

УДК 621.391

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ИМПУЛЬСОВ В СЕЙСМИЧЕСКОМ СИГНАЛЕ ОТ ШАГОВ ЧЕЛОВЕКА**С.Г. Филатова***Новосибирский государственный технический университет*

Сейсмические системы охраны протяженных периметров функционируют, как правило, в нестационарных и неоднородных условиях. Параметры сейсмических сигналов, возбуждаемых человеком при движении по поверхности грунта, изменяются в зависимости от типа грунта, а также от сезонных природно-климатических факторов. Поэтому одной из важных задач при разработке таких систем является реализация процедур автоматической настройки алгоритмов обработки сигналов при изменении внешних условий. Реализация автоматической или полуавтоматической настройки позволит ускорить процесс развертывания системы на новых объектах, а также повысить надежность уже существующих систем. Одним из параметров сейсмического сигнала, которые зависят от свойств среды, является длительность импульса. В статье предложен алгоритм статистической оценки длительностей импульсов, основанный на анализе функций максимального правдоподобия. Его реализация позволит осуществлять обработку сигналов в режиме реального времени. Алгоритм исследован методом статистического моделирования, полученные результаты позволяют говорить о достаточно высокой точности его работы. Кроме того, проведены исследования, моделирующие работу алгоритма в условиях априорной неопределенности, даны рекомендации по выбору входных параметров алгоритма.

Ключевые слова: сейсмические системы охраны, длительность импульса, статистическая оценка

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136

Введение

В условиях повышения сложности и опасности современных производств, роста международной напряженности и учащения проявлений терроризма актуальной задачей остается внедрение надежных систем предотвращения несанкционированного доступа на территории предприятий, складов, частных владений и объектов государственного значения. К таким системам относятся системы охраны, основанные на сейсмическом принципе действия. Чувствительные датчики сейсмических систем охраны (ССО) устанавливаются скрытно в грунте, что уменьшает возможность блокирования системы. Такие системы обладают высокой чувствительностью и способны обнаружить и распознать сигнал как от крупных объектов (автомобиль, самолет), так и от мелких (собака, кошка) [1–5].

Одной из сложностей, с которой сталкиваются разработчики ССО, является существенная неоднородность грунта, связанная с протяженностью сейсмической антенны, в которую объединены датчики. В зависимости от проводящих свойств грунта датчики устанавливаются на расстоянии 8–15 м друг от друга, таким образом, расстояние между датчиками в антенне может варьироваться от 8 до 300 м. Очевидно, что внешние условия для разнесенных на большое расстояние датчиков могут быть различными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по государственному заданию № 2014/138, проект № 1176.

Кроме того, свойства грунта зависят от природно-климатических факторов, а точность системы существенно зависит от того, в каких условиях функционируют датчики. В настоящее время эта проблема решается путем экспертной подстройки параметров алгоритмов. Проводится тестирование системы и, в зависимости от результатов работы системы в режиме испытания, экспертом вводятся параметры. Аналогичные процедуры осуществляются при настройке системы при установке ее на новом объекте.

Однако, поскольку сейсмические сигналы обладают высокой информативностью, существует возможность автоматической оценки определенных параметров и настройки алгоритмов. Каждый шаг человека вызывает импульсные колебания поверхности грунта и сейсмические волны, достигающие сейсмического датчика по многим путям в поверхностных слоях грунта. Соответствующие сигналы на выходе датчика имеют характер импульсов со случайными амплитудой и фазой, имеющих примерно одинаковую длительность. Частота их появления зависит от скорости движения. Амплитуда импульсов изменяется в зависимости от расстояния до датчика и определяется силой удара.

Длительность импульса $\tau_{и}$ является важным параметром для алгоритмов системы сейсмической охраны. При этом длительность импульса определяется свойствами грунта, которые сильно зависят от природно-климатических и сезонных факторов. Например, средняя длительность импульса в сейсмическом сигнале, записанном зимой, составляет приблизительно 50 отсч.* (рис. 1, *a*), а средняя длительность в сигнале, записанном летом, составляет 20 отсч. (рис. 1, *б*). Заметим, что анализировались записи, сделанные на одном и том же датчике системы.

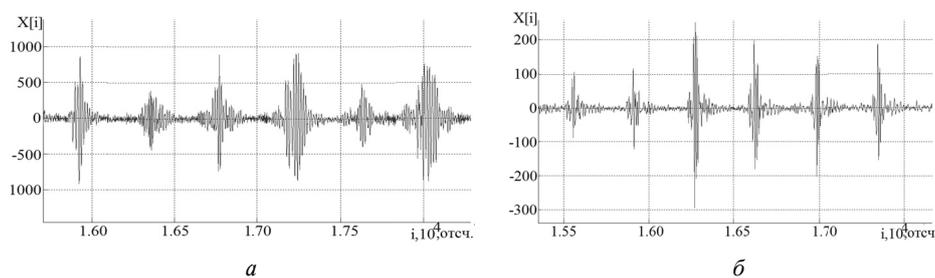


Рис. 1 – Пример сейсмического сигнала:

a – зимнего; *б* – летнего

Fig. 1 – An example of a seismic signal:

a – winter; *b* – summer

Кроме того, длительность импульса не является постоянной в пределах пачки. Это связано как с локальными неоднородностями грунта на пути прохождения сейсмической волны, так и с изменением интенсивности ударного воздействия на грунт при движении объекта. Однако натурные статистические исследования показывают, что возможно определение длительности импульса путем усреднения длительностей, измеренных по всему сигналу пачки. При этом отклонения от средней длительности в пределах пачки обычно являются незначительными.

Отметим также, что средняя длительность импульса может отличаться для разных датчиков системы из-за возможных различий свойств грунта в месте уста-

* Поскольку предварительно сейсмический сигнал дискретизируется с частотой 597 Гц, в статье для отображения сигналов и результатов статистического анализа алгоритмов используется шкала времени, переведенная в относительные единицы (отсчеты времени).

новки. Поэтому целесообразно оценивать ее для каждого датчика. Если при этом флуктуации средних длительностей незначительны, можно вычислять среднюю длительность по всем датчикам системы. Если же длительности сильно различаются, можно использовать индивидуальные настройки параметров для каждого датчика. Итак, оценка длительности импульса осуществляется при помощи двух-этапной процедуры. Сначала определяются длительности отдельных импульсов в пачке. Затем производится усреднение по всем импульсам.

1. Определение длительности сейсмического импульса

Оценка длительности k -го импульса τ_k^* в пачке находится на основе метода максимального правдоподобия. В качестве наблюдаемых на k -м шаге данных при оценке длительности используется вектор, составленный из элементов исходного наблюдения, попадающих в окрестности Δi точек i_k положения импульсов: $\bar{X}_k = \{ X [i] , i \in \Delta i \}$. Временные положения импульсов должны быть получены предварительно, например, при помощи марковского алгоритма [6]. Функция правдоподобия для соответствующего вектора наблюдений \bar{X}_k запишется следующим образом:

$$w(\bar{X}_k | \tau_k) = \prod_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} w(X [i] | \tau_k), \quad (1)$$

где $[i_{\min}^k, i_{\max}^k]$ – интервал оценки для длительности k -го импульса ($i_{\min}^k = i_k - \Delta i/2$; $i_{\max}^k = i_k + \Delta i/2$), а одноэлементные функции правдоподобия $w(X[i] | \tau_k)$ имеют вид

$$w(X[i] | \tau_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(D[i, \tau_k] + D_\Phi)}} \exp\left(-\frac{X^2[i]}{2(D[i, \tau_k] + D_\Phi)}\right). \quad (2)$$

Зависимость дисперсии от времени для k -го импульса в пачке может быть представлена в виде

$$D[i, \tau_k] = D_k \exp\left(-\frac{(i - i_k)^2}{2\tau_k^2}\right),$$

здесь D_k – максимальная интенсивность k -го импульса. Если известно временное положение импульса i_k , ее можно оценить для сигнала $X[i]$ в интервале Δi , центр которого совпадает с i_k , по правилу:

$$D_k^* = \frac{1}{\Delta i} \sum_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} X^2[i].$$

Из (1) и (2) получаем

$$w(\bar{X} | \tau_k) = \left(\prod_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} \sqrt{2\pi(D[i, \tau_k] + D_\Phi)} \right)^{-1} \exp\left(-\sum_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} \frac{X^2[i]}{2(D[i, \tau_k] + D_\Phi)}\right).$$

Оценка максимального правдоподобия находится из уравнения [7]

$$\frac{\partial \ln w(\bar{X} | \tau_k)}{\partial \tau_k} = 0.$$

После выполнения необходимых вычислительных процедур получаем

$$\sum_{i=i_{\min}^k}^{i_{\max}^k} \frac{D[i, \tau_k] (i - i_k)^2}{(D[i, \tau_k] + D_{\Phi})} \left(\frac{X^2[i]}{(D[i, \tau_k] + D_{\Phi})} - 1 \right) = 0. \quad (3)$$

При помощи уравнения (3) можно оценить длительность k -го импульса в пачке. Решая уравнение (3) для всех $k = 1 \dots K$, входящих в состав наблюдаемого сигнала, можно найти множество независимых оценок $\tau_1^*, \tau_2^* \dots \tau_K^*$, усредняя которые, находим среднюю длительность импульса на данном датчике системы.

2. Исследование алгоритма оценки длительности импульса

Анализ точности алгоритма производился методом статистического моделирования. При этом предполагалось, что интенсивность D_k всех импульсов одинаковая. Путем сопоставления истинной τ_k и измеренной τ_k^* длительностей импульсов определялась ошибка измерения

$$\varepsilon_j = \tau_k - \tau_k^*,$$

по совокупности экспериментов находились смещение оценки и среднеквадратическая ошибка (СКО). На точность получения оценок влияют отношение сигнал/шум и реальная длительности импульса (3), также наблюдается зависимость от размера интервала Δi .

На рис. 2, а показана зависимость смещения оценки длительности импульса от реальной длительности при различных значениях отношения сигнал/шум (ОСШ). При увеличении реальной длительности импульса оценки становятся смещенными, однако, поскольку смещение не превышает одного отсчета, им можно пренебречь.

Графики зависимости СКО оценки длительности импульса в пачке от реальной длительности при различных значениях ОСШ приведены на рис. 2, б и свидетельствуют о незначительном влиянии реальной длительности импульса на точность получаемых оценок. При этом если абсолютная ошибка возрастает с ростом реальной длительности импульса, то относительная, напротив, уменьшается. Так при $q^2 = 10$ для $\tau = 20$ отсч. относительная ошибка измерения составляет приблизительно 10 %, а для $\tau = 80$ отсч. относительная ошибка уменьшается до 4 %.

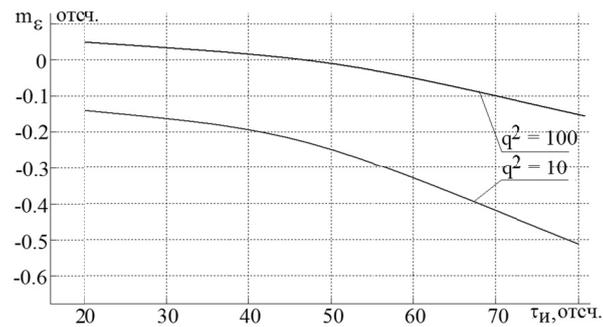
Рис. 3, а иллюстрирует зависимость смещения оценки длительности импульса в пачке от ОСШ при различных реальных длительностях импульса. При малом ОСШ наблюдается небольшое смещение оценок. Однако уже при $q^2 = 5$ модуль математического ожидания ошибки не превышает одного отсчета. Таким образом, можно считать, что оценки являются несмещенными.

Зависимость СКО оценки длительности импульса в пачке от ОСШ при различных реальных длительностях импульса приведена на рис. 3, б. Уменьшение

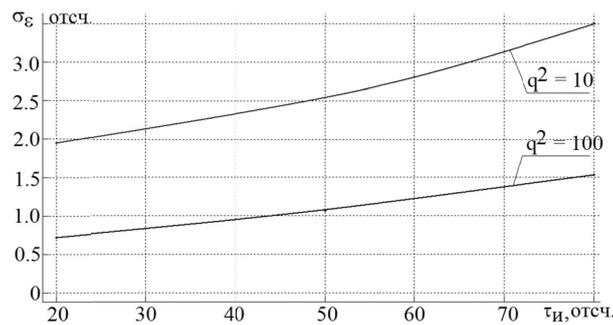
ОСШ приводит к росту СКО, который особенно заметен в области $q^2 < 10$. Однако необходимо отметить, что уже при $q^2 = 5$ относительная СКО не превышает 25 % от реальной длительности импульса. Следовательно, алгоритм работает с приемлемой точностью в присутствии сильных помех.

Важным параметром также является длительность интервала Δi , в котором производится оценка. На рис. 4 приведены зависимости смещения и СКО оценки длительности импульса от размера интервала оценки при длительности импульса, равной 20 отсч., и ОСШ, равном 100. СКО оценки значительно уменьшается с увеличением интервала наблюдения. При этом бесконечному увеличению интервала Δi препятствует квазипериодичность сейсмического сигнала шагов человека.

Необходимо отметить, что при работе предложенного алгоритма требуется знание отношения сигнал/шум, что невозможно в условиях априорной неопределенности, которая возникает как из-за постоянно меняющейся фоновой обстановки, а также из-за изменяющихся свойств грунта и отсутствия информации об удаленности траектории движения объекта от датчика. Решение этой проблемы заключается в использовании оценки ОСШ, которая может не совпадать с истинным значением.



а



б

Рис. 2 – Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки τ_n от истинной длительности импульса

Fig. 2 – Displacement of (a) and MSE (b) evaluation τ_n of the true pulse duration

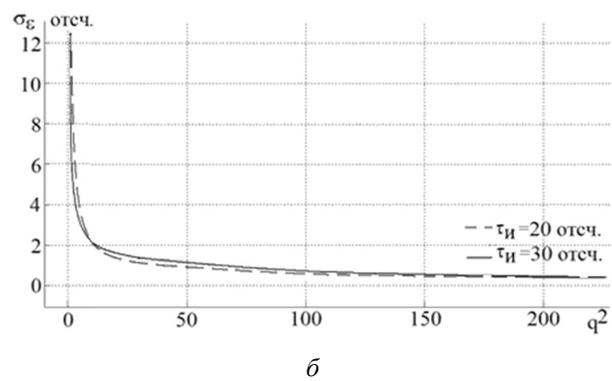
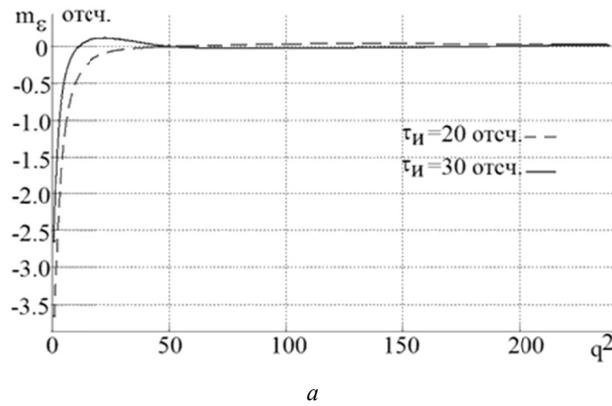


Рис. 3 – Зависимость смещения (а) и СКО (б) оценки $\tau_{и}$ от q^2

Fig. 3 – Displacement of (a) and RMS (b) estimation $\tau_{и}$ of q^2

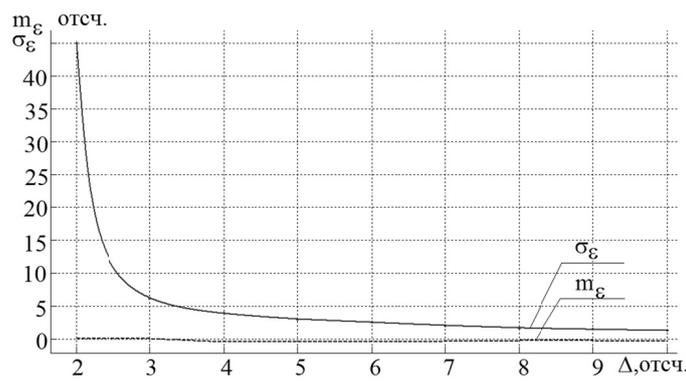


Рис. 4 – Зависимость смещения и СКО оценки $\tau_{и}$ от Δi , $\tau_{и} = 20$ отсч., $q^2 = 100$

Fig. 4 – The dependence of the bias and standard deviation estimation $\tau_{и}$ on Δi , $\tau_{и} = 20$, $q^2 = 100$

Было проанализировано влияние расстройки по ОСШ на точность получаемых оценок длительностей импульсов. Под расстройкой понимается разность между ОСШ входного сигнала $q_{\text{вх}}^2$ и ОСШ, используемого в алгоритме обработки $q_{\text{алг}}^2$: $\nu_{q^2} = q_{\text{вх}}^2 - q_{\text{алг}}^2$. При проведении экспериментов фиксировалось значение $q_{\text{алг}}^2$, изменялось значение $q_{\text{вх}}^2$. На рис. 5 представлены зависимости смещения и СКО оценки длительности импульса от расстройки по ОСШ ν_{q^2} . Длительность импульса предполагалась равной 20 отсч., а ОСШ, используемое в алгоритме обработки, было равно 100. Видно, что модуль математического ожидания и СКО минимальны при нулевой расстройке по ОСШ. Кроме того, в области положительных расстроек ($q_{\text{вх}}^2 > q_{\text{алг}}^2$) наблюдается менее резкое увеличение погрешности оценки. Это говорит о том, что при установке $q_{\text{алг}}^2$ необходимо задаваться заведомо меньшим параметром, что позволит обрабатывать сигнал с различным ОСШ достаточно точно, не прибегая при этом к адаптивной подстройке.

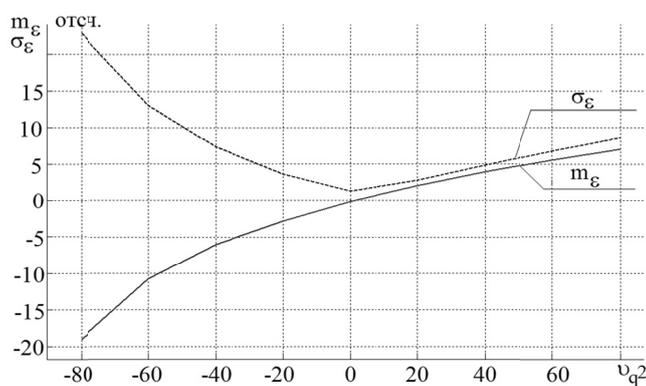


Рис. 5 – Зависимость смещения и СКО оценки $\tau_{\text{и}}$ от ν_{q^2}

Fig. 5 – The dependence of the bias and standard deviation estimation $\tau_{\text{и}}$ of ν_{q^2}

Заключение

В статье предложен алгоритм оценки длительности сейсмических импульсов, разработанный по методу максимального правдоподобия. Анализ точности проводился методом цифрового статистического моделирования. Было изучено влияние на точность оценок различных факторов: истинной длительности импульса, отношения сигнал/шум, а также длительности интервала оценки. Кроме того, была проанализирована точность работы алгоритма в случае расстройки по отношению сигнал/шум. Разработанный алгоритм обладает приемлемой для решения сейсмических задач точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатова С.Г. Определение длительности последовательности сейсмических импульсов, возбуждаемых при движении человека по поверхности грунта // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 1 (50). – С. 39–47.

2. **Филатова С.Г.** Точность оценки временного положения сейсмического сигнала в системах охранного наблюдения // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (51). – С. 73–80.
3. **Филатова С.Г., Спектор А.А.** Влияние параметрических расстройек на точность определения временных положений сигналов в сейсмических системах охраны // АПЭП-2012: материалы XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2–4 октября 2012 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Т. 4. – С. 71–73.
4. **Соколова Д.О., Спектор А.А.** Непараметрическое обнаружение сейсмоактивных объектов с импульсным воздействием на грунт // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника. – 2014. – Вып. 2. – С. 164–173.
5. **Соколова Д.О., Спектор А.А.** Классификация движущихся объектов по спектральным признакам сейсмических сигналов // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 112–119.
6. **Спектор А.А., Филатова С.Г.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. – 2008. – № 4. – С. 68–74.
7. **Левин Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

PULSE LENGTH ESTIMATION OF SEISMIC SIGNAL OF HUMAN STEPS

Filatova S.G.

Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russian Federation

Guard systems of long perimeter based on seismic principle usually work in non-stationary and inhomogeneous conditions. Parameters of seismic signals of human steps change depending on soil property and seasonal climatic factors. Therefore, the important task in the design of such systems is to implement procedures for automatic configuration of algorithms for signal processing when changing external conditions. The creation of automatic or semi-automatic configuration procedures will allow us to fast deployment at new objects as well as to improve the reliability of existing systems. One of the parameters of the seismic signal, which depend on properties of the environment, is the pulse length. In the paper the statistical estimation algorithm of pulse length based on the analysis of maximum likelihood function is suggested. Its implementation will allow to process signals in real-time. The algorithm is studied by the method of statistical modeling. The results obtained are proved quite high precision of its work. The paper will be interesting for specialists who created algorithm of signal processing for seismic guard system.

Keywords: seismic guard system, pulse length, statistical estimation

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136

REFERENCES

1. Filatova S.G. Opredelenie dlitel'nosti posledovatel'nosti seismicheskikh impul'sov, vzbuzhdaemykh pri dvizhenii cheloveka po poverkhnosti grunta [Estimation of duration of seismic pulse group generated people's motion on the ground]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2013, no. 1 (50), pp. 39–47.
2. Filatova S.G. Tochnost' otsenki vremennogo polozheniya seismicheskogo signala v sistemakh okhrannogo nablyudeniya [The precision of seismic signal time position estimation in a guard system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2013, no. 2 (51), pp. 73–80.
3. Filatova S.G., Spector A.A. [Input parameters estimation error effect on precision of signal time determination in a seismic guard system]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2012)"* [Proceedings of 11th International Conference "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering" (APEIE-2012). In 7 vol.], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2012, Novosibirsk, 2012, vol. 4, pp. 71–73.
4. Sokolova D.O., Spector A.A. Neparametricheskoe obnaruzhenie seismoaktivnykh ob"ektov s impul'snym vozdeistviem na grunt [Non-parametric detection of seismic objects with pulse

- influence on soil]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Radiolokatsionnaya tekhnika – Electronics Questions. A series of radar equipments*, 2014, no. 2, pp. 164–173.
5. Sokolova D.O., Spector A.A. Klassifikatsiia dvizhushchikhsia ob"ektov po spektral'nyim priznakam seismicheskikh signalov [Classification of moving objects based on spectral features of seismic signals]. *Avtometriia – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, iss. 5, pp. 522–528. doi: 10.3103/S8756699012050135. Translated from *Avtometriia*, 2012, vol. 48, iss. 5, pp. 112–119.
 6. Spector A.A., Filatova S.G. Otsenka vremennogo polozheniya impul'sov v seismicheskikh sistemakh nablyudeniya na osnove Markovskoi fil'tratsii [Estimating the time position of pulses in seismic observation systems based on Markovian filtering]. *Avtometriia – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, vol. 44, iss. 4, pp. 337–341. doi: 10.3103/S8756699008040080. Translated from *Avtometriia*, 2008, vol. 44, iss. 4, pp. 68–74.
 7. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. 3rd ed., rev. and enl. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 656 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Филатова Светлана Геннадьевна – родилась в 1984 году, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов и изображений. Опубликовано 19 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: s.filatova@corp.nstu.ru).

Filatova Svetlana Gennadjevna (b. 1984) – Candidate of Technical Sciences, associate prof., researcher of Theoretical bases of radioengineering Department at the Novosibirsk state technical university. Her research interests are currently focused on statistical processing of signal and images. She is author of 19 scientific papers. (Address: 20, Karl Marks Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: s.filatova@corp.nstu.ru).

Статья поступила 17 мая 2015 г.
Received May 17, 2015

To Reference:

Filatova S.G. Otsenka dlitel'nostei impul'sov v seismicheskom signale ot shagov cheloveka [Pulse length estimation of seismic signal of human steps]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 128–136. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136