

УДК 621.391.8

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ СЛАБОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ГАУССОВОМ ШУМЕ

*А.В. БАРКОВ**(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается метод обнаружения слабого гармонического сигнала в канале утечки информации. Обнаружение гармонического сигнала обеспечивается его моделированием в аддитивной смеси с белым гауссовым шумом. Проведен анализ и сравнение известных и предложенного метода. На основании анализа методов счета нулей предложен спектральный метод обнаружения слабого гармонического сигнала в гауссовом шуме, обладающий широкополосностью и быстродействием, высокой чувствительностью при одновременном выделении нескольких гармонических сигналов. По результатам сравнения сделан вывод о предпочтительности спектрального метода для выделения слабого сигнала из шумов. Данный метод позволяет производить накопление сигнала для его последующего обнаружения без априорной информации о периоде следования сигнала, что является его преимуществом по отношению к методам накопления сигнала в устройствах с задержкой и обратной связью.

Введение. Обнаружение слабых сигналов в шумах представляет задачу, которая имеет отношение ко многим системам связи. Сложности с выделением сигналов увеличиваются с уменьшением отношения мощностей сигнал/шум. Соотношение сигнал/шум в каналах утечки информации много меньше единицы, поэтому вопрос выделения сигнала на фоне больших шумов является актуальным в части защиты информации.

Обнаружение гармонического сигнала в шумах может быть использовано в различных системах связи и передачи информации, в обнаружении сигналов в канале утечки информации и определении наличия канала утечки.

Выделение сигнала из шумов имеет важное значение при передаче информации. Для систем цифровой связи это особенно важно, так как шумы могут исказить как информационную составляющую сигнала, так и данные о синхронизации. При нарушении синхронизации даже при передаче верного информационного сообщения может оказаться невозможным его прием.

Цель данной работы – обнаружение гармонического сигнала в шумах высокого уровня. Задача – разработать и предложить метод обнаружения сигнала, рассмотреть его преимущества относительно известных методов.

Все системы цифровой связи требуют определенной синхронизации сигналов, поступающих в приемник. В работе [5] рассматриваются основы синхронизации различных уровней. Основные уровни синхронизации, требуемые для когерентного приема, – частотный и фазовый. Для их реализации используются схемы фазовой автоподстройки частоты. Перед разработчиками таких систем стоит задача – разработать контур, который бы надлежащим образом реагировал на изменение входного сигнала, но при этом не был слишком чувствителен к кажущимся изменениям, которые на самом деле являются следствиями воздействия шума.

В этой же работе [5] рассмотрены методы, основанные на анализе спектра, а именно классы методов спектральной линии, в которых основным при определении ошибок является либо использование существующей спектральной линии на несущей частоте, либо создание такой линии на несущей частоте или частоте, кратной несущей. Существует иной набор методов, особенно полезных при оценке или сопровождении частоты несущей, в котором используется форма спектра пропускания сигнала [5]. Таким образом, выделение гармоник на несущей частоте, а также выделение спектральных составляющих для определения формы спектра пропускания сигнала в присутствии шума актуально для данного класса методов.

В настоящей работе рассмотрен *метод выделения гармонического сигнала из шума*, который основан на подсчете количества переходов через ноль, и *метод спектральной оценки сигнала*; представлены результаты моделирования и анализ метода обнаружения слабого гармонического сигнала в широкополосном шуме, который состоит в счете нулей смеси сигнала и шума [1]. Данный метод обнаружения основан на свойствах аддитивной смеси сигнала и шума [2]. Также показаны преимущества каждого из методов и возможные области применения на основе этих преимуществ. Выполнен анализ обоих методов и дана их оценка, по результатам которой предпочтительным выбран метод оценки спектра, который является более эффективным по соотношению сигнал/шум и не уступает в быстродействии. Этот метод позволяет выделять несколько гармонических составляющих сигнала. Данное свойство можно использовать для обнаружения периодических сигналов сложной формы, что особенно актуально для систем цифровой передачи информации.

Обнаружение гармонического сигнала в шумах счетом переходов через ноль. Для сигнала и шума, прошедшего через фильтр с прямоугольной частотной характеристикой и средней частотой f_0 , частота смеси f определяется из соотношения [1]:

$$f = f_0 + (f_c - f_0) \cdot (1 - e^{-M_c/M_u}), \tag{1}$$

где f_c – частота сигнала; M_c – мощность сигнала; M_u – мощность шума.

Данная формула позволяет, зная частоту f и среднюю частоту фильтра f_0 , установить наличие сигнала, если его частота отлична от средней частоты фильтра.

Для определения частоты f применяется метод счета нулей смеси сигнала и шума за определенный промежуток времени. Уравнение, которое связывает число нулей смеси периодического сигнала и шума с отношением M_c/M_u , частотой сигнала и среднеквадратичной частотой шума f_{00} , приближенно может быть записано в виде [1]:

$$f_N - f_{00} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{(f_c^2 - f_{00}^2)}{f_{00}} \cdot \frac{M_c}{M_u}, \tag{2}$$

где f_N – частота сигнала, определенная как число нулей за время T .

Обнаружение сигнала может быть основано на том, что шум увеличивает число нулей гармонического сигнала по сравнению с числом нулей синусоидального сигнала. Обнаружение сигнала основано на отклонении количества нулей смеси сигнал-шум от количества нулей, определенных для одного шума [1]:

$$\Delta = |N_{cu} - N_u| = |N_c - N_u| \cdot (1 - e^{-\frac{M_c}{M_u}}), \tag{3}$$

где N_c – число нулей одного сигнала; N_u – число нулей одного шума; N_{cu} – число нулей смеси сигнала с шумом; M_c – мощность сигнала; M_u – мощность шума.

Данное соотношение показывает $\Delta > 0$, что означает наличие сигнала в шуме.

Количество переходов через ноль $N_{cp}(0)$ шума в ограниченной полосе частот от 0 до верхней частоты f_ϵ можно определить по формуле [2, с. 147]:

$$N_{cp}(0) = 0,577 \cdot \frac{2\pi \cdot f_\epsilon}{\pi}. \tag{4}$$

Величину отношения сигнал/шум определяем следующим образом:

$$SNR = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right), \tag{5}$$

где A_{signal} – амплитуда сигнала, В; A_{noise} – среднеквадратичное значение шума, В.

Для проверки данного соотношения разработана модель в среде LabView. Производим моделирование цифрового шума и гармонического сигнала и подсчитываем количество переходов через ноль.

Блок-схема модели представлена на рисунке 1.

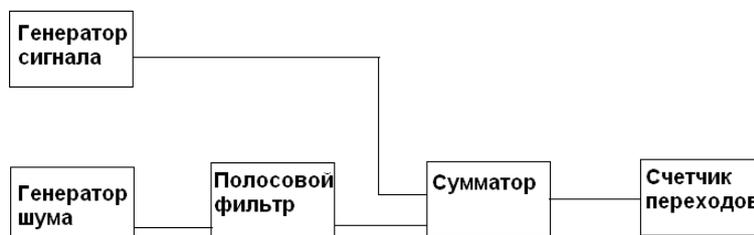


Рис. 1. Блок-схема модели счета переходов через ноль

В качестве полосового фильтра используем функцию Filter среды LabView с параметрами: тип – Баттерворта; порядок – 15; полоса пропускания 7...15 кГц. Для генерации шума используем функцию Gaussian White Noise среды LabView с параметром стандартного отклонения, равным 11. Гармонический сигнал генерируем функцией Basic function generator, изменяем амплитуду сигнала от 0,1 до 8.

Задаем для схемы частоту дискретизации 64 кГц. Моделирование проводим для времени 32 с. Повторяем каждое измерение 22 раза и усредняем значения. Результаты моделирования для частоты сигнала 7,5 кГц представлены на рисунке 2 (по оси абсцисс – напряжение гармонического сигнала, В; по оси ординат – число пересечений нуля аддитивной смесью сигнал-шум).

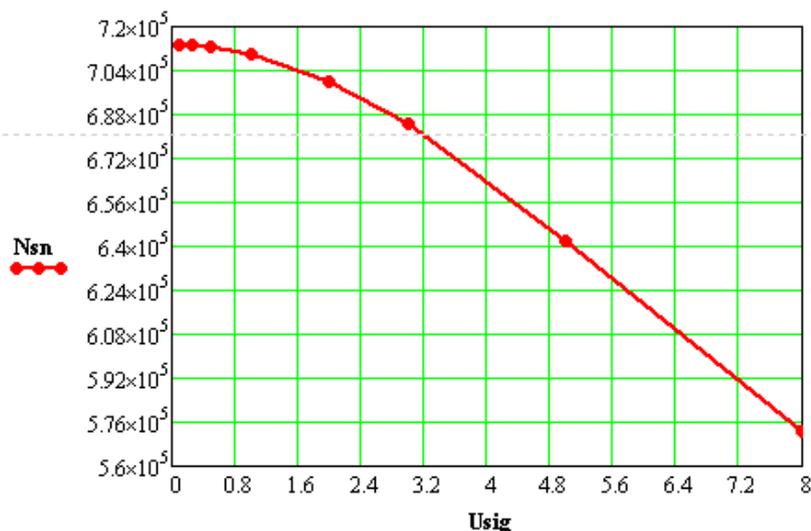


Рис. 2. Экспериментальные данные для гармонического сигнала 7,5 кГц, зависимость числа пересечений нуля смеси сигнал-шум от напряжения гармонического сигнала

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость числа пересечений нуля смеси гармонического сигнала и белого гауссового шума от напряжения сигнала U_{sig} , В.

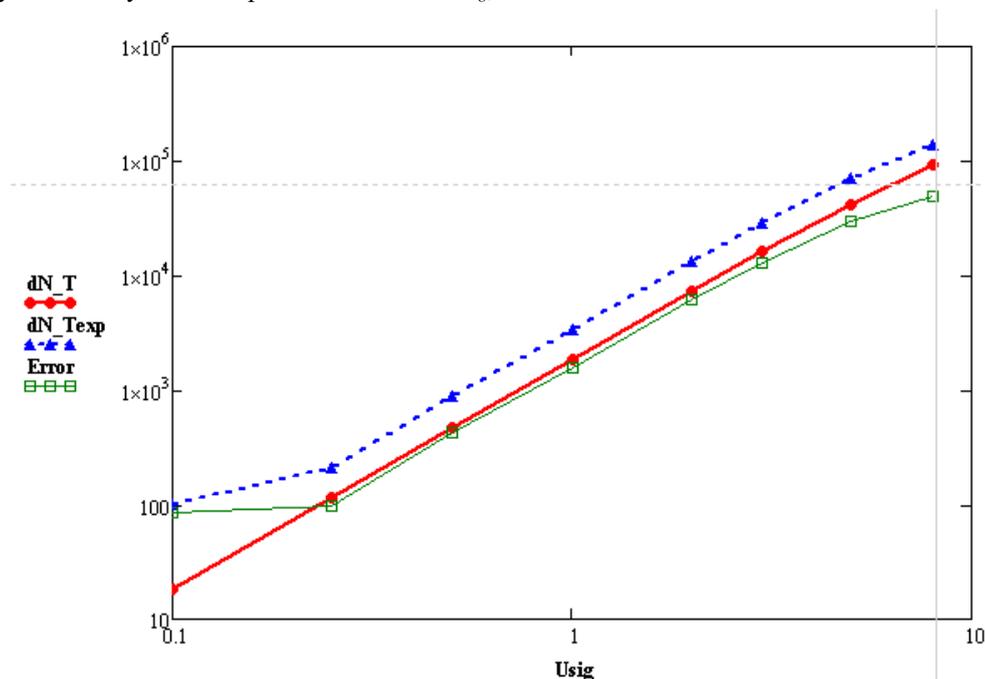


Рис. 3. Разность пересечений нуля сигнал-шум и шум:

dN_T – теоретическое число пересечений нуля, рассчитанное по формуле (3); dN_{Texp} – число пересечений, полученное на модели (см. рис. 1); $Error$ – абсолютная погрешность теоретического и экспериментального построения

Данное моделирование показывает, что при наличии сигнала в шуме рассчитанное число переходов через ноль отклоняется от значения для чистого шума. Исходя из этого можно судить о наличии сигнала в шуме. С увеличением амплитуды сигнала увеличивается и отклонение от величины Δ , которая представлена в формуле (3) и соответствует теоретическому соотношению.

Обнаружение гармонического сигнала спектральным методом. Обнаружение сигналов в шумах может быть основано на накоплении сигнала с целью выделения его из шума. В работе [3] представлен принцип выделения сигналов, который основан на совпадении сигналов и реализуется с применением накопителей на линиях задержки с положительной обратной связью. Накопление сигналов в [3] показано во временной форме; описывается метод накопления импульсных сигналов в устройстве с задержанной обратной связью. На вход накопительного устройства с задержанной обратной связью поступает последовательность видеоимпульсных сигналов, повторяющихся с квазипериодом T . Каждый из этих сигналов проходит на выход, откуда поступает в цепь обратной связи, и задерживается на время T , после чего поступает на второй вход суммирующего устройства, а оттуда опять на выход и т.д. Таким образом, для накопления сигнала и улучшения отношения сигнал/шум указанным методом требуются априорные данные о сигнале, в частности период повторения сигнала.

В данной работе реализовано обнаружение сигнала при условии отсутствия исходных параметров сигнала. Параметры сигнала, такие как амплитуда, фаза и период, нам изначально неизвестны, поэтому мы не можем улучшить отношение сигнал/шум путем накопления сигнала по времени. Накопление сигнала предлагается осуществлять в частотной области как результат Фурье-преобразования.

Произведем разделение сигнала на отрезки равной длительности. Далее производим дискретное преобразование Фурье каждого отрезка зашумленного сигнала. Суммируют результаты преобразования по каждому отрезку по формуле:

$$S = \sum_0^{N-1} FFT(S_n), \tag{6}$$

где N – количество отрезков сигнала равной длины; S_n – сигнал указанной длины; FFT – быстрое Фурье-преобразование сигнала; S – накопленное Фурье-преобразование отрезков сигнала.

По данным преобразования Фурье, полученного в результате накопления, формируем спектр амплитуд зашумленного сигнала, по которому определяют гармонику с наибольшей амплитудой. При наличии сигнала в некоррелированном белом шуме сигнал будет увеличиваться в результате накоплений в N раз, а шум в \sqrt{N} раз, таким образом, сигнал будет выделяться на фоне шума.

Произведено моделирование выделения гармоники частотой 7,5 кГц с амплитудой 0,1 В из белого гауссового шума со среднеквадратичным значением 11 В, отношение мощности шума к мощности сигнала по формуле (5) составляет 12100. Генерируем смесь сигнала и шума длительностью 1 с, производим 22 генерации и обработку результата по формуле (6).

Рисунок 4 отображает действительную часть Фурье-преобразования для 1 с сгенерированной смеси сигнал-шум; рисунок 5 – действительную часть Фурье-преобразования после 22 накоплений.

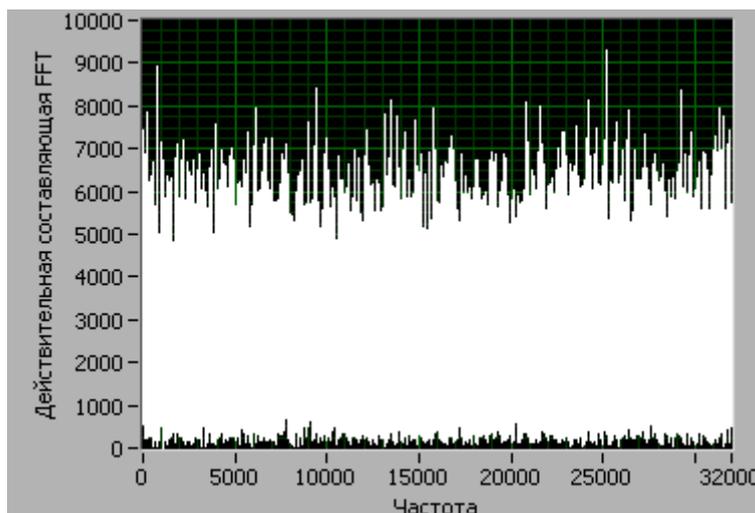


Рис. 4. Действительная часть Фурье преобразования для смеси сигнал-шум длительностью 1 секунда

На частоте 7,5 кГц присутствует гармоническая составляющая. Задаем для схемы частоту дискретизации 64 кГц. Для её выделения можно использовать узкополосный фильтр, что дополнительно улучшит отношение сигнал/шум.

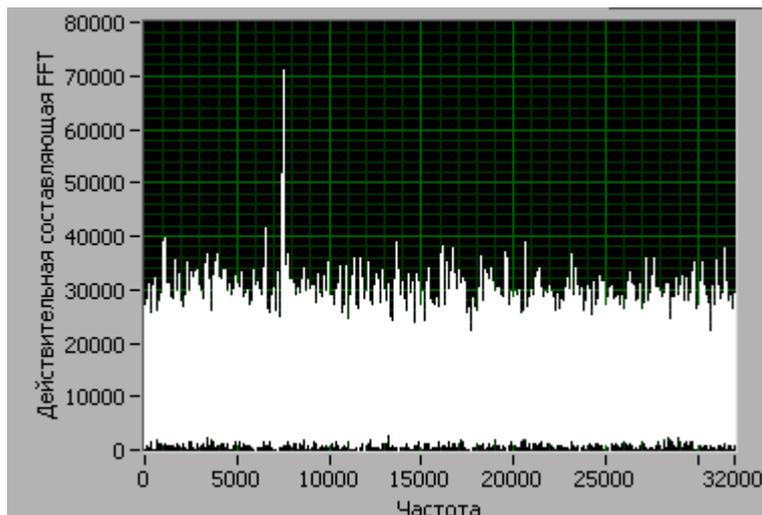


Рис. 5. Действительная часть Фурье преобразования для смеси сигнал-шум в результате 22 накоплений

В [1] показано, что за время, равное примерно 600 секунд, был достоверно обнаружен сигнал методом счета нулей, мощность которого в 12100 раз меньше мощности шума. Из рисунка 5 видно, что данный сигнал обнаружен предложенным спектральным методом в течение 22 секунд в смеси сигнала и шума.

В работе [4] представлен анализ экспериментальных сигналов по подсчету пересечений нулевого уровня. Показано, что с помощью оценки числа нулей высоких порядков можно выделять регулярные сигналы, а также определять доминирующие частоты в некоторой полосе. Необходимо отметить, что данный метод не может сравниться со спектральными методами оценки ни по разрешению, ни по устойчивости. Анализ результатов работы [4] свидетельствует, что разделить две периодические компоненты можно, начиная с равных амплитуд сигнала и шума, и при условии, что данные гармоники достаточно далеко разнесены друг от друга. При малых отношениях сигнал/шум можно выделить только одну гармонику. Также показано выделение одной гармонической, составляющей при отношении сигнал/шум -20 дБ. Спектральный метод, описанный в данной работе, устраняет этот недостаток. Показано обнаружение гармоники при отношении сигнал/шум -80 дБ. Возможно выделение нескольких гармоник полезного сигнала, которые присутствуют в шумах.

Покажем выделение нескольких гармонических составляющих в шумах. Произведено моделирование обнаружения трех гармоник с частотами 2, 6 и 7,5 кГц; амплитуды всех сигналов задаем одинаковыми, равными 0,1 В; к гармоническим составляющим добавляем белого гауссовго шума со среднеквадратичным значением 11 В. Генерируем аддитивную смесь сигнала и шума длительностью 1 с, производим 22 генерации и накапливаем результат по формуле (6).

Рисунок 6 представляет действительную часть Фурье-преобразования для аддитивной смеси шума и трех гармонических сигналов в результате 22 накоплений.

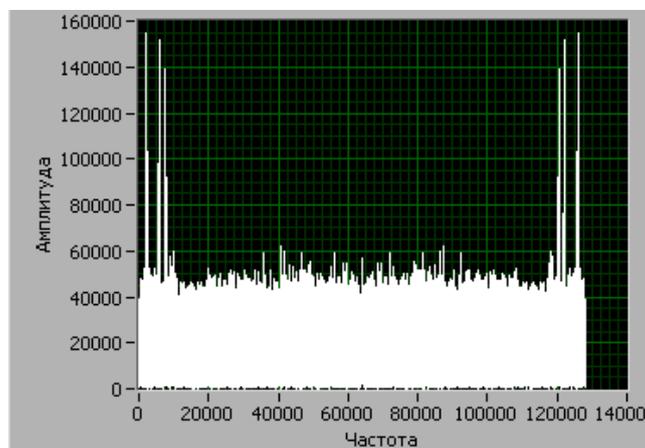


Рис. 6. Действительная часть Фурье-преобразования для аддитивной смеси шума и трех гармонических сигналов в результате 22 накоплений

Все три гармонические составляющие обнаружены на фоне шума при использовании спектрального метода с накоплением результата преобразования Фурье для соотношения сигнал/шум каждой гармоники, равного -80 дБ, что наглядно показывает отсутствие недостатка метода счета нулей, описаного в [4].

Так как периодические сигналы различной формы раскладываются в результате Фурье-преобразования в ряд гармонических составляющих, то накопление спектра может быть в равной мере использовано для обнаружения в шумах периодических сигналов сложной формы, например, таких как периодическая импульсная последовательность.

Закключение. Исследовано обнаружение слабого гармонического сигнала спектральным методом.

К преимуществам спектрального метода можно отнести:

- 1) выделение сигнала при больших отношениях сигнал/шум;
- 2) высокую точность выделения сигнала;
- 3) возможность за значительно меньший отрезок времени определить наличие сигнала в шуме;
- 4) возможность выделения нескольких гармонических сигналов из шума вне зависимости от их расположения по частоте, что позволяет выделять периодические сигналы сложной формы, а именно импульсную последовательность;
- 5) позволяет выделять сигнал во всей полосе частот, что невозможно при использовании метода счета нулей, который для выделения сигнала ограничивает полосу фильтрами;
- 6) позволяет производить накопление сигнала и улучшать отношение сигнал/шум без априорной информации о параметрах сигнала, что дает преимущества по сравнению с накоплением сигналов в устройстве с задержкой и обратной связью.

Выделение сигнала из шума спектральным методом дает возможность дальнейшей, более полной, обработки и получения дополнительной информации о характеристиках сигнала, скрытого шумами.

Спектральный метод является более предпочтительным, особенно в области защиты информации, так как во многих её задачах присутствует возможность накопления сигнала.

Автор выражает благодарность за полезные советы, ценные рекомендации и поддержку руководителю научной работы доктору технических наук, профессору Владимиру Кирилловичу Железняку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров, Ю.С. Обнаружение и измерение частоты слабого сигнала, скрытого шумами, методом счета нулей / Ю.С. Захаров, В.П. Тихомиров // Изв. вузов СССР. Радиотехника. – 1964. – Т. VII, № 5.
2. Бендат, Дж.С. Основы теории случайных шумов и ее применения / Дж.С. Бендат; пер. с англ. под ред. В.С. Пугачева. – М.: Наука. 1965. – 464 с.
3. Лезин, Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов / Ю.С. Лезин. – М.: Сов. радио, 1969. – 320 с.
4. Крюков, В.В. Анализ экспериментальных сигналов по подсчету пересечений нулевого уровня / В.В. Крюков, К.И. Шахгельдян. // Информатика и моделирование в океанологических исследованиях: сб. ст. – Владивосток: Дальнаука. ТОИ, 1999. – С. 72 – 83.
5. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд., испр.; пер. с англ. – М.: Издат. Дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

Поступила 28.05.2012

METHOD FOR DETECTION OF WEAK HARMONIC SIGNAL IN GAUSSIAN NOISE

A. BARKOV

A method for detection of weak harmonic signals in the channel of news leak is proposed. Harmonic signal has several advantages for the estimation of parameters in the channel of news leak. The aim is to find a harmonic signal in the noise of high level. Detection of a harmonic signal is provided by its modelling in an additive mixture with white Gaussian noise. The analysis and comparison of known and proposed methods are made. On the basis of the analysis of calculation of zeros method a special method for the detection of weak harmonic signals in Gaussian noise is proposed by the authors, which has broadband response and speed of operation, high sensitivity when sorting out several harmonic signals at the same time. The proposed method allows to accumulate signal for its subsequent detection without any a priori information about a period of a signal succession, which is an advantage if to compare with the methods of accumulating of a signal in devices with delay and feedback. The results for each method were compared on the basis of model experiments and analysis of the results presented in the papers observed in the article. According to the results of comparison a conclusion is made that a spectral method for extraction of weak signal from noise is preferable.