длительности пачки от среднего периода следования импульсов. С ростом среднего периода происходит увеличение ошибок оценки длительности пачки, что вызвано увеличением истинной длительности пачки, что, в свою очередь, приводит к уменьшению эффективной полосы спектра сигнала.

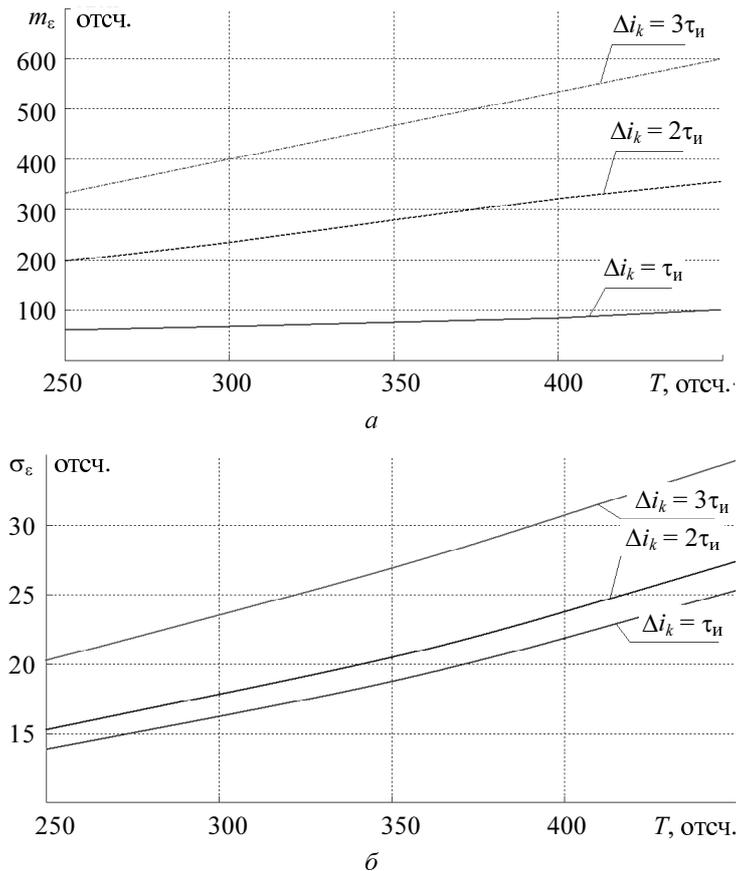


Рис. 3. Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки τ_{mi} от периода при различных Δi_k

На рис. 4 показаны графики зависимости смещения и СКО оценки длительности пачки импульсов от отношения сигнал/шум (ОСШ):

$$q^2 = D_n/D_\Phi,$$

при различной величине окрестности Δi_k . Увеличение ОСШ приводит к уменьшению ошибок оценки длительности пачки. Кроме того, графики рис. 4 говорят о наличии смещения получаемых оценок длительности пачки τ_{mi}^* уже при окрестности, равной длительности элементарного импульса τ_u . Это может быть вызвано тем, что при достаточно большом размере окрестности Δi_k наблюдается отклонение от модели (6) – (7), так как дисперсия выборки на k -м шаге в пределах окрестности Δi_k перестаёт быть постоянной и равной (6).

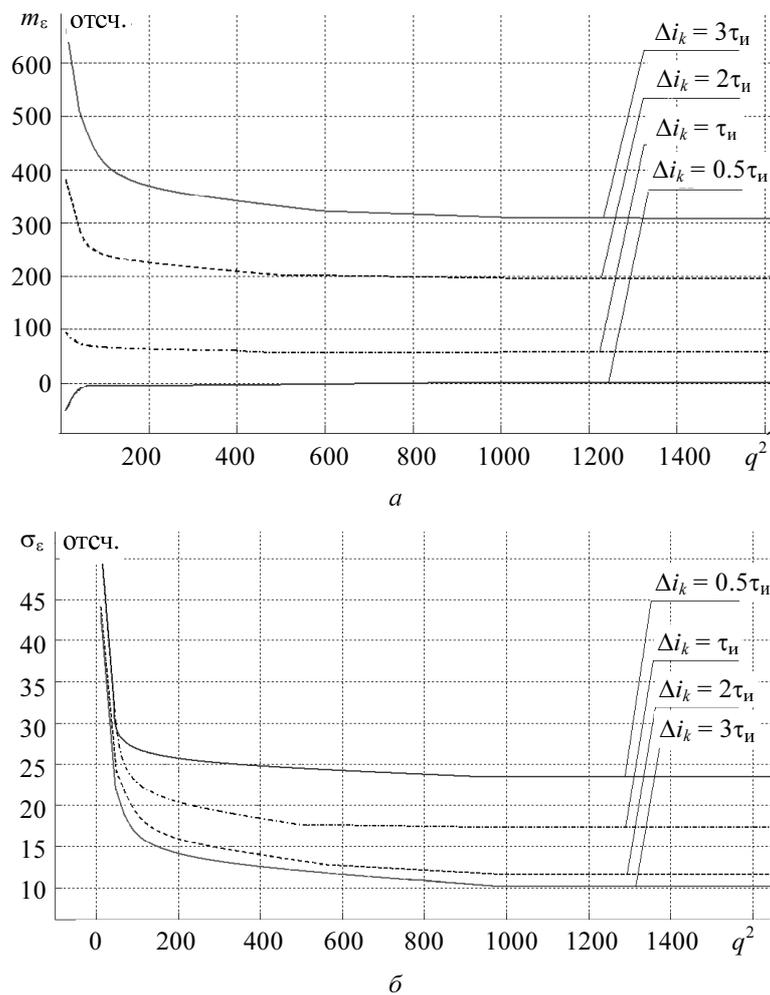


Рис. 4. Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки τ_{mi} от q^2 , $\tau_u = 20$ отсч.

В то же время, если рассматривать величину смещения относительно длительности пачки, можно заметить, что даже при размере окна $\Delta i_k = 3 \tau_u$, оно не превышает 15 % от τ_{mi} . Отметим также, что увеличение Δi_k приводит к уменьшению СКО оценки длительности пачки, что вызвано увеличением объёма обрабатываемых данных.

Зависимости смещения и СКО оценки длительности пачки от ОСШ при различных длительностях элементарного импульса приведены на рис. 5. Для анализа влияния длительности элементарного импульса на точность оценок длительности пачки импульсов необходимо зафиксировать размер окрестности Δi_k . При проведении экспериментов принималось $\Delta i_k = 60$ отсч. Выбор такого размера окрестности вызван желанием исследовать одну из крайних ситуаций, когда размер окрестности значительно больше τ_u .

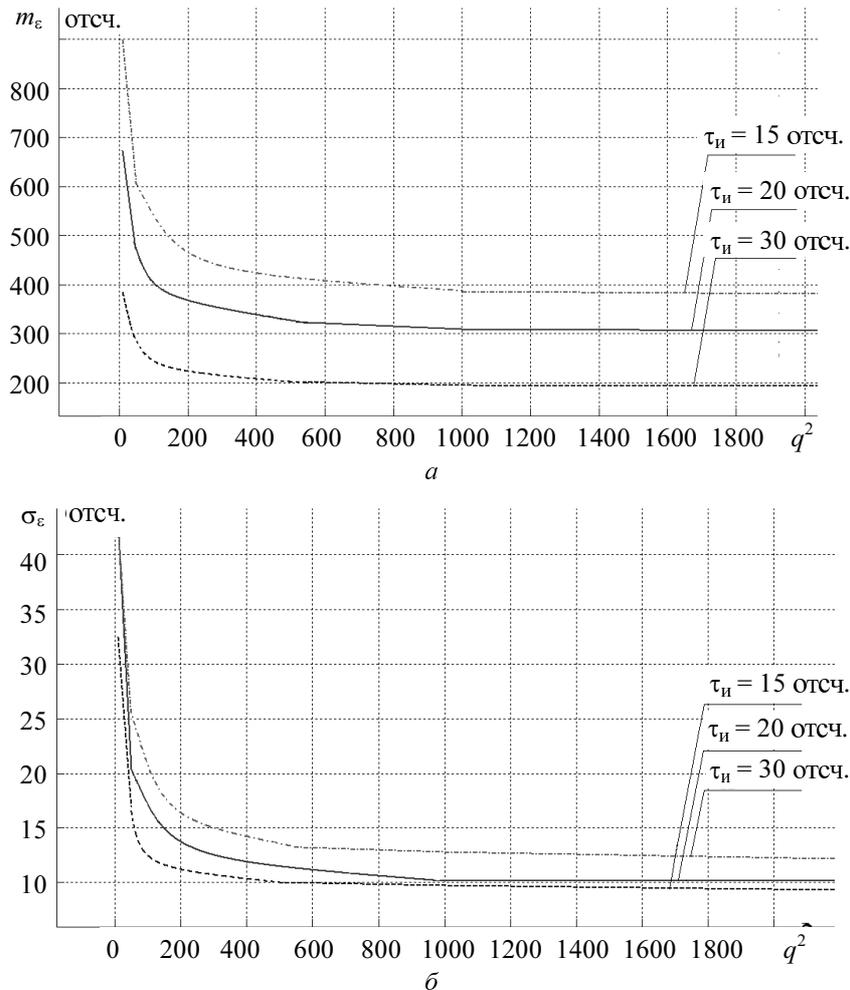


Рис. 5. Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки τ_{mi} от q^2 , $\Delta i_k = 60$ отсч.

При увеличении длительности импульса τ_u наблюдается уменьшение смещения и рост СКО оценки. При этом для больших значений q^2 смещение m_ϵ не превышает 16 % от истинной длительности пачки τ_{mi} , а для малых значений ($q^2 < 100$) может достигать 36 % от τ_{mi} . Что же касается СКО оценки длительности пачки, то они не превышают 2 % от τ_{mi} даже для малых значений ОСШ. Другая крайняя ситуация, когда Δi_k меньше всех τ_u , показана на рис. 6. Видно, что смещением можно пренебречь при всех значениях τ_u , так как по модулю оно не превышает 2.5 % от истинной длительности пачки τ_{mi} для всех значений ОСШ, ис-

пользовавшихся в эксперименте. СКО оценки не превышает 3.6 % от τ_{mi} для малых значений q^2 и 1.2 % от τ_{mi} для $q^2 > 200$. При этом на σ_ε почти не влияет длительность импульса τ_{ii} .

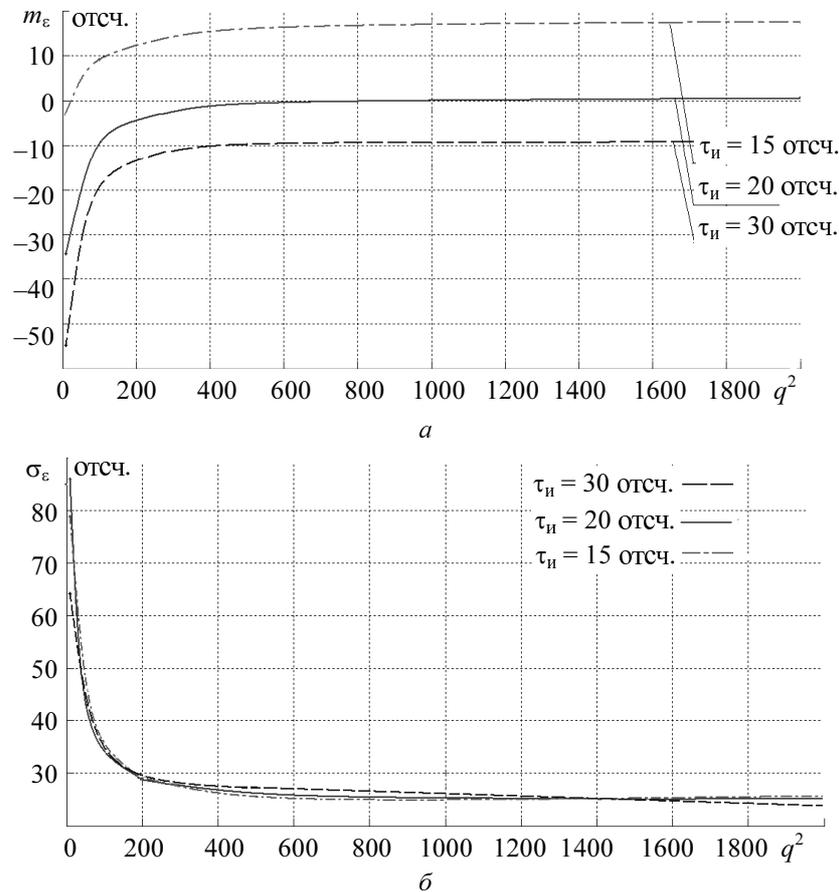


Рис. 6. Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки τ_{mi} от q^2 , $\Delta i_k = 10$ отсч.

При обработке реального сигнала временные положения импульсов определяются с некоторой погрешностью, значит, выбор наименьшего размера окрестности Δi_k не гарантирует достижение наименьшей ошибки в оценке длительности пачки τ_{mi}^* . в этом случае центр окна длительностью $2\Delta i_k$ не совпадает с реальным положением импульса. а если ошибка определения временных положений импульсов достаточно велика, наблюдается отклонение от предложенной модели (6)–(7), что в свою очередь приводит к возрастанию погрешности оценки длительности пачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённого статистического анализа алгоритма определения длительности пачки сейсмических импульсов показывают, что целесообразным представляется выбор размера окрестности Δi_k , равного или превышающего ожидаемую длительность импульса не более чем на 50 %. В этом случае достигается приемлемая для решения задач обработки сейсмических сигналов от шагов человека точность.

Применение описанного в статье алгоритма позволяет сократить объем обрабатываемых данных, что в свою очередь приводит к уменьшению времени вычислений и дает возможность реализовывать процедуры обработки в масштабе реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Чистова Г.К.** Модели и методы обработки сейсмических сигналов в системах распознавания: монография / Г.К. Чистова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2003. 196 с.
- [2] **Чувькин Б.В.** Анализ тонкой структуры финитных измерительных сигналов сейсмических средств обнаружения / Б.В. Чувькин // сб. науч. тр. «Проблемы объектовой охраны». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2000. – Вып. 1. – С. 69–84.
- [3] **Дудкин В.А.** Математические имитационные модели сейсмических сигналов / В.А. Дудкин, Ю.А. Оленин // сб. науч. тр. «Проблемы объектовой охраны». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2001. – Вып. 2. – С. 74–79.
- [4] **Дудкин В.А.** Использование датчиковой избыточности в сейсмических системах обнаружения / В.А. Дудкин // Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза, 2008. – С. 145–148.
- [5] **Райфельд М.А.** Обнаружение сигналов движущегося человека в сейсмической системе наблюдения / М.А. Райфельд, А.А. Спектор // Автометрия, 2005. – № 6. – С. 88–97.
- [6] **Спектор А.А.** Рекуррентное оценивание кусочно-постоянных параметров линейных динамических систем первого порядка / А.А. Спектор, Е.А. Тонконогов // Сб. науч. тр. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». – М.: Радио и связь, 2006. – С. 36–38.
- [7] **Корн Г.** Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
- [8] **Ларин А.** Специфические функции периметровых систем сбора и обработки информации / А. Ларин // БДИ, 2006. – № 2. – С. 49–51.
- [9] **Спектор А.А.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации / А.А. Спектор, С.Г. Филатова // Автометрия, 2008. – № 4. – С. 68–74.
- [10] **Дюгованец А.П.** Оценка состояния грунта под воздействием осадков во времени / А.П. Дюгованец, Н.В. Онуфриев // сб. науч. тр. «Проблемы объектовой охраны». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2004. – Вып. 4. – С. 65–72.
- [11] **Иванов В.А.** Распознавание случайных сигналов от различных объектов в пассивных средствах обнаружения / В.А. Иванов // Радиотехника, 2003. – № 1. – С. 94–95.
- [12] **Иванов В.А.** Развитие принципов адаптации сейсмических средств охраны участков местности / В.А. Иванов, Н.В. Онуфриев // Радиотехника, 2005. – № 3. – С. 97–99.
- [13] **Тонконогов Е.А.** Рекуррентное оценивание меняющихся параметров динамических систем / Е.А. Тонконогов, А.А. Спектор // Научный вестник НГТУ, 2009. – № 1. – С. 87–93.
- [14] **Иванов В.А.** Байесовский подход к построению сейсмического средства обнаружения / В.А. Иванов, И.Н. Крюков // сб. науч. тр. «Проблемы объектовой охраны». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2001. – Вып. 2. – С. 65–68.
- [15] **Барсуков А.Б.** Квазиоптимальная фильтрация сигналов в сейсмических средствах обнаружения / А.Б. Барсуков, В.А. Иванов, Ф.В. Щепеткин // Радиотехника, 2007. – № 2. – С. 78–80.

Филатова Светлана Геннадьевна, ассистент кафедры теоретических основ радиотехники. Основное направление научных исследований: статистическая обработка сигналов и изображений. Имеет 15 публикаций.

S.G. Filatova

Estimation of duration of seismic pulse group generated people's motion on the ground

The parameters of seismic signal generated people's motion on the ground is important to problem of seismic guard system development solving. One of this parameter is duration of pulse group corresponding people's trace. In this paper statistical algorithm of pulse group duration estimation is considered.

Key words: duration, seismic guard system, pulse group.