



УДК 004.067

© А. А. Акулов, А. В. Левенец, Чье Ен Ун, 2011

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ ПО ПЕРЕСЕЧЕНИЯМ НУЛЯ

Акулов А. А. – магистрант кафедры «Автоматика и системотехника», тел. 8-914-181-87-84, e-mail: 11tmk@mail.ru; Левенец А. В. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматика и системотехника», тел. 8-914-191-33-39, e-mail: levalvi@bk.ru; Чье Ен Ун – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Автоматика и системотехника», тел. 8-924-109-08-98, e-mail: chye@ais.khstu.ru (ТОГУ)

В статье рассмотрены способы повышения эффективности обнаружения скрытых периодических компонент в измерительных данных методом выделения скрытых периодичностей по пересечениям нуля. Так, при анализе данных предлагается ввести пороговую область значений, в которой данные принимаются равными нулю, что позволяет снизить влияние высокочастотных шумов на работу алгоритма. Для улучшения селективной способности метода предлагается использовать фильтр скользящего среднего. В работе приведены результаты исследования на моделях сигналов, состоящих из аддитивной смеси периодических компонент и гауссовского шума.

The paper deals with ways of increasing efficiency in detecting hidden periodic components in data by a zero-crossing method. So, it is proposed to introduce the threshold range of values in which data are considered to equal zero, making it possible to reduce influence of high frequency noise on algorithm performance. For improving the selective ability of the method utilization of a moving-average filter is proposed. The investigation results on the models of the signals that are composed from additive mixture of periodic components and Gaussian noise are given.

Ключевые слова: обнаружение сигналов, спектральный анализ, квазиспектр, число пересечений нулевого уровня.

Задача выделения скрытых периодичностей является усеченной задачей спектрального анализа, нацеленной на определение наличия в зашумленном сигнале ограниченного количества спектральных составляющих. На практике такая проблема встает при решении задач сжатия данных (например, в случае

необходимости удаления тренда), при выявлении начала резонансных явлений во время эксплуатации технических объектов, а также в радиолокации и других областях. При малом числе выявляемых периодических составляющих сигнала для решения такой задачи можно применить периодограммную оценку, однако следует учитывать существенные вычислительные затраты для ее реализации. Таким образом поиск быстрых и простых в реализации способов выявления периодичностей из исходного сигнала до сих пор остается актуальным, учитывая достаточно серьезные вычислительные ограничения даже у современной микроконтроллерной техники.

В этой связи интересным представляется метод выделения скрытых периодичностей по пересечениям нуля (ВСППН), который представляет интерес в силу низких вычислительных затрат и простоты аппаратной реализации. Данный метод базируется на связи чисел пересечения сигналом нулевого уровня (нулей сигнала) со спектральным составом сигнала. Так, Б. Кедемом в работе [1] было показано, что если в спектре сигнала присутствует доминирующая частота, то она может быть определена при помощи нулей, однако данный подход оказывается эффективным только в том случае, если в сигнале присутствует только одна периодичность, и отношение сигнал/шум велико. В том же случае, когда в сигнале присутствуют несколько периодичностей, или отношение сигнал/шум невелико, целесообразно применять фильтры, сдвигающие спектральную массу и позволяющие выделить регулярные компоненты сигнала и оценить доминирующие частоты. В работе [1] было показано, что для задачи выделения периодичностей достаточно использовать простейшие фильтры, и в качестве таковых были предложены повторно-разностные и повторно-суммирующие фильтры. Ограничением предложенного Б. Кедемом метода была необходимость в априорном знании свойств анализируемого сигнала с целью выбора оптимального порядка фильтров для корректной оценки наличия в сигнале периодичности с известной частотой.

Для решения названной проблемы в [2] было предложено свести значения нулей сигнала после применения ряда повторно-разностных (ПР) и повторно-суммирующих (ПС) фильтров в статистический ряд, который было предложено назвать «квазиспектр». Пример квазиспектра сигнала в виде аддитивной смеси двух периодичностей с отличающимися параметрами и гауссовского шума приведен на рис. 1 а. На рис. 1 б приведена также оценка спектральной плотности мощности того же сигнала, полученная при помощи быстрого преобразования Фурье.

Проведенные в [2–4] исследования показали, что квазиспектр можно применить как для грубой спектральной оценки исследуемого сигнала, так и для более узкой задачи выделения периодичностей. При этом исследования показали хорошую способность метода ВСППН обнаруживать периодичности в сигналах с низким отношением сигнал/шум, как это показано в [3]. Однако следует отметить слабую селективную способность метода ВСППН в



низкочастотной области спектра, что объясняется свойствами применяемых фильтров [2].

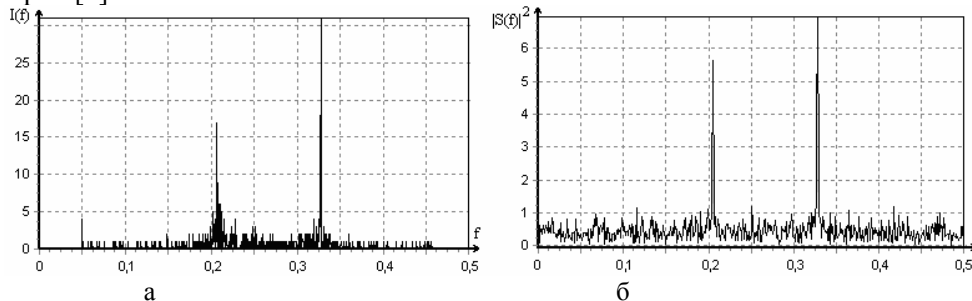


Рис. 1. Пример квазиспектра (а) и спектральной плотности мощности (б) сигнала с двумя периодичностями и аддитивным гауссовским шумом.

Для улучшения эффективности работы метода в области низких частот в данной работе предлагается использовать способ увеличения ширины зоны нуля. Применение данного способа позволяет существенно сократить количество вычислений за счет уменьшения порядка фильтров, используемых для анализа сигналов при сохранении необходимой достоверности обнаружения периодических компонент в анализируемом сигнале.

Для пояснения работы предлагаемого способа необходимо ввести следующие обозначения. Пусть $S(0), S(1), \dots, S(N-1)$ – стационарный дискретно-временной ряд с нулевым средним значением и размером выборки N , для которого можно определить двухсторонне-ограниченный двоичный ряд вида:

$$Y(n) = \begin{cases} 1, & S(n) \geq 0 \\ 0, & S(n) < 0 \end{cases}, \quad 0 \leq n \leq N-1$$

и ввести индикаторную функцию вида:

$$F_n = (Y(n) - Y(n-1))^2.$$

Очевидно, что в случае пересечения рядом $\{S(n)\}$ нулевого уровня в момент времени n индикаторная функция примет значение единицы, а в противном случае – нуля. В этом случае число пересечений нуля (число нулей) для ряда $\{S(n)\}$ определяется соотношением:

$$W = \sum_{i=1}^{N-1} F_i.$$

Предлагаемый способ увеличения ширины зоны нуля предполагает рассматривать пересечение исследуемым рядом не нулевого уровня, а некоторой области $[-\Delta; +\Delta]$, значения отсчетов анализируемой последовательности внутри которой условно принимаются равным нулю. В этом случае ограниченно-временной ряд можно представить в виде:

$$Y^*(n) = \begin{cases} 1, & S(n) \geq +\Delta \\ 0, & S(n) < -\Delta \end{cases}, \quad 0 \leq n \leq N-1.$$

Очевидно, что с точки зрения метода ВСППН такая обработка является аналогом низкочастотного фильтра, так как снижает влияние высокочастотных шумов на значение числа нулей и, следовательно, должна улучшить селективную способность метода в низкочастотной области. Однако следует отметить, что результаты такой обработки зависят как от вида входного сигнала, так и от ширины зоны нуля 2Δ .

Для исследования возможностей предлагаемого способа использовалась модель измерительного сигнала в виде аддитивной смеси двух периодичностей и реализаций белого гауссовского шума. Относительные частоты периодичностей выбирались из диапазона $0,15 \dots 0,35$, что соответствует диапазону максимальной эффективности метода ВСППН [2]. В качестве критерия наличия периодической компоненты в анализируемых данных использовалось превышение уровня значений квазиспектра в исследуемой области над остальными значениями в два и более раза. Кроме того, для оценки возможности снижения вычислительных затрат при исследованиях порядок используемых фильтров был существенно снижен. Так, если для получения квазиспектра на рис. 1 использовались ПР- и ПС-фильтры до 20 порядка включительно, то для приведенных ниже результатов применялись фильтры не выше тринадцатого порядка, что приводит к снижению требуемого числа вычислительных операций более чем в два раза.

На рис. 2 показан характерный пример анализа сигнала методом ВСППН без применения предлагаемого способа расширения зоны нуля. Оценка спектральной плотности мощности сигнала, вычисленная при помощи БПФ, приведена на рис. 1 б. Анализ приведенного графика показывает, что более низкочастотная периодическая компонента хотя и выделяется методом ВСППН, но ее квазиспектральная составляющая имеет заметно более слабую выраженность и сильно маскируется ложными квазиспектральными составляющими. Очевидно, что применение более глубокой низкочастотной фильтрации позволит решить эту проблему, но за счет более высоких требований к вычислительным ресурсам.

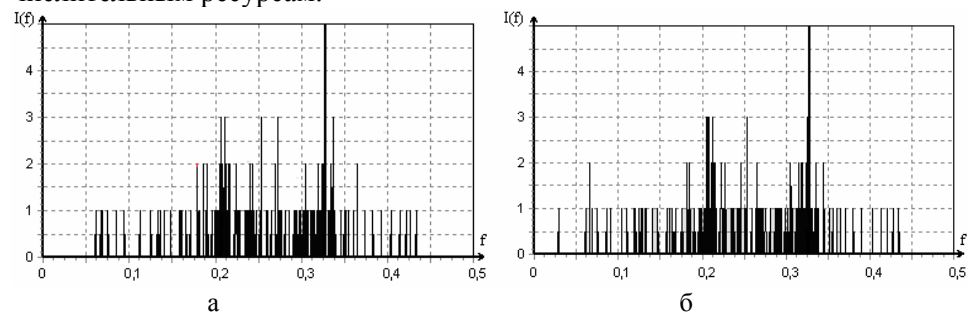


Рис. 2. Пример квазиспектра исследуемого сигнала без дополнительной обработки (а) и с использованием способа расширения зоны нуля (б)

Применение предложенного способа расширения зоны нуля приводит к некоторому улучшению ситуации. Так, на рис. 2 б показан квазиспектр того



же сигнала, что и на рис. 2 а, но после применения способа расширения зоны нуля при ширине зоны нуля, равной 60 % от максимального по модулю значения исследуемого ряда данных. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что увеличилось число ложных квазиспектральных составляющих, лежащих рядом с квазиспектральными составляющими, соответствующими частотам периодичностей исследуемого сигнала. Такое поведение квазиспектра можно использовать для повышения эффективности метода ВСППН с точки зрения задач выделения скрытых периодичностей, особенно в случае применения к полученному в результате анализа данных квазиспектру некоторой дополнительной обработки, например, фильтра скользящего среднего.

С целью определения оптимальной величины ширины зоны нуля Δ были проведены исследования на моделях сигнала с двумя периодичностями и аддитивным нормальным белым шумом. Для определения эффективности обработки использовалась следующая оценка:

$$E(f_k) = \frac{W(f_k)}{\max_{i=0, N; i \neq k} W(f_i)},$$

где: f_k – частота периодичности, для которой находится оценка; $W(f_k)$ – квазиспектральная составляющая.

При вычислении оценки для моделей сигналов с несколькими периодичностями в числитель подставлялось наименьшее значение, выбранное из квазиспектральных составляющих, полученных для частот периодичностей, а при вычислении знаменателя значения квазиспектральных составляющих, соответствующих периодичностям сигнала, исключались.

На рис. 3 приведен характерный пример полученной зависимости оценки $E(\cdot)$ от ширины зоны нуля, рассчитанной при различных значениях сигнал/шум η для сигнала с двумя периодичностями, имеющими относительные частоты 0,21 и 0,33 и одинаковые амплитуды. Здесь следует отметить, что метод ВСППН нечувствителен к фазам составляющих сигнал периодичностей [2], поэтому фазы периодичностей принимались равными нулю.

Проведенные исследования показали, что ширина зоны нуля существенно влияет на квазиспектр сигнала, причем полученные данные показывают нелинейный характер этого влияния. При малых значениях ширины зоны нуля квазиспектр практически не изменяется, а при больших значениях появляется большое количество ложных квазиспектральных составляющих, затрудняющих корректную оценку спектра сигнала. Наибольшая эффективность применяемого способа обеспечивается при ширине зоны нуля примерно 20–40 % от амплитуды периодической составляющей сигнала. Аналогичные результаты были получены при изменении разницы частот периодических составляющих в диапазоне 0,05... 0,25 с шагом 0,05.

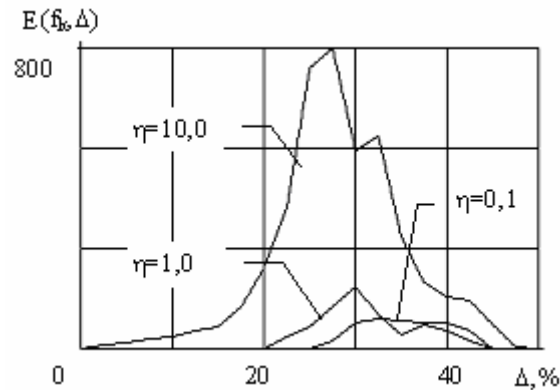


Рис. 3. Оценка эффективности способа изменения ширины зоны нуля

При работе с квазиспектром можно отметить его ярко выраженный линейчатый характер, что определяет некоторое неудобство его применения. Так, достаточно сложно отделить в полученном квазиспектре квазиспектральную составляющую, соответствующую периодичности сигнала, от ложных квазиспектральных составляющих.

В качестве одного из способов повышения селективной способности метода выделения скрытых периодичностей можно предложить сглаживание квазиспектра с помощью фильтра скользящего среднего. Эффективность предложенного способа обосновывается увеличением числа ложных квазиспектральных составляющих, лежащих рядом с квазиспектральными составляющими, которые соответствуют частотам периодичностей после применения способа расширения зоны нуля. Дополнительным достоинством способа являются низкие требования к вычислительным ресурсам, необходимым для реализации фильтра скользящего среднего. Действительно, для его реализации используется только операция суммирования, а операцию деления можно свести к операции двоичного сдвига результата суммирования, несколько суживая выбор возможных размеров окон усреднения.

При использовании фильтра скользящего среднего к основной задаче следует отнести определение оптимальной ширины окна усреднения фильтра. Здесь следует отметить, что применение слишком широкого окна фильтра скользящего среднего может привести к слиянию близкорасположенных квазиспектральных составляющих, поэтому выбор параметров фильтра скользящего среднего зависит от конкретной решаемой задачи. С другой стороны, выбор слишком малого окна фильтра скользящего среднего приводит к его низкой эффективности в силу того, что даже после изменения ширины зоны нуля в квазиспектре сигнала остается значительное количество ложных квазиспектральных составляющих, усреднение которых может привести к маскированию действительно присутствующей в исследуемых данных периодичности.



На рис. 4 приведен пример обработки квазиспектра сигнала с двумя периодичностями с относительными частотами 0,21 и 0,36, зашумленными гауссовским шумом с отношением сигнал/шум, равным двум. Для обработки использовался фильтр скользящего среднего с шириной окна 4,9 % от размера анализируемой выборки (50 выборок). Результат обработки показан на рисунке сплошной непрерывной линией.

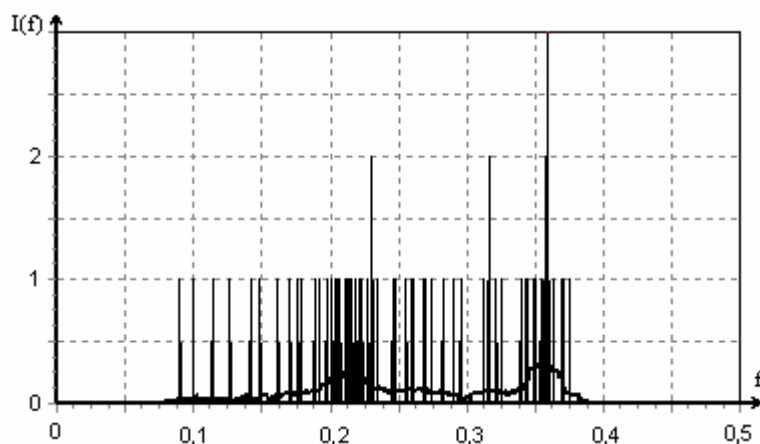


Рис. 4. Пример обработки квазиспектра фильтром скользящего среднего

Исследования проводились для различных размеров выборки обрабатываемых данных (в диапазоне 512 ... 4096 с шагом 256 отсчетов), различных отношениях сигнал/шум (диапазон значений 1,0 ... 10,0 с шагом 0,5) и на дискретном наборе возможных значений относительных частот периодичностей (0,21; 0,25; 0,28; 0,3; 0,32; 0,36). В силу сложности выбора критерия оптимальности, равноценного для различных задач, оценка эффективности обработки производилась исследователями по степени выраженности кривой результата обработки в областях частот входящих в сигнал периодичностей.

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы. Для близкорасположенных по частоте периодичностей (с диапазоном значений разности относительных частот не выше 0,05) оптимальным является применение фильтра скользящего среднего с шириной окна усреднения, равной 1–2 % от размера исследуемой выборки, а для существенно разнесенных по частоте периодичностей оптимальной величиной окна усреднения является значение 5–7 % от размера выборки. Приведенные значения являются усредненными для всего диапазона исследованных сигналов.

Следует отметить, что результат обработки зависит от свойств анализируемого сигнала, однако несущественно. Тем не менее, рекомендуемые значения ширины окна усреднения следует использовать как первичные и корректировать их по мере накопления статистической информации о свойствах обрабатываемых данных.

Таким образом, можно отметить, что применение предложенного в данной статье способа увеличения ширины зоны нуля повышает эффективность метода ВСППН как для задач спектральной оценки, так и для задач выделения скрытых периодичностей. Так, существенным ограничением метода ВСППН следует считать его низкую чувствительность на краях частотного диапазона, что в низкочастотной области улучшается предложенным способом. Кроме того, применение предложенного способа приводит к эффекту концентрации ложных квазиспектральных составляющих к квазиспектральным составляющим, соответствующим периодичностям исследуемого сигнала, что позволяет повысить вероятность их обнаружения.

Для улучшения селективирующей способности метода предложено применять к полученному квазиспектру фильтр скользящего среднего с размером окна усреднения не более 7 % от общего объема выборки. Следует также отметить, что такая операция лишь незначительно увеличит требования к вычислительным ресурсам, и может быть достаточно просто реализована на современных микроконтроллерах.

Несмотря на то, что приведенные в статье результаты были получены на моделях сигналов с дискретным спектром, результаты исследований возможностей метода ВСППН для анализа сигналов с непрерывным спектром, приведенные в [5], позволяют прогнозировать, что предложенные способы можно распространить и на реальные измерительные сигналы.

Библиографические ссылки

1. Кедем Б. Спектральный анализ и различение сигналов по пересечениям нуля // ТИИЭР. – № 11. – 1986.
2. Левенец А. В., Чернявский Е. А., Чье Ен Ун Оценка спектра сигнала методом выделения скрытых периодичностей по пересечениям нуля // Измерительная техника. – № 9. – 1996.
3. Левенец А. В. Применение метода выделения скрытых периодичностей по пересечениям нуля для обнаружения сигнала с известной частотой / А. В. Левенец // Информатика и системы управления. – № 1. – 2001.
4. Иванов В. Э., Левенец А. В. Простой способ обнаружения гармонических составляющих в шумовом сигнале // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – № 3 (14). – 2009.
5. Иванов В. Э., Левенец А. В., Чье Ен Ун Обработка данных в информационно-измерительных системах: Спектральное оценивание, сжатие, классификация. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2010.