

«БЫСТРЫЙ» АЛГОРИТМ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Предложен «быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации на основе «прореживания» ряда экстремумов, не использующий декомпозицию на составляющие с одновременным сглаживанием. Показана возможность оценивания параметров временных рядов в скользящем окне и определения параметров мод на участке анализа непосредственно по экстремумам процесса. Целью является сокращение времени анализа больших массивов данных и адаптация метода к режиму реального времени.

Материалы и методы. Исследование проводилось в среде Matlab с использованием экспериментальных данных сейсмической системы обнаружения.

Результаты. Показано, что параметры мод могут быть оценены без использования декомпозиции на основе анализа экстремумов сигнала.

Выводы. Предложенные решения позволяют сократить время анализа быстропеременных процессов, они ориентированы на использование в системах реального времени.

Ключевые слова: быстропеременные процессы, экстремальная фильтрация, экспресс-оценка спектра, моды.

N. V. Myasnikova, M. P. Beresten', A. A. Priymak

A “FAST” EXTREME FILTERING ALGORITHM

Abstract.

Background. A “fast” extreme filtering algorithm based on the “thinning” of a number of extrema is proposed that does not use decomposition into components with simultaneous smoothing. The possibility of estimating the parameters of time series in a sliding window and highlighting the modes in the analysis area directly by the extrema of the process is shown. The goal is to reduce the analysis time of large data sets and adapt the method to real-time mode.

Materials and methods. The study was conducted in a Matlab environment using experimental data from a seismic detection system

Results. It is shown that mode parameters can be estimated without decomposition based on the analysis of signal extremes.

Conclusions. The proposed solutions can reduce the analysis time of rapidly variable processes, oriented to the use of real-time systems.

Keywords: fast-variable processes, extreme filtering, express spectrum estimation, modes.

Введение

Авторы на протяжении многих лет развивают направление цифровой обработки сигналов, связанное с экспресс-анализом сигналов в системах диа-

гностики, обнаружения, распознавания и др. Для этой цели использовался метод экстремальной фильтрации, позволяющий произвести декомпозицию сигнала на знакопеременные составляющие (моды), используя лишь его экстремальные значения. Параметры выделенных составляющих – частоты и амплитуды (или мощности) – могут использоваться как диагностические признаки для обнаружения изменений состояния наблюдаемого объекта, для оценивания спектральных, время-частотных характеристик и др.

Метод экстремальной фильтрации (ЭФ) считается неким аналогом метода декомпозиции на эмпирические моды (EMD). Однако алгоритм экстремальной фильтрации был описан еще в начале 1970-х гг. [1, 2]. Результаты декомпозиции использовались для аппроксимации сигналов и выделения информативных составляющих, а параметры разложения использовались для экспресс-оценки спектра и формирования диагностических признаков.

Аппарат экстремальной фильтрации [3] основан на выделении из ряда x_k , $k = 1, \dots, N$, знакопеременных составляющих, локально определяемых экстремумами процесса $x_{\varepsilon i}$:

$$x_{pi} = -0,25x_{\varepsilon i-1} + 0,5x_{\varepsilon i} - 0,25x_{\varepsilon i+1} \quad (1)$$

при одновременном сглаживании:

$$x_{ci} = 0,25x_{\varepsilon i-1} + 0,5x_{\varepsilon i} + 0,25x_{\varepsilon i+1}. \quad (2)$$

Первое уравнение соответствует режекторному фильтру, удаляющему составляющую известной частоты, а второе – сглаживающему фильтру нижних частот. Причем эти преобразования применяются сначала к ряду x_i , а затем к сглаженным составляющим x_{ci} . Совокупность x_{pi} , полученных в результате применения преобразований (1) и (2), представляет собой декомпозицию на знакопеременные составляющие, частота fp каждой составляющей оценивается по количеству экстремумов на интервале или по расстоянию между ними, а по самим экстремумам оценивается амплитуда Ap (или мощность Sp) этой частотной составляющей.

Таким образом, для оценивания амплитудного спектра сигнала $Ap(fp)$ (или спектра мощности $Sp(fp)$) сложной формы необходимо выполнить декомпозицию на моды и оценить параметры составляющих.

Подход к повышению быстродействия

Моды извлекаются из исходного ряда экстремумов $x_{\varepsilon i}$, а уравнение (1) – это нормированное уравнение осциллятора с частотой, определяемой расстоянием между экстремумами. Поэтому, если применить фильтрацию непосредственно к ряду экстремумов, прореживая их, то можно получить экспресс-оценку спектра $Ap(fp)$ на частотах fp , определяемых коэффициентом прореживания k :

$$Ap(k) = \sum_{l=2}^{N_{\varepsilon}/l-2} -\frac{1}{2}x_{\varepsilon}(k \cdot (l-1)) + x_{\varepsilon}(k \cdot l) - \frac{1}{2}x_{\varepsilon}(k \cdot (l+1)),$$

$$fp(k) = \frac{1}{(t_{\varepsilon N} - t_{\varepsilon 1})k}. \quad (3)$$

Здесь k фактически коэффициент прореживания, т.е. так же, как при обычной экстремальной фильтрации, анализ начинается с высокочастотной составляющей. Вначале анализируется последовательность выделенных экстремумов, а затем – каждый второй, третий и т.д.

В качестве примера возьмем сигналы, зарегистрированные в системе сейсмических наблюдений «проезд автомобиля, бег группы, проезд автомобиля».

На экспериментальных данных сейсмической системы обнаружения с использованием датчиков-геофонов, показано, что времячастотные характеристики, полученные по параметрам составляющих, выделенным экстремальным фильтром (по формуле (1), применяемой сначала к исходному ряду, а затем к последовательно получаемым сглаженным составляющим (2)) и на основе предлагаемой экспресс-оценки (3), качественно совпадают, при этом существенно снижается трудоемкость анализа. Последнее качество алгоритма позволяет проводить анализ в режиме реального времени.

На рис. 1 (верхний график) показан сигнал, изменение частот f_{ij} Гц (средний график) и амплитуд A_{ij} в размерных единицах (нижний график) первых трех из j составляющих разложения; по оси абсцисс – номера отсчетов. Совокупность f_{ij} и A_{ij} характеризуют время-частотное распределение. А на рис. 2 представлены тот же сигнал и те же параметры, но полученные на основе «быстрого» алгоритма. «Картина» на рис. 2 и качественно и количественно совпадает с результатами, полученными по алгоритму экстремальной фильтрации (рис. 1), использующему многократное выделение мод.

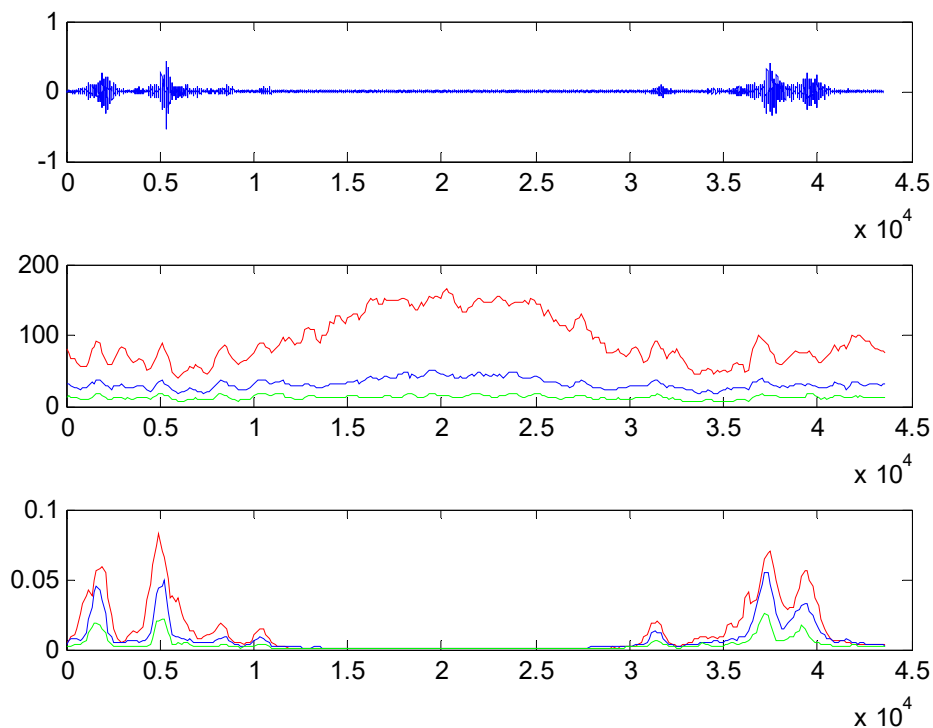


Рис. 1. Изменение параметров, оцениваемых на основе ЭФ, при проезде автомобиля, беге группы, проезде автомобиля

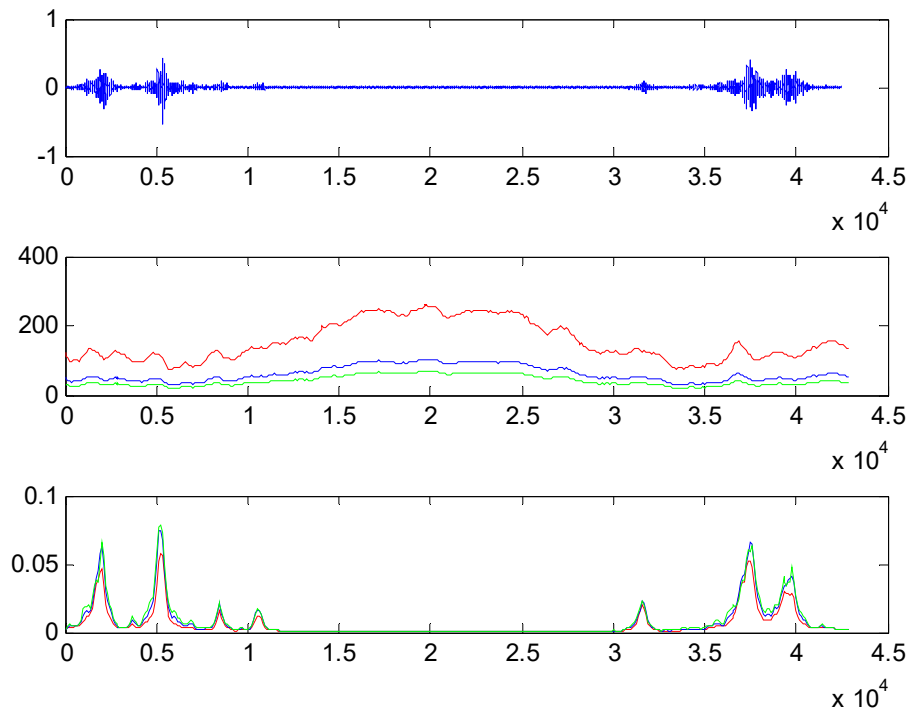


Рис. 2. Изменение параметров, оцениваемых на основе «быстрой» ЭФ

Описанный подход уже использовался в работе [4].

По оценке спектра (3) можно получить оценку значений исходного сигнала в точках экстремумов:

$$x_3(l) = \sum_{k=1}^{N_3} Ap(k) \cdot \cos(2\pi \cdot fp(k) \cdot l), l=1, \dots, N_3.$$

Таким образом, сформирована пара – прямое и обратное «быстрое» преобразование на основе ЭФ.

Однако часто желательно иметь не только оценку текущего спектра, но и «видеть» сами составляющие сигнала. Они будут вычислены по формуле

$$xf_k(l) = -\frac{1}{2}x_3(k \cdot (l-1)) + x_3(k \cdot l) - \frac{1}{2}x_3(k \cdot (l+1)), \quad xt_k = (k \cdot l). \quad (4)$$

Причем не все составляющие xf_k являются модами, а только те, у которых небольшая дисперсия расстояния между экстремумами «прореженного» ряда экстремумов. На рис. 3 показаны результаты декомпозиции сигнала на основе «классической» экстремальной фильтрации по формулам (1) и (2), а на рис. 4 – по формуле (4).

Следовательно, можно оптимизировать алгоритм: сначала вычислить расстояния между экстремумами k -й составляющей; определить дисперсию этого расстояния; при малом значении дисперсии вычислить составляющую по формуле (3).

На рис. 5 показан спектр сигнала трехмодального сигнала, вычисленный по формуле (3). Высокочастотные компоненты вычисляются более точно.

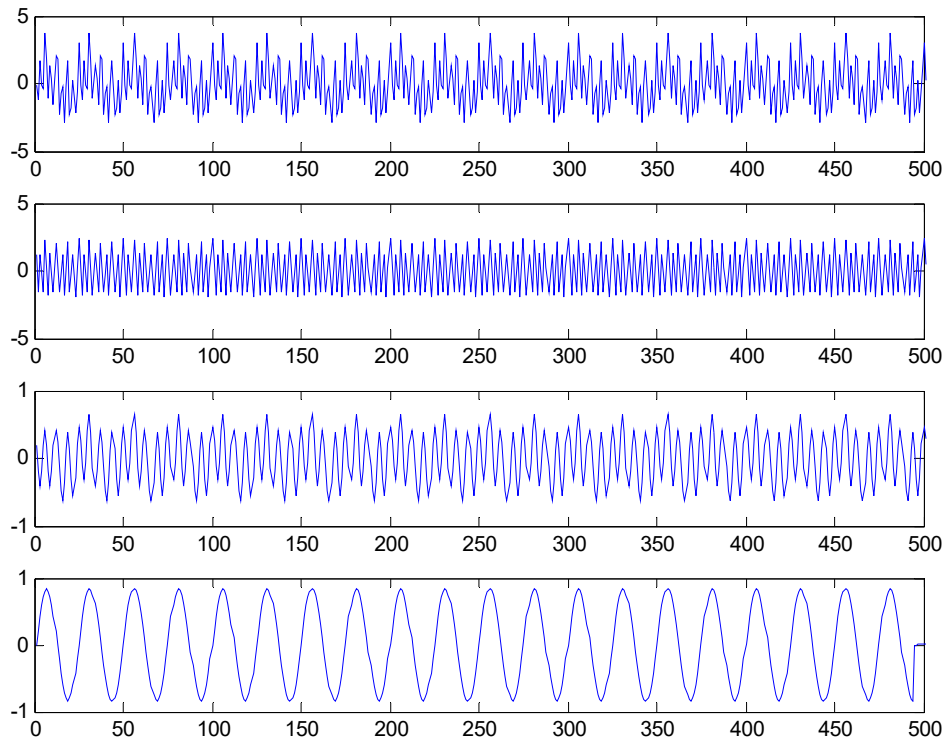


Рис. 3. Декомпозиция фрагмента сигнала на основе ЭФ

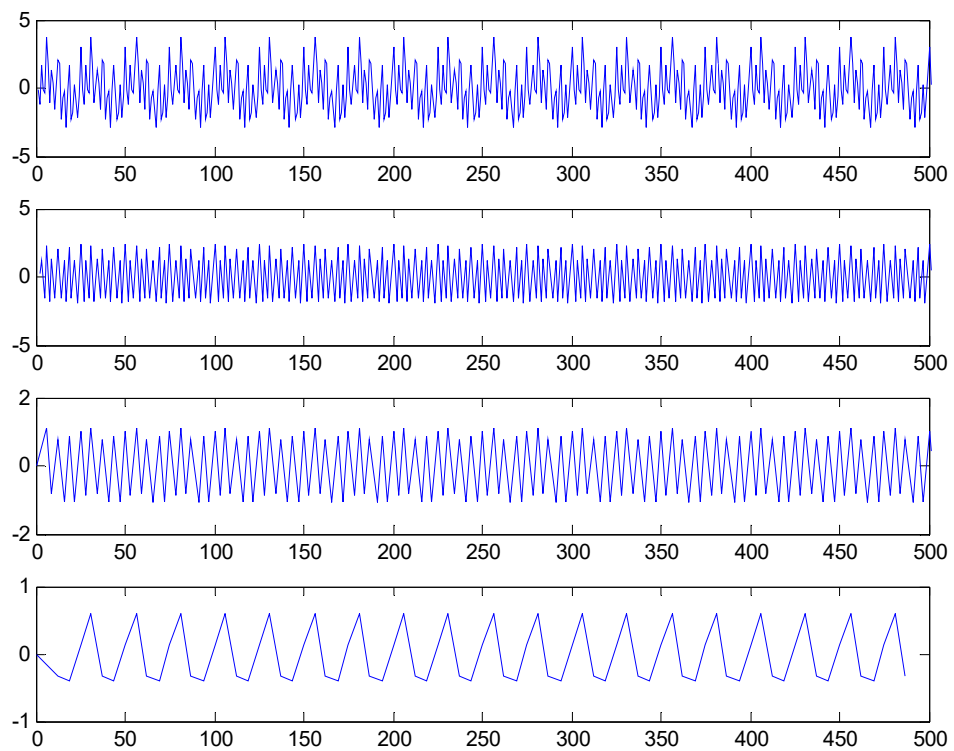


Рис. 4. Декомпозиция фрагмента сигнала на основе быстрого преобразования

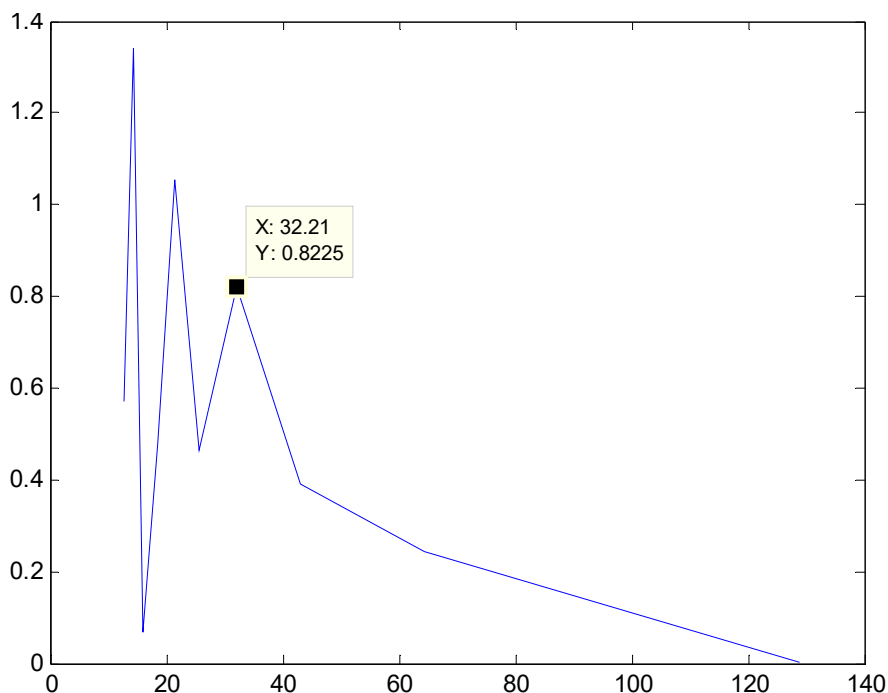


Рис. 5. Спектр модельного сигнала: по оси абсцисс частота в Гц, по оси ординат – амплитуды в размерных единицах

Таким образом, предложен еще один способ оценивания спектрального состава сигнала. Конечно, он больше подходит для анализа высокочастотных составляющих и особенно полезен в системах обнаружения, работающих на контрасте сигнал/шум, но может быть использован и в системах диагностики и контроля.

Так как декомпозиция широко используется в цифровой обработке сигналов, авторы уже предпринимали попытки усовершенствовать метод экстремальной фильтрации: на основе многократного интегрирования для изменения порядка выделения мод, на основе интегрирования-дифференцирования для разделения близких частотных компонент. Предложенный в этой статье вариант нацелен на уменьшение трудоемкости, он ориентирован на системы постоянного мониторинга, контроля и т.д. [5–7].

Заключение

Аппарат экстремальной фильтрации позволяет провести экспресс-оценку спектральных характеристик и выделить информативные составляющие. При этом метод ЭФ обладает наименьшей трудоемкостью и может быть использован в системах сейсмических наблюдений, в охранных системах, системах постоянного мониторинга ответственных объектов.

Библиографический список

1. **Ерохин, А. Т.** Алгоритм аппроксимации экстремумов многоэкстремальной функции гауссовскими полиномами / А. Т. Ерохин, Э. С. Кубанейшвили, В. Б. Лебедев // Методика измерения ускорения силы тяжести. – Москва : ИФЗ, АН СССР, 1973. – С. 81–96

2. **Ерохин, А. Т.** Аппроксимация многоэкстремальных функций и вопросы сжатого представления гравиметрической информации / А. Т. Ерохин // *Методика измерения гравитационных полей*. – Москва : ИФЗ, АН СССР, 1974. – С. 81–109.
3. **Мясникова, Н. В.** Экспресс-анализ сигналов в инженерных задачах / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, Б. В. Цыпин, М. Г. Мясникова. – Москва : Физматлит, 2016. – 184 с.
4. **Мясникова, Н. В.** «Быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации / Н. В. Мясникова, А. А. Приймак, Д. С. Пичейкин // *Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию образования кафедры «Автоматика и телемеханика» : в 2 т.* – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 221–223.
5. **Мясникова, Н. В.** Разложение на эмпирические моды на основе экстремальной фильтрации / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // *Цифровая обработка сигналов*. – 2014. – № 4. – С. 13–17.
6. **Мясникова, Н. В.** Разложение на эмпирические моды на основе дифференцирования и интегрирования / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // *Цифровая обработка сигналов*. – 2016. – № 1. – С. 20–23.
7. **Мясникова, Н. В.** Разложение сигналов на моды с предварительным интегрированием и дифференцированием / Н. В. Мясникова, М. Г. Мясникова // *Датчики и системы*. – 2018. – № 6 (226). – С. 21–25.

References

1. Erokhin A. T., Kubaneyshvili E. S., Lebedev V. B. *Metodika izmereniya uskoreniya sily tyazhesti* [The method of measuring the gravity acceleration]. Moscow: IFZ, AN SSSR, 1973, pp. 81–96 [In Russian]
2. Erokhin A. T. *Metodika izmereniya gravitatsionnykh poley* [Method of measuring gravitational fields]. Moscow: IFZ, AN SSSR, 1974, pp. 81–109. [In Russian]
3. Myasnikova N. V., Beresten' M. P., Tsypin B. V., Myasnikova M. G. *Ekspress-analiz signalov v inzhenernykh zadachakh* [Express analysis of signals in engineering problems]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 184 p. [In Russian]
4. Myasnikova N. V., Priymak A. A., Picheykin D. S. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 55-letiyu obrazovaniya kafedry «Avtomatika i telemekhanika»: v 2 t.* [Automation and control issues in technical systems: proceedings of XXXIII International scientific and technical conference devoted to the 55th foundation anniversary of the sub-department “Automation and remote control”: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, pp. 221–223. [In Russian]
5. Myasnikova N. V., Beresten' M. P. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. 2014, no. 4, pp. 13–17. [In Russian]
6. Myasnikova N. V., Beresten' M. P. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. 2016, no. 1, pp. 20–23. [In Russian]
7. Myasnikova N. V., Myasnikova M. G. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 6 (226), pp. 21–25. [In Russian]

Мясникова Нина Владимировна

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматике и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: genok123@mail.ru

Myasnikova Nina Vladimirovna

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation
and remote control, Penza State University
(40, Krasnaya street, Penza, Russia)

Берестень Михаил Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: beresten@sura.ru

Beresten' Mikhail Petrovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of automation
and remote control, Penza State
University (40, Krasnaya street,
Penza, Russia)

Приймак Антон Александрович

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: antton120@yandex.ru

Priymak Anton Aleksandrovich

Postgraduate student, Penza State
University (40, Krasnaya street,
Penza, Russia)

Образец цитирования:

Мясникова, Н. В. «Быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации /
Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, А. А. Приймак // Известия высших учеб-
ных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). –
С. 70–77. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-7.