

Алгоритм сегментирования сигнала на квази-однородные фрагменты с использованием метода треугольно-призматического разложения

А.В. Макаренко

Федеральное космическое агентство РФ
ФГУП «НИИ прецизионного приборостроения»
101000, Россия, Москва, а/я 560
E-mail: avm.science@mail.ru

В работе предложен и описан алгоритм сегментирования скалярных временных рядов заданных дискретными по времени отсчётами на квази-однородные фрагменты. Понятие однородности сигнала является более общим, нежели понятие стационарности сигнала в широком смысле. Поэтому для решения задачи сегментирования сигнала было разработано оригинальное треугольно-призматическое разложение. Это разложение, во-первых, позволяет видеть и анализировать структуру неоднородности сигнала в целом, так как оперирует всеми временными масштабами присутствующими и наблюдаемыми в сигнале. Во-вторых, вывод об однородности фрагмента сигнала делается согласованно по нескольким критериям, характеризующим различные свойства сигнала. В результате взаимоувязанное решение этих двух задач позволяет разрешать ситуации, когда на самом деле статистика сигнала не меняется, а изменяется только его динамическая структура.

The algorithm of segmentation of scalar time series into quasi-homogeneous fragments is proposed and described in present performance. The notion of homogeneity of signal is more general then notion of stationarity of signal in wide sense. Therefore for the problem solving of signal segmentation the novel triangularly prismatic decomposition has been worked up. First, this decomposition allows to see and analyze the structure of heterogeneity of signal in large as it operates by the all time scales that are present and visible in the signal. Second, the conclusion concerning homogeneity of signal is making in coordination by several criteria, which are describing the various properties of signal. In the issue the interrelated solving of these two problems allows to solve situations when the statistics of signal is constant in fact but only its dynamic structure is changing.

1.Введение. Современные информационные составляющие ряда систем начинают оперировать свойством нестационарности сигнала – как важным информационным признаком, используемым при классификации, идентификации и диагностике различных наблюдаемых объектов. Причём информативностью обладает не только сам факт изменения характеристик наблюдаемого сигнала (объекта), но и моменты времени этого изменения, а также характер изменений. В число областей науки и техники, оперирующих явно нестационарными сигналами, входят: сверхширокополосная и сверхкороткоимпульсная радиолокация [1]; гидроакустика [2]; сейсмология [3], задачи распознавания и синтеза речи [4]; автоматизированная расшифровка электроэнцефалограмм [5]; выделение переходных процессов в системах управления [6]; анализ нелинейных динамических систем [7], и т.п.

Для того, чтобы конструктивно использовать нестационарность сигнала в качестве информационного признака, необходимо решить как минимум две задачи. Во-первых, требуется определить критерий и меру стационарности фрагмента сигнала (в общем случае применяется группа критериев). Это позволит выделить некие характеристики наблюдаемого сигнала, на основе анализа которых сигнал будет сегментирован на фрагменты, отвечающие постоянным значениям этих характеристик. Во-вторых, требуется разработка собственно алгоритма сегментации. Причём весьма желательно, чтобы алгоритм был универсален и независим от критерия и меры нестационарности сигнала. Кроме того, в большинстве случаев выдвигаются жёсткие требования к автоматизации процесса сегментирования с получением строгих условий и правил сегментирования, с минимизацией ошибок возникающих под действием человеческого фактора.

Как правило, в настоящее время, в качестве критерия стационарности фрагмента сигнала используют статистические характеристики. Учитывая, что на практике, наблюдению доступна единственная реализация сигнала, оценить его статистические характеристики возможно только на выборке ограниченного числа последовательных отсчётов. При этом используется

весьма сильное предположение об эргодическом характере анализируемого сигнала [8]. В этом случае говорить о стационарности сигнала возможно только в широком смысле этого термина [9] (постоянство математического ожидания, и неизменность корреляционной функции). Такая постановка вопроса значительно сужает возможности по сегментации сигналов на *стационарные по неким критериям* фрагменты. Ведь на самом деле встречаются ситуации, когда статистика сигнала не меняется, а изменяется только его структура [7].

Применяемые в настоящее время методы сегментации весьма консервативны. Их можно разделить на две большие группы: с фиксированным окном, и адаптивные. Недостатки первой группы очевидны. При таком разбиении сигнала вполне возможно попадание «стыка» между стационарными сегментами в интервал разбиения сигнала, что приводит к ошибочному включению переходных процессов во фрагменты стационарности. Кроме того, границы между стационарными сегментами определяются таким образом с точностью не менее величины интервала разбиения сигнала, что в большинстве случаев является неприемлемой ошибкой. Вторая группа методов подразумевает последовательный перебор возможных расстановок межсегментных границ с выбором варианта, оптимального по определённому критерию. Идея метода неплоха, но в качестве критерия нарушения стационарности используется отклонение фактического значения сигнала от предсказанного. Предсказание требует модели сигнала, что само по себе подразумевает широкие априорные сведения о процессе порождающем сигнал. Подобная постановка вопроса в действительности не всегда реализуема на практике.

В данной статье предлагается подход, к сегментированию сигнала на квази-однородные фрагменты, свободный от вышеописанных недостатков.

2.Постановка задачи. Введем в рассмотрение наблюдаемый сигнал, заданный временным рядом принадлежащим одному отрезку наблюдения:

$$X[k] = \begin{bmatrix} x[k] \\ t[k] \end{bmatrix}, \quad x \in X \subset R^1, \quad t \in T \subset R^1, \quad k \in K \subset Z^1, \quad K = [0, N_k - 1]. \quad (1)$$

Причём отсчёты времени $t[k]$, в общем случае неэквидистантны: $t_{j+1} - t_j \neq t_{i+1} - t_i$, для некоторых $j \neq i, j+1, j, i+1, i \in K$.

Необходимо предложить алгоритм позволяющий разделять сигнал (1) на фрагменты обладающие свойством *постоянства неких характеристик сигнала внутри фрагмента*. Причём множество этих характеристик должно включать статистические, но не ограничиваться ими. Кроме того, алгоритм сегментации должен работать с адаптивным окном фрагментации, но при этом предъявлять низкие требования к объёму априорной информации о сигнале и процессе его порождающем.

3.Базовое множество критериев сегментации. Для того, чтобы выйти за рамки статистических критериев, заменим понятие стационарность фрагмента сигнала на понятие однородность фрагмента сигнала – интуитивно-логически, более объемлющее, нежели стационарность в широком смысле. Действительно, в толково-словообразовательном словаре русского языка [10] это понятие определяется следующим образом: *однородный* – одинаковый во всех своих частях.

Оценка любых свойств сигнала (в том числе и статистических) возможна только на некотором конечном интервале времени (в пределе $T < \infty$). Увеличить количество отсчётов, на которых производится оценка, посредством увеличения частоты оцифровки возможно только до определённой верхней границы (в пределе $N_k < \infty$) – до момента, когда соседние отсчёты не станут сильно скоррелированы, либо будет достигнут технологический предел в аналого-цифровом преобразовании. Автоматически это приводит к ненулевому интервалу дискретизации, $\min\{t_{j+1} - t_j\} > 0, j+1, j \in K$. Чтобы выделить этот аспект оценки свойств реальных временных рядов введём понятие «квази-однородный». Отметим, что именно почти однородными фрагментами в принципе только и можно оперировать на практике.

В работах [7, 11] показано, что базовой характеристикой сигнала – динамического процесса является его структура. От неё, в частности, зависит и форма сигнала, и характер взаимодействия сигнала с динамическими системами.

В работах [12, 13] сложность сигнала обоснована как важная информационная характеристика сигнала. Её активно применяют при описании и охарактеризовании сигналов на качественном уровне в различных областях человеческой деятельности, при построении феноменологических моделей явлений, и интерпретации экспериментальных данных. С ней увязывают предсказуемость и информационную ёмкость сигналов. Она входит в состав критериев классифицирующих сигналы как детерминированные, хаотические, стохастические.

Приведённые замечания позволяют предложить три базовые группы критериев, по которым возможно сегментировать сигнал на квази-однородные фрагменты.

Статистическая группа. Включает в себя два основных критерия, оценки математического ожидания и дисперсии [8, 9], вычисляемые на отрезке временного ряда $K_{m,l} = [m, m+l-1]$:

$$Mx_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} x_j, \quad Dx_{m,l} = \frac{1}{l-1} \sum_{j=m}^{m+l-1} (x_j - Mx_{m,l})^2, \quad (2)$$

где: m – смещение от начала временного ряда, $m \in [0, N_k - 1]$; l – размер отрезка временного ряда, $l \in [1, \max\{l | m\}]$, $\max\{l | m\} = N_k - m$. Дополнительно возможно использовать функции автокорреляции и спектральной плотности [8], конечно при условии применения корректных функционалов для получения управляемых, состоятельных и несмещённых точечных оценок близости («похожести») функций, адекватных целям сравнения.

Группа структуры сигнала. Содержит ряд параметров характеризующих структуру сигнала [11]. В том числе симметрию и интенсивность крутизны и кривизны траектории сигнала:

$$As_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} \alpha_j^T, \quad Ab_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} |\alpha_j^T|, \quad \Phi s_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} \varphi_{0j}^T, \quad \Phi b_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} |\varphi_{0j}^T| \quad (3)$$

А также симметрию и интенсивность мультипликатора динамической структуры $\beta_{2j}^T = \alpha_j^T \varphi_{0j}^T$:

$$Bs_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} \beta_{2j}^T, \quad Bb_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} |\beta_{2j}^T|. \quad (4)$$

Методы расчёта угловых функций α_j^T и φ_{0j}^T для сигнала вида (1) приведены в работе [14].

Группа сложности сигнала. Включает в себя величины наблюдаемой сложности (вычисленной на всём интервале наблюдения $K_{m,l}$) статической и динамической компонент структуры сигнала [14]. Причём применяется укороченная мера [14]:

$$C\alpha_{m,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=m}^{m+l-1} Sst_{m,j} |\alpha_j^T|, \quad C\varphi_{m,l} = \sum_{j=m}^{m+l-1} Sdn_{m,j} |\varphi_{0j}^T|. \quad (5)$$

Индикаторные функции $Sst_{m,j}$ и $Sdn_{m,j}$ имеют следующий вид:

$$Sst_{m,j} = \begin{cases} j = m & 1 \\ j > m & \Phi \left(\prod_{i=m}^{j-1} [|x_j - x_i| + |\alpha_j^T - \alpha_i^T|] \right), \end{cases} \quad (6a)$$

$$Sdn_{m,j} = \begin{cases} j = m & 1 \\ j > m & \Phi \left(\prod_{i=m}^{j-1} [|\alpha_j^T - \alpha_i^T| + |\varphi_{0j}^T - \varphi_{0i}^T|] \right). \end{cases} \quad (6б)$$

Необходимо отметить, что минимальные значения параметра l и граничные значения m – для каждого из критериев, в общем случае, задаются индивидуально. Кроме того, от l зависит состоятельность (S_l) и несмещённость (V_l) оценок получаемых по формулам (2)-(5).

4. Суть треугольно-призматического разложения. Как видно из названия, треугольно-призматическое разложение состоит из двух частей, причём взаимоувязанных.

Треугольное разложение – его назначение в создании скалярного поля F двух переменных (m, l) . Поле F вычисляется по какому либо из выше приведённых критериев (2)-(5) на участке временного ряда $K_{m,l}$. Суть этого разложения иллюстрирует рисунок 1а.

Точка $F_{m,l}$, с $m = 0$, $l = N_k$ – определяет оценку параметра, по какому либо из критериев, в среднем по всей реализации временного ряда. При сегментировании временного ряда на квази-однородные фрагменты, точка $F_{m,l}$, с $m = 0$, $l = 1$ – является стартовой, а с $m = N_k - 1$, $l = 1$ – финальной. Возможны следующие основные режимы движения по «треугольнику»:

- в режиме неперекрывающихся окон постоянного размера;
- в режиме скользящего окна постоянного размера;
- в режиме неперекрывающихся окон переменного размера.

Достоинство треугольного разложения в том, что оно позволяет видеть и анализировать структуру неоднородности сигнала (по определённому критерию) в целом, так как оперирует всеми временными масштабами присутствующими и наблюдаемыми в сигнале.

Призматическое разложение – его назначение в создании согласованной группы скалярных полей $F^{(n)}$, где n – номер критерия в группе, $n \in [0, N_n - 1]$. Группа формируется из критериев (2)-(5). Суть этого разложения иллюстрирует рисунок 1б.

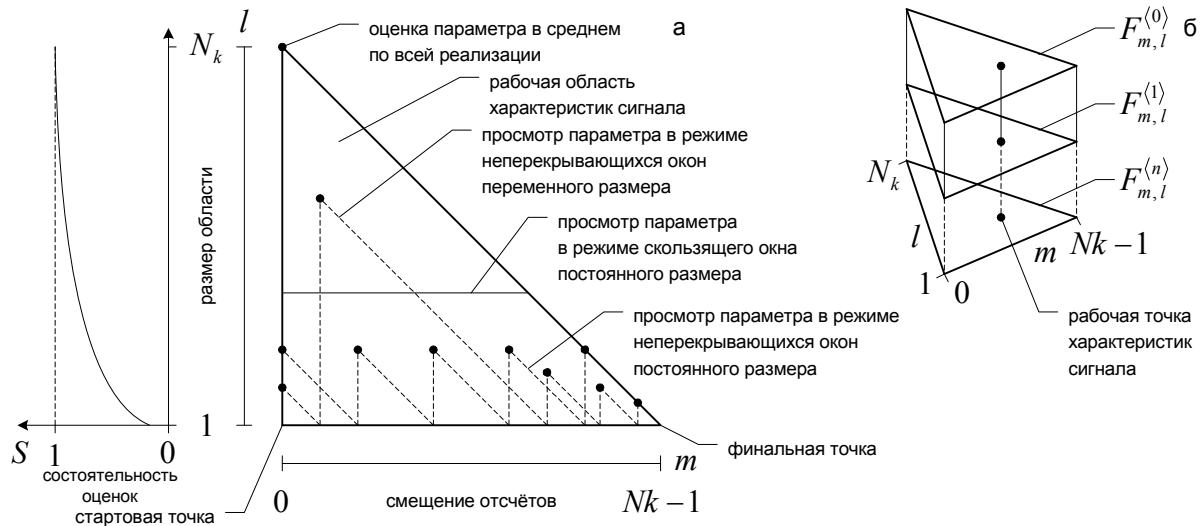


Рис. 1. Диаграмма разложения сигнала: треугольное (а); призматическое (б)

Таким образом, использование призматического разложения в комбинации с треугольным, позволяет проводить сегментирование временного ряда на квази-однородные фрагменты согласованно по нескольким критериям. При этом вывод о структуре неоднородности сигнала делается с учётом различных свойств сигнала (статистических, структурных, сложностных).

5. Основные требования к алгоритму сегментации. Для того, чтобы разбить временной ряд на квази-однородные фрагменты, необходимо по его длине расставить границы сегментов, посредством формирования ряда g_r , где: r – номер границы, $r \in [0, N_r - 1]$, $\max\{N_r\} = N_k - 1$; g_r – местоположение r -й границы – номер отсчёта временного ряда x , $0 \leq g_r < N_k - 1$. В действительности граница ставится между отсчётами ряда x , справа от отсчёта с номером g_r . Входными данными для алгоритма являются: $F_{m,l}^{(n)}$, $S_l^{(n)}$, $V_l^{(n)}$.

Для получения корректной последовательности g_r , алгоритм в своей работе должен опираться на ряд параметров: I_n – информативность (вес) n -го критерия; $P|F$ и $P|T$ – вероятности соответственно «установки ложной границы» и «пропуска истинной границы» сегментов. Кроме того задаётся верхнетреугольная квадратная матрица R – логика отношения

между критериями, $\dim\{R\} = N_n \times N_n$. Допустимы следующие значения элементов $R_{i,j}$, $i, j \in [0, N_n - 1]$, определяющих логические отношения между i -м и j -м критериями: -1 – «НЕ»; 0 – «ЭКВИВАЛЕНТНО»; 1 – «И»; 2 – «ИЛИ». Диагональные элементы $R_{i=j} = 0$.

После отработки алгоритма на выходе должны генерироваться два временных ряда:

g_r – местоположение r -й границы между сегментами;

σ_r – длительность доверительного интервала местоположения r -й границы.

6. Выводы. В работе предложена и описана методология сегментирования скалярных временных рядов заданных дискретными по времени отсчётами на квази-однородные фрагменты. Как показано во введении и в разделе 3, понятие однородность сигнала является более общим, нежели понятие стационарность сигнала в широком смысле, ибо включает в себя помимо статистических характеристик, также структурные и сложностные. Для повышения качества сегментирования сигнала, решение о выборе варианта расстановки межсегментных границ, зачастую необходимо принимать с учётом изменения различных его характеристик. Поэтому для решения задачи сегментирования сигнала было разработано оригинальное треугольно-призматическое разложение. Это разложение, во-первых, позволяет видеть и анализировать структуру неоднородности сигнала в целом, так как оперирует всеми временными масштабами присутствующими и наблюдаемыми в сигнале. Во-вторых, вывод об однородности фрагмента сигнала делается согласованно по нескольким критериям, характеризующим различные свойства сигнала. В результате взаимоувязанное решение этих двух задач позволяет разрешать ситуации, когда на самом деле статистика сигнала не меняется, а изменяется только его динамическая структура.

Для решения собственно задачи разбиения сигнала на квази-однородные фрагменты, выписаны основные требования к алгоритму расстановки межсегментных границ. Он должен опираться на треугольно-призматическое разложение сигнала, оперировать уровнями состоятельности и несмещённости оценок характеризующих свойства сигнала, учитывать различную информативность отдельных критериев и логику их отношений. Формируемая алгоритмом последовательность межсегментных границ должна строиться при заданных вероятностях «установки ложной границы» и «пропуска истинной границы». А также, должны оцениваться доверительные интервалы для оценок моментов наступления границы фрагментов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Астанин Л.Ю., Костылёв А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. – М.: Радио и связь, 1989. – 192 с.
- [2]. Петровский В.С. Нестационарные задачи гидроакустики. – М. 1988.
- [3]. Пономарев А.В., Соболев Г.А., Гитис В.Г. и др. Комплексный анализ геофизических полей для обнаружения пространственно-временных предвестников землетрясений. // Вестник ОГГГН РАН. 1999. № 4 (10).
- [4]. Маркел Дж.Д., Грей А.Х. Линейное предсказание речи. Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Прохорова, В.С. Звездина. – М.: Связь, 1980. – 308 с.
- [5]. Каплан А.Я. Проблема сегментного описания электроэнцефалограмм человека. // Физиология человека. 1999. Т. 25, № 1, С. 125-133.
- [6]. Справочник по теории автоматического управления. Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. Ред. Физ.-мат. Лит., 1987. – 712 с.
- [7]. Безручко Б.П., Смирнов Д.А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. 320 с.
- [8]. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с., ил.
- [9]. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.
- [10]. Ефремова Т.Ф. Новый словарь русского языка. Толково-словообразовательный. – М.: «Русский язык», 2000.
- [11]. Макаренко А.В. Выражение структуры динамического процесса во временной области в терминах дифференциальной геометрии. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. № 4.
- [12]. Кравцов Ю.А. Случайность, детерминированность, предсказуемость. // УФН. 1989. Т.158, №1. С.93-122.
- [13]. Badii R., Politi A. Complexity: Hierarchical Structures and Scaling in Physics. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [14]. Макаренко А.В. Метод расчёта сложности скалярного сигнала заданного дискретным временным рядом. // IX Международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение». / Сборник докладов. – Москва, РНТОРЭС, 2007.