УДК 621.317.7

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ ПО МГНОВЕННЫМ ОТСЧЕТАМ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Д.А. Бобылев
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: dabobyl@ipu.ru

Ключевые слова: многоэлементный двухполюсник, параметрическая идентификация, метод Прони, помехоустойчивость.

Аннотация: Рассматривается метод подавления периодических помех и паразитного полиномиального тренда при исследовании переходных характеристик линейных электрических двухполюсников методом Прони с целью идентификации их параметров. Метод основан на простой в реализации фильтрации сигнала посредством специальных весовых функций. Рассмотрены возможности метода и его ограничения.

1. Введение

Практическая значимость методов определения параметров объектов с многоэлементной схемой замещения посредством анализа их переходной характеристики в последнее время значительно возросла. Это связано, прежде всего, с тем, что существенно увеличились возможности применения вычислительных средств в преобразователях и измерителях параметров многоэлементных двухполюсников (ПМД). Последнее обстоятельство сделало возможным использование простых вариантов параметрического преобразования Фурье на основе алгоритма Прони [1-3].

Метод Прони в своем исходном варианте позволяет идентифицировать параметры суммы нескольких экспонент по числу мгновенных значений сигнала, взятых с равномерным шагом. Причем число отсчетов должно быть равно числу параметров.

По простоте реализации метод преобразования ПМД на основе такого алгоритма может составить конкуренцию широко распространенному частотному методу. Однако метод, перспективный в практическом плане, должен обладать определенной помехоустойчивостью, поскольку преобразователи и измерители ПМД применяются, как правило, в условиях помех и при достаточно малом уровне тестового сигнала.

Этот фактор настоятельно требует разработки простых, но эффективных методов повышения помехоустойчивости преобразования.

2. Возможности предварительной фильтрации переходной характеристики объекта исследования

На первый взгляд алгоритм Прони, позволяющий в современном его варианте вычислять параметры экспонент не только действительных, но и комплексных, причем по числу отсчетов, многократно превышающему минимально необходимое, должен позволить решить и проблему помехоустойчивости. Однако на практике дело обстоит существенно сложнее.

Прежде всего, наличие периодической помехи с широким спектром приводит к значительному усложнению модели исследуемого сигнала, а, значит, и к существенному усложнению алгоритма. Например, периодическая помеха может содержать десятки гармоник, влияние которых необходимо учитывать. С ростом порядка модели объем вычислений резко увеличивается.

К тому же, модель сигнала в алгоритме Прони – чисто экспоненциальная, что не соответствует в полной мере характеру реальных помех. Например, периодическая помеха может характеризоваться нестабильной частотой и амплитудой, что приводит к размыванию ее спектра. Кроме этого, наличие различных сложных трендов, отличных от экспоненциальных, также плохо согласуется с исходной моделью метода.

В связи с этим возникает насущная необходимость поиска простых, но эффективных решений, которые позволили бы повысить помехоустойчивость рассматриваемого метода преобразования ПМД, не приводя к серьезному усложнению его вычислительной части. Последнее означает, что решения необходимо искать вне алгоритма Прони.

При этом имеются в виду, прежде всего, помехи периодические, подобные сетевой помехе, а также полиномиальные тренды.

Обеспечить помехоустойчивость процедуры Прони, вне самой процедуры, сохранив относительную простоту алгоритма для случая 2-3 экспонент, можно посредством линейной фильтрации сигнала. Такой подход применительно к частотному методу весьма эффективен [4, 5]. Это связано со спецификой частотного метода, где и ток, протекающий через объект, и напряжение на нем подвергаются одному и тому же избирательному линейному преобразованию, которое никак не влияет на конечный результат. Там не нужно ни восстанавливать исходный сигнал, ни вносить коррективы в результат преобразования, т. е. не нужно учитывать параметры фильтра [5].

В рассматриваемом случае ситуация принципиально иная. Здесь после любого предварительного линейного преобразования сигнала необходимо внести соответствующие коррективы на той или иной стадии преобразования. Однако и здесь возможно ограниченное применение предварительной цифровой фильтрации сигнала, с использованием простых фильтров с конечной импульсной характеристикой.

Подавление помех посредством предварительной линейной фильтрации принципиально отличается от учета помех в рамках алгоритма Прони. Это отличие состоит в том, что в последнем случае для получения информации о параметрах полезных составляющих сигнала необходимо получить информацию обо всех его составляющих, включая и паразитные. При этом число паразитных составляющих может существенно превосходить число составляющих, несущих информацию о ПМД. Так, например, сетевая помеха может содержать более десятка гармоник с неизвестной фазой, присутствие которых необходимо учитывать.

Линейная фильтрация помех, напротив, не требует определения их параметров, помехи нужно лишь подавить, т.е. обеспечить минимальную чувствительность к ним в процессе преобразования. В информационном плане это существенно более простая задача. И возможность применения такого подхода во многом связана с наличием определенной априорной информация о помехах.

3. Замена мгновенных значений переходной характеристики интегрально взвешенными значениями

Рассматриваемый метод определения ПМД на основе алгоритма Прони наиболее прост и эффективен при определении параметров объектов с апериодической импульсной характеристикой с 5-6-ю элементами. В этом случае отклик объекта на прямоугольный импульс будет представлять собой две действительные экспоненты, а также полиномиальные составляющие – постоянную и линейно изменяющуюся.

Определение параметров полиномиальной части отклика не составляет особого труда [3]. Что касается определения параметров экспонент, то при наличии двух экспонент с постоянными времени τ_1, τ_2 и амплитудами V_1, V_2 они легко рассчитываются в соответствии с алгоритмом Прони по значениям четырех эквидистантных отсчетов сигнала: u_0, u_1, u_2, u_3, взятых с шагом Δt. В этом случае алгоритм выглядит просто и без матричной записи.

Если обозначить $x_1 = \exp(-\Delta t / \tau_1)$, $x_2 = \exp(-\Delta t / \tau_2)$, то постоянные времени экспонент можно вычислить, определив указанные параметры:

$$x_1 = -\frac{c_1}{2c_2} + \frac{\sqrt{c_1^2 - 4c_2c_0}}{2c_2}, x_2 = \frac{u_3 - u_2x_1}{u_2 - u_1x_1},$$

где

$$c_0 = {u_2}^2 - u_1u_3, c_1 = u_0u_3 - u_1u_2, c_2 = {u_1}^2 - u_0u_2.$$

После чего можно вычислить и амплитуды экспонент:

$$V_2 = \frac{u_1 - u_0x_1}{x_2 - x_1}; V_1 = u_0 - V_2$$

Относительно небольшой объем вычислений при малом порядке модели и простота формирования тестового сигнала делают рассматриваемый метод преобразования ПМД весьма привлекательным.

Однако при такой реализации метода, где число отсчетов равно числу определяемых параметров сигнала, т. е. отсутствует информационная избыточность, отсутствует и помехозащищенность, что резко снижает перспективы практического применения метода.

Простым, но эффективным решением проблемы представляется замена мгновенных значений, используемых в алгоритме Прони, взвешенной суммой нескольких отсчетов исходного сигнала [6]. Полученные таким образом интегральные отсчеты эквивалентны мгновенным значениям экспоненциального сигнала, пропущенного через фильтр с импульсной характеристикой, в качестве которой будет выступать весовая функция (ВФ), используемая при суммировании отсчетов. Конечно, при этом будет иметь место искажение амплитуд экспонент исследуемого сигнала, однако характер искажения будет определяться известными параметрами ВФ [6].

Так, например, элементарное преобразование, представляющее собой полуразность двух отсчетов сигнала, взятых с интервалом $t_д$, инвариантно к его синусоидальным составляющим с частотами $n /(t_д)$. Разработаны простые методы, которые позволяют на основе этого элементарного преобразования создавать преобразования более сложные, таким образом, что точки нулевой чувствительности к указанным спектральным составляющим сигнала можно трансформировать в зоны малой чувствительности определенной ширины [7].

Используя подобный метод, можно синтезировать относительно простые ВФ для замены мгновенных значений сигнала его интегрально взвешенными значениями, наделяя при этом спектральные характеристики (СХ) соответствующих ВФ (т. е. модули их преобразований Фурье) необходимыми свойствами.

Интегрально взвешенное значение $\tilde{u}_n$сигнала $u(t)$ при этом будет выглядеть так:

$$\tilde{u}_n = \sum_{k=1}^{K} g(kt_д) \cdot u(n\Delta t + kt_д).$$

Здесь n – номер интегрального отсчета, Δt – шаг, с которым берутся интегральные отсчеты, $t_д$ – шаг дискретизации (шаг решетчатой ВФ), K – число отсчетов в ВФ, k – номер значения ВФ.

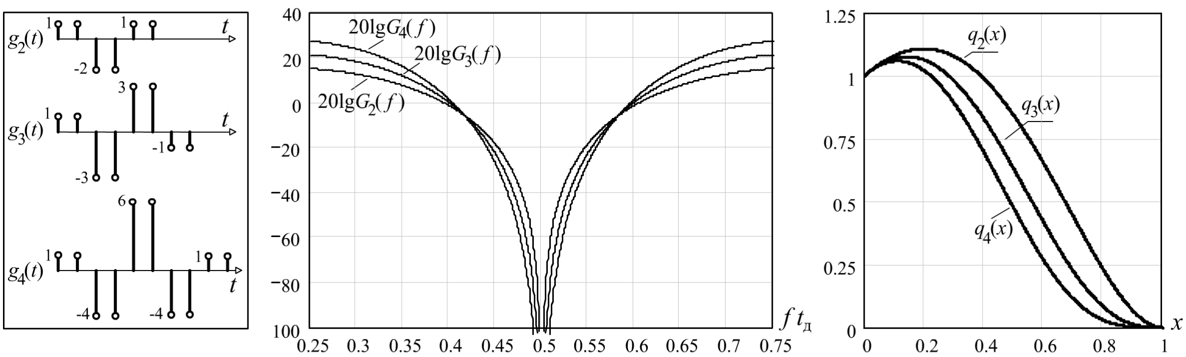
Шаг Δt определяется порядком постоянных времени экспонент исследуемого сигнала, а шаг дискретизации $t_д$ зависит от требуемой СХ весовой функции. Если $\Delta t \geq t_д$, то шаг Δt должен быть кратен шагу $t_д$, в противном случае шаг $t_д$ должен быть кратен шагу Δt [6]. Таким образом, интегральные значения всегда могут быть сформированы из общей последовательности эквидистантных отсчетов.

На рис. 1, *а* представлены некоторые простые ВФ, характеризующиеся тем, что их СХ имеют многократные нули на частотах $m/(2t_д)$, где m – целое число. Их СХ будут иметь вид:

$$G_l(f) = \left|\cos(\pi f t_д)[\sin(2\pi f t_д)]^l\right|,$$

где l – индекс соответствующей ВФ.

Спектральные характеристики ВФ $g_2(t)$, $g_3(t)$ и $g_4(t)$ имеют нули второго, третьего и четвертого порядков соответственно (рис. 1, б). Последнее также означает, что в области частот, ниже частоты $1/(4t_д)$, СХ указанных ВФ эквивалентны амплитудно-частотным характеристикам фильтра верхних частот второго, третьего и четвертого порядков соответственно.



а) б) в)

Рис. 1. Весовые функции (*а*); их спектральные характеристики (*б*); зависимости чувствительности интегрального отсчета к экспонентам от их постоянных времени (*в*).

Кроме того, эти интегральные отсчеты инвариантны к полиномам первой, второй и третьей степеней соответственно, что позволяет обеспечивать подавление различных трендов, а также определять параметры экспонент без предварительного исключения полиномиальной составляющей полезного сигнала.

4. Заключение

Все указанные достоинства применения ВФ не могли быть получены даром. Ведь рассматриваемая задача носит весьма противоречивый характер. Мгновенное значение сигнала необходимо заменить другим функционалом, интегральным, но таким, чтобы по отношению к полезным экспоненциальным сигналам, постоянные времени которых лежат в определенном диапазоне, функционал в известной степени сохранял бы свойства мгновенного значения, в то же время, обеспечивая инвариантность преобразования к периодическим паразитным составляющим сигнала.

Как следствие такого противоречивого компромисса, чувствительность интегрального отсчета к значениям экспоненциального сигнала будет существенно зависеть от постоянной времени экспоненты. Для рассматриваемых ВФ эти зависимости опосредованно, через параметр $x = \exp(-t_д / \tau)$, представлены на рис. 1, *в*. После вычисления постоянных времени и амплитуд экспонент в соответствии с процедурой Прони эти амплитуды должны быть скорректированы. Необходимо вычислить чувствительность преобразования к каждой из идентифицируемых экспонент и внести соответствующую поправку [6].

Кроме того, основная информация об экспоненте содержится в первых отсчетах ВФ, остальные, «избыточные», необходимы для обеспечения помехоустойчивости. И, как следствие этого, будет происходить определенное подчеркивание шумов, в том числе и шума квантования. Чувствительность ВФ к экспоненциальному сигналу при рациональном выборе шага дискретизации близка к единице и лежит в диапазоне 0,7-1,3, при этом влияние шума будет определяться эффективным значением ВФ. Если для обычного отсчета оно равно 1, то для ВФ $g_2(t)$, $g_3(t)$ и $g_4(t)$ эффективные значения составят примерно 3, 6 и 12 соответственно. Таким образом, применение ВФ потребует определенного запаса по разрешающей способности АЦП.

И, наконец, применение рассматриваемых ВФ, обеспечивая подавление помех, лежащих в определенных периодически расположенных зонах частотного диапазона, способно подчеркивать спектральные составляющие сигнала расположенные вне этих зон (рис. 1, *б*).

Тем не менее с учетом всех перечисленных выше факторов применение данных ВФ, позволяет разрабатывать преобразователи ПМД на основе анализа их переходной характеристики, как сравнительно простые в плане аппаратных и вычислительных затрат, так и достаточно помехоустойчивые.

Список литературы

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 265 с.
2. Кузнецов С.А., Мясникова М.Г., Панов А.П., Цыпин Б.В. Выбор методов спектрального оценивания для систем контроля динамических характеристик датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 2 (12). С. 45-51.
3. Бобылев Д.А. Определение параметров многоэлементных двухполюсников по мгновенным значениям отклика на импульсное тестовое воздействие // Датчики и системы. 2014. № 1. С. 18-24.
4. Бобылев Д.А. Широкополосный виртуальный измеритель-анализатор импеданса с малым энергопотреблением // Датчики и системы. 2023. № 2. С. 10-14.
5. Бобылев Д.А. Подход к цифровой обработке сигналов в помехоустойчивых измерителях-анализаторах импеданса // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 49-53.
6. Бобылев Д.А. Повышение помехозащищенности методов измерения параметров многоэлементных двухполюсников по мгновенным значениям переходной характеристики // Датчики и системы. 2018. № 10. С. 3-7.
7. Ашанин В.Н., Чувыкин Б.В., Шахов Э.К. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования. Пенза: ИИЦ ПГУ, 2009. 214 с.