

Стохастический хаос: проблемы моделирования

А. А. Мусаев, М. А. Колосов

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), факультет информационных технологий и управления

E-mail: Maxim-saint@mail.ru

Аннотация

Рассмотрена задача формирования системной составляющей наблюдаемого случайного процесса, отражающего значимые изменения состояния динамической системы. Показано, что критерии качества формирования системной составляющей должны определяться требованиями иерархически вышестоящей метасистемы. При этом возникает новая постановка задачи оценивания, приводящая к необходимости построения вычислительных схем, существенно отличающихся от известных алгоритмов статистической фильтрации.

Введение

Общая проблема управления состоянием объекта, взаимодействующего с нестабильной средой погружения, состоит в необходимости моделирования динамики его эволюции, описываемой моделью динамического хаоса, в сочетании с наличием случайной составляющей наблюдений, обусловленной большим числом неконтролируемых факторов влияния. Суммарный эффект динамической неустойчивости и стохастических воздействий приводит к концепции стохастического хаоса, описанного, например, в [1-5].

В этих условиях традиционные подходы к моделированию и идентификации случайных процессов оказываются несостоятельными, т.к. нарушается принцип повторяемости опыта, лежащий в основе всей вероятностно-статистической парадигмы. Это означает, что за метрически схожими ситуациями могут следовать совершенно разные последствия. По существу, все условия, необходимые для выполнения эффективности формируемых оценок оказываются невыполненными. В частности, наблюдаемые процессы не обладают ни независимостью, ни стационарностью, ни нормальностью. Более того, любые предположения о распределении погрешностей наблюдений являются некорректными в силу нестационарности наблюдаемых процессов.

Отсюда возникает иной подход к самому процессу построения моделей. Задача должна решаться на скользящем временном интервале, причем качество модели следует оценивать не по степени ее адекватности реальному процессу, а по ее эффективности (полезности) с точки зрения решения терминальной задачи управления. Иными словами, качество формируемой модели должно определяться результативно-

стью процесса управления, в интересах которого эта модель формируется.

В общем случае модель наблюдений, следуя декомпозиции Вольда [6], можно разделить на две компоненты: системная составляющая, отражающая закономерные изменения контролируемого процесса, и шумовая составляющая, формируемая под влиянием множества неконтролируемых факторов и не содержащая полезной информации. Разделение этих составляющих, в соответствии с приведенным определением, представляет собой крайне сложную, часто не решаемую задачу и выходит за пределы традиционной теории фильтрации. Некоторые полезные варианты вычислительных схем для выделения системной компоненты приведены в [7].

Что понимается под термином системная составляющая наблюдаемого процесса? В качестве первого приближения будем использовать вышеприведенное определение, т.е. под системной составляющей понимать некоторую оценку истинной траектории (сглаженную кривую), отражающую значимые изменения состояния и свойств исследуемой динамической системы.

Достоинством данного определения является содержащаяся в нем предпосылка для перехода к формализованной постановке на основе общей концепции пространства состояний. Недостаток то же достаточно очевиден, термин «значимые изменения» является не определенным без дополнительных уточнений, вытекающих из содержательной постановки конкретной задачи. По-видимому, любое определение, связанное с реальными прикладными задачами, потребует, в той или иной форме, «внешнего дополнения», что вполне согласуется с логическим постулатом, заложенным в теореме Геделя о неполноте [8]. В этом случае сама постановка задачи определения системной компоненты те-

ряет универсальность и оказывается обусловленной требованиями метасистемы, задающей критерии качества ее восстановления из наблюдаемого процесса. Последнее утверждение полностью согласуется с базовым положением системного анализа, согласно которому цель и качество функционирования любой системы определяется исходя из требований, предъявляемых к ней со стороны иерархически вышестоящей метасистемы, в которую она погружена и с которой она взаимодействует [9].

Приведенные рассуждения, несмотря на их кажущуюся очевидность, могут привести к существенным изменениям в отношении некоторых базовых понятий и даже к самому подходу решения задач моделирования систем управления. В частности, категория «адекватности» восстановленной системной составляющей и истинной траектории движения (изменения состояния) системы в фазовом пространстве, основанная на метриках близости, может оказаться просто ненужной в силу того, что алгоритмика метасистемы не нуждается в этом подобии. Дополнительную неопределенность создает само понятие «истинной траектории», относительно которого формируется оценка траектории движения (системная компонента).

В некоторых задачах это понятие допускает неоднозначную формализацию. Соответствующие примеры будут рассмотрены в настоящей работе.

Формализация задачи моделирования хаотических процессов

Наиболее распространенной формализацией стохастических рядов наблюдений, как уже указывалось, является декомпозиция Вольда в форме аддитивной двухпараметрической модели наблюдений

$$y_k = x_k + v_k, \quad k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

в которой системная компонента наблюдений x_k , $k=1, \dots, n$ представляет собой неизвестный детерминированный процесс, а v_k , $k=1, \dots, n$ — шумовую составляющую, образованную стационарным белым шумом.

При этом под системной компонентой понимается сглаженный процесс, используемый в задачах прогнозирования и формирования управляющих решений.

Перечисленные традиционные модели теоретически позволяли построить варианты проактивных (т.е. прогностических) управляющих стратегий, основанных на анализе трендов [10], каждая из которых оказывается эффективной лишь в узком диапазоне возможных динамических вариаций наблюдаемого процесса. Однако в ситуациях,

связанных с взаимодействием объекта управления с нестабильной средой погружения, предложенные выше схемы моделирования и интерпретации структуры исходных данных оказываются несостоятельными.

Поясним это утверждение. На рис. 1 представлен график хаотического изменения параметра состояния объекта управления (голубая линия) в течение 50 дней наблюдения с дискретом времени между отсчетами, равным 1-й минуте.

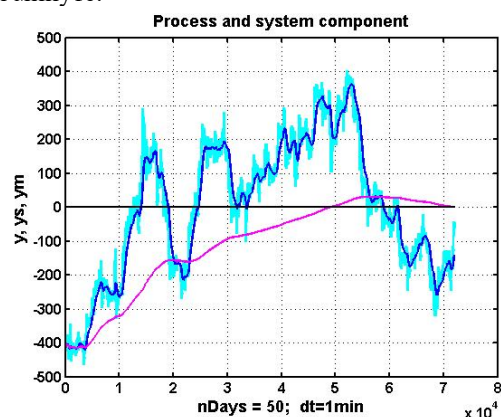


Рисунок 1 - График наблюдаемого процесса y (голубая линия), и графики, полученные в процессе его последовательного усреднения (малиновая линия) и экспоненциального сглаживания (синяя линия).

Последовательная оценка среднего наблюдаемого процесса $y_m = \bar{y}$,

$$\bar{y}_k = \frac{1}{k} y_k + \frac{k-1}{k} \bar{y}_{k-1}, \quad k=2, \dots, n,$$

представлена в виде малиновой линии и, в силу ее высокой инерционности, не может выполнять роль системной компоненты при формировании управляющих решений. В связи с этим для построения системной составляющей используются более динамичные алгоритмы последовательной фильтрации. В данном случае системная компонента (синяя линия) была сформирована с помощью экспоненциального фильтра:

$$x_k = \alpha y_k + \beta x_{k-1} = x_{k-1} + \alpha(y_k - x_{k-1}), \quad k=2, \dots, n, \quad (2)$$

где $\alpha \in [0, 1]$, $\beta = 1 - \alpha$. В примере на рис. 1 $\alpha \in 0.002$.

Уменьшение значения коэффициента передачи экспоненциального фильтра улучшает качество фильтрации, но одновременно увеличивает смещение оценки, имеющей на графике вид временной задержки.

График шумовой компоненты v_k , $k=1, \dots, n$, образованной разностью между

исходным рядом наблюдений и системной составляющей, представлен на рис. 2.

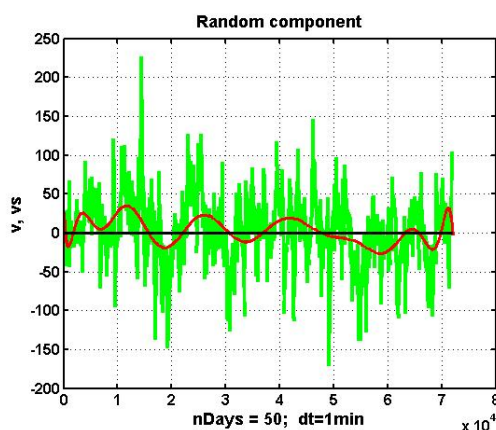


Рисунок 2 - График шумовой компоненты и ее аппроксимации степенным полиномом 15-го порядка

На этом же графике приведена полиномиальная аппроксимация шумовой компоненты

$$x_k = \sum_{i=1}^m a_i t_k^i, \quad k=1, \dots, n,$$

с оценкой параметров a_i , $i=1, \dots, m$ на основе метода наименьших квадратов (МНК). Нетрудно видеть, что аппроксимирующая кривая представляет собой, как и системная компонента, колебательный непериодический процесс. Наличие низкочастотной составляющей шумовой компоненты указывает на некорректность предположения о ее независимости и стационарности.

Разумеется, увеличивая коэффициент передачи α экспоненциального фильтра (2) можно «перевести» низкочастотную компоненту в системную составляющую x_k , $k=1, \dots, n$. Однако в этом случае зашумленная системная составляющая, в силу ее высокой стохастической variability, оказывается малоприспособленной для формирования управляющих решений.

Таким образом, реальные процессы, используемые в задачах управления в нестабильных средах погружения, могут иметь сложную статистическую структуру и существенно отличаются от традиционной формы представления рядов наблюдения (1). Наиболее значимыми отличиями являются:

- системная компонента рядов наблюдений x_k , $k=1, \dots, n$ представляет собой колебательный, но непериодический процесс с множеством локальных трендов. Данные особенности указывают на возможность описания рядов наблюдений моделями динамического хаоса;

- шумовая компонента v_k , $k=1, \dots, n$ представляет собой нестационарный случайный процесс, приближенно описываемый гауссовской моделью с изменяющимися параметрами. В частности, вариации шумовой компоненты содержат локальные тренды, их корреляционные характеристики существенно изменяются во времени.

Таким образом, реальные данные имеют достаточно сложную структуру, относящуюся как к динамическим особенностям наблюдаемых процессов, так и к статистической природе исходных данных. Отклонения структуры рядов наблюдений от априорных моделей может легко привести к существенным погрешностям в прогнозе развития ситуации и резком снижении эффективности формируемых управляющих решений. Отсюда непосредственно вытекает необходимость осуществлять в процессе машинного обучения этап предварительного анализа данных, включающий в себя оперативную идентификацию текущих характеристик поступающих в обработку данных на скользком окне наблюдения ограниченного объема. При этом указанный анализ целесообразно осуществлять на фоне результатов фундаментального апостериорного исследования свойств данных, полученных в процессе мониторинга состояния объектов управления на больших интервалах наблюдения.

В частности, при анализе таких процессов последовательно проверяются гипотезы нелинейности, нестационарности, гауссовости и т. п. В качестве заключительного этапа проверяется гипотеза о возможности описания ряда наблюдений в классе моделей динамического хаоса или стохастического хаоса. Последняя задача является особенно сложной и неоднозначной.

Системная составляющая безынерционных процессов

Наибольшие сложности для решения задачи прогнозирования и проактивного управления создают информационные процессы, не связанные с инерционностью, характерной для материальных и энергетических процессов. В частности, к ним относятся процессы изменения котировок финансовых инструментов на фондовых и валютных рынках. Генезис этих процессов образован ментальными представлениями торгово-экономического сообщества о текущих состояниях этих инструментов и их изменениях под влиянием среды погружения, формирующей совокупность множества разнообразных финансовых, экономических, политических, социаль-

ных и других факторов. При этом представления социума о таком нематериальном параметре, как стоимость финансового инструмента, может меняться практически мгновенно и совершенно непредсказуемым образом. В этих условиях формализовано разделить системную и случайную (шумовую) компоненту оказывается крайне сложно, т.к. в состав регулярной составляющей входит колебательный непериодический процесс, не допускающий эффективной аппроксимации детерминированным процессом.

В современной литературе нелинейные динамические системы, допускающие возможность параметрической неустойчивости, относят к категории детерминированного хаоса. Наиболее явной характеристикой таких систем является наличие точек бифуркации и участков с колебательными непериодическими процессами. В данном случае неопределенность, обусловленная непериодическими колебаниями, усилена чисто случайной компонентой, и соответствующие ей процессы следует отнести к категории стохастического хаоса. Традиционные методы вероятностно-статистического анализа, как уже отмечалось, не способны осуществлять эффективное оценивание таких сугубо нестационарных процессов. В результате этого многочисленные попытки получения дееспособных управлений торговыми операциями в техническом анализе на основе традиционных математических технологий не привели к успешным решениям.

В качестве модели описанных выше безынерционных процессов, описывающих, в частности, динамику котировок на биржевых площадках, удобно использовать трехкомпонентную аддитивную модель вида [5, 10]

$$y_k = x_k + v_k + \xi_k, \quad (3)$$

где x_k представляет собой системную составляющую, на основе которой формируются торговые решения, и образованную сложным нелинейным процессом с явно выраженными трендами и колебаниями;

v_k - квазишумовая помеховая компонента, образованная несмещенным колебательным непериодическим процессом;

ξ_k - стационарный случайный процесс с распределением, которое во многих случаях можно отнести к классу засоренных нормальных распределений.

Рассмотрим отдельно составляющие предложенной трехкомпонентной модели (3). Основной вопрос состоит в том, что следует понимать под системной компонентой x_k . Прежде всего, попытаемся сформировать представление об «идеальной системной составляющей» с точки зрения конечного пользователя. Оче-

видно, что такая модель должна содержать характеристические легко обнаруживаемые изменения в динамике в моменты времени, отвечающие успешным решениям, и не содержать подобным им ложных изменений в другое время наблюдения. Данная постановка должна включать в себя формализованное и параметризованное определение «успешного» решения. Иными словами, понятие идеальной системной компонент существенно зависит от параметров выбранной управляющей стратегии. Разумеется, эффективность управляющей стратегии игры может меняться в зависимости от динамических характеристик наблюдаемых процессов. Это означает, что будут изменяться и представления о системной компоненте, используемой для формирования соответствующих решений.

Следствием из приведенных рассуждений является утверждение о том, что системная компонента, выделяемая из наблюдаемого процесса, не обязана отвечать условию адекватности наблюдаемому процессу в традиционном смысле этого слова, то есть минимизировать значения какой-то априори выбранной метрики или представлять собой условное среднее. Основное требование к оценке системной компоненты является ее пригодность к обеспечению конечного результата. Такой результат получается опосредовано, через систему принятия управляющих решений, и, следовательно, требованию, выдвигаемые к виду и качеству восстановления системной компоненты, будут определяться выбранной управляющей стратегией.

При всей очевидности приведенных рассуждений, полученный вывод приводит к радикально новому представлению как о технологических статистического оценивания, так и о математическом моделировании динамических стохастических систем в целом.

Центральным утверждением представленного подхода состоит в том, что математическое моделирование в целом, и требования к формированию системной компоненты наблюдаемого случайного процесса, в частности, должно определяться исходя из терминальных критериев управления и отвечающих им стратегиям реализации управляющих решений.

Для пояснения данного утверждения ниже будут рассмотрены иллюстрирующие примеры.

Примеры

В качестве наглядного примера, иллюстрирующего приведенную концепцию терминального моделирования, рассмотрим задачу выявления системной составляющей ряда наблюдений, полученных за изменением коти-

ровок индекса DJ в течение двух случайно выбранных однодневных торговых сессий. Соответствующие график динамики котировок представлен на рис.3 и 4 и имеют вид хаотически изменяющегося колебательного нестационарного процесса с участками аperiodической динамики.

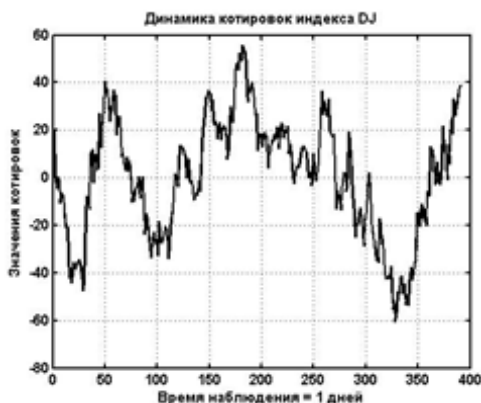


Рисунок 3 - Пример 1 изменения котировок индекса DJ

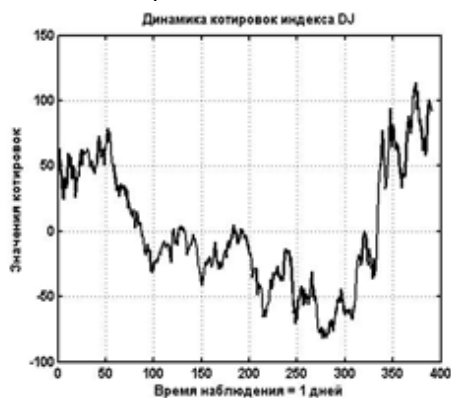


Рисунок 4 - Пример 2 изменения котировок индекса DJ

В качестве базовой торговой стратегии S_0 используем «классическую» схему формирования торговых решений, принятую в техническом анализе: позиция открывается при переломе системной составляющей в сторону второй ветви перелома. Предположим, что уровень пунктов. Исходя из выбранной стратегии управления и значения параметра, сформируем апостериорно, «вручную», идеальную системную модель системной компоненты, позволяющую получить максимальный выигрыш. В дальнейшем такую модель будем называть опорной.

Первоначально рассмотрим схему формирования опорной модели в виде скорректированной линии апостериорного условного среднего. Данная работа осуществляется в два этапа. На первом этапе формируется традиционная апостериорная модель на основе одного из известных алгоритмов статистического сглаживания. В частности, в качестве опорной траектории можно использовать полином заданного

порядка с подгонкой параметров по МНК. На втором этапе осуществляется вывод массива данных, отвечающих полученной на первом этапе кривой, и их ручная коррекция, основанная на визуальном сравнении графика полученной опорной кривой и ее виртуальной идеальной формой.

Идеальная форма опорной траектории предполагает выполнение двух, достаточно противоречивых условий:

1. идеальная траектория имеет явно выраженные идентификаторы правильных открытий. В роли таких идентификаторов могут выступать переломы системной (сглаженной) траектории в моменты времени $TT_o = (t_1^*, t_2^*, \dots, t_m^*)$, после которых кривая котировок условно монотонно возрастает или убывает до уровня ТР. При этом под условной монотонностью понимается возможность временного и многократного изменения направления динамики котировки рабочего инструмента на противоположный, однако величина просадки не должна превышать априори выбранный уровень SL. Иными словами, условная монотонность в этом случае обеспечивает достижения уровня ТР раньше, чем уровня SL.

2. идеальная траектория не должна провоцировать «ложных тревог», в роли которых выступают локальные переломы, в результате которых реальная кривая, не достигнув уровня ТР, изменит свое направление и сохранит условную монотонность вплоть до достижения уровня SL. В этом случае понятие условной монотонности охватывает динамику с возможными многократными переломами, однако в результате уровень SL будет достигнут раньше, чем уровень ТР.

Рассмотрим реализацию первого этапа формирования опорных траекторий для выбранных выше примеров изменения котировок индекса DJ (рис. 3-4). На рис. 5-6 приведены графики апостериорной подгонки по МНК соответствующих зашумленных кривых.

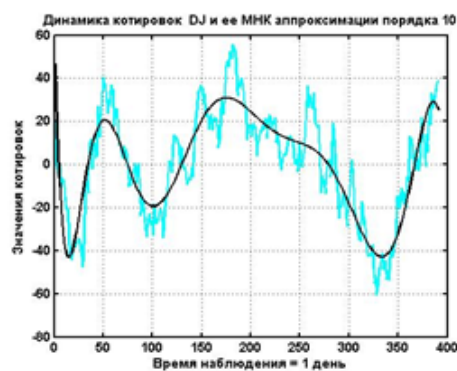


Рисунок 5 - График опорной траектории для примера 1 (подгонка полиномом 10 степени)

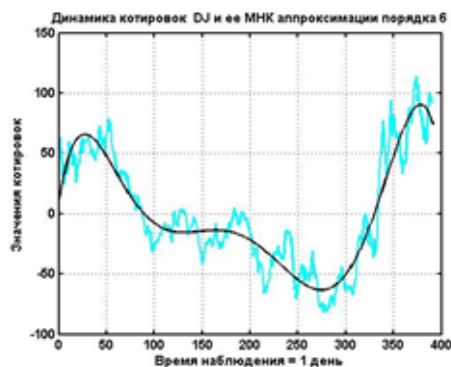


Рисунок 6 - График опорной траектории для примера 2 (подгонка полиномом 6 степени)

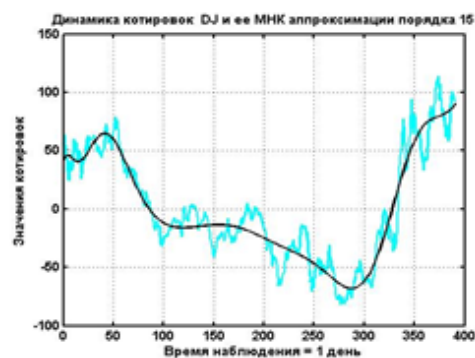


Рисунок 8 - График опорной траектории для примера 2 (подгонка полиномом 8 степени)

В первом случае наилучшую, в смысле соответствия указанным выше требованиям, аппроксимацию обеспечивала подгонка полиномом 10 степени, во втором – 6 степени.

При этом в обоих случаях при решении системы нормальных уравнений использовалось псевдообращение, т.к. применение аппроксимирующих полиномов степени 4 и выше приводило к вырожденности матрицы наблюдений.

Из приведенных графиков видно, что их применение в системе поддержки принятия решений (СППР) обеспечивает в первом случае 4 успешных открытия, а во втором 2 при полном отсутствии «ложных тревог» и отвечающих им проигрышных открытий позиций.

Повышение порядка аппроксимации приводит к росту числа выигрышных открытий, но одновременно повышает вероятность ошибок второго рода, «ложных тревог», и соответствующему увеличению числа проигрышей. Соответствующие примеры приведены на рис. 7-8.

Заметим, что представленные аппроксимации достаточно близки к оптимальным для выбранных параметров торговой стратегии S_0 . Таким образом, удачный выбор порядка модели позволил построить опорную кривую уже на первом этапе, без дополнительной ручной коррекции.

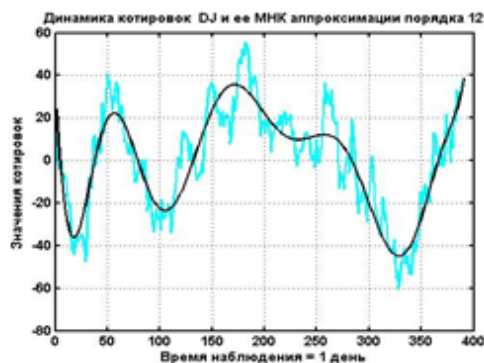


Рисунок 7 - График опорной траектории для примера 1 (подгонка полиномом 12 степени)

Увеличение порядка аппроксимирующего полинома позволило бы обнаружить менее значительные перегибы, но в то же время, как уже отмечалось, неизбежно возросло бы и число ложных тревог. В этом случае для формирования идеальной опорной траектории необходим переход к другим методам восстановления системной составляющей, не требующим существенного роста порядка аппроксимирующей модели.

Дальнейшее развитие приведенного подхода к формированию опорных траекторий еще дальше уводит от традиционных статистических схем выделения системной составляющей из его смеси с шумами.

В отличие от задач наблюдений за материальными объектами, в которых изменение состояния образует системную составляющую, а чисто случайная или «цветная» (то есть содержащая значимую автокорреляционную составляющую) помеховая компонента, образованная погрешностями системы наблюдения, в задачах моделирования экономических процессов истинная динамика определяется самими наблюдениями. Отсюда непосредственно вытекает, что опорная траектория, используемая при формировании управляющих решений, носит чисто виртуальный характер и не обязана отражать системную динамику наблюдаемых процессов в традиционном смысле этого слова. Она может явно расходиться с наблюдаемым процессом, как это видно на примерах на рис. 9-10, ее главная цель – отражать идентификационные характеристики, используемые в процессе выработки торговых решений. Кусочно-линейные опорные траектории на рис. 9-10 позволяют получить явный выигрыш, в первом случае, в 150 пунктов, а во втором – в 300 пунктов.

Заметим, что полученные результаты являются апостериорными и, следовательно, непригодными для реализации в процессе реальной работы на торговых площадках.

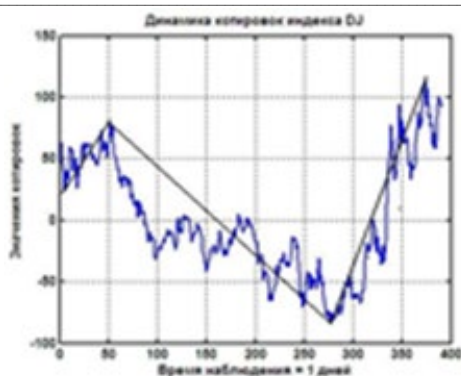


Рисунок 9 - Пример 1 кусочно-линейной опорной траектории изменения котировок индекса DJ

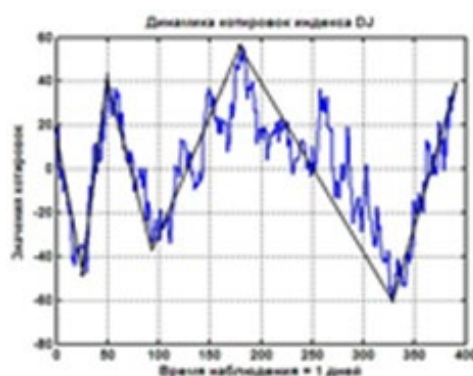


Рисунок 10 - Пример 2 кусочно-линейной опорной траектории изменения котировок индекса DJ

Однако они позволяют расширить представления о возможных вариантах опорных траекторий без жесткой привязки к частным особенностям наблюдаемого процесса. Кроме того, представленные исследования позволяют построить платформу для сравнительного анализа управляющих стратегий и последовательной оптимизации структуры системной составляющей модели наблюдения.

Выводы

Основной вывод, вытекающий из приведенных исследований, состоит в том, что применение терминального подхода к задаче формирования системных составляющих наблюдаемого процесса качественно изменяет представление о методологии статистического восстановления искомым траекторий, включая вопросы оценки эффективности полученного результата. Традиционные подходы, с использованием в качестве базовой динамики условного среднего или других кривых, построенных на основе минимизаций функций от различных вариантов метрик разброса, не всегда обеспечивают эффективной поддержки работы систем принятия решения или другого терминального пользователя получаемой информации.

Важным элементом анализа эффективности построения системных составляющих является процесс апостериорного формирования опорных траекторий. Технология формирования опорных траекторий должна быть строго согласована с требованиями терминального пользователя. В частности, для систем поддержки торговых решений опорные траектории должны формироваться с учетом структуры выбранной стратегии торговых операций.

Критериями качества системной составляющей рядов наблюдений, формируемой с использованием предложенной технологии опорных траекторий или иным способом, должны выступать не степень ее близости к условному среднему, отражающей сглаженную динамику изменения случайного процесса, а степень ее информационной эффективности по отношению к терминальному звену решаемой задачи.

Литература

1. Cencini, M. Chaos or noise: Difficulties of a distinction / M. Cencini, M. Falcioni, E. Olbrich et al. // Phys. Rev. E, 2000. - V. 62. - P. 427-437.
2. Kapitaniak, T. Chaos in Systems with Noise, World Scientific. 2-d ed. New Jersey, 1990. - 140 p.
3. Frey, M. Deterministic and Stochastic Chaos [Electronical resource] / M. Frey, E. Simiu. - URL: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program/052az.pdf>. 24p.
4. Faranda, D. Stochastic Chaos in a Turbulent Swirling Flow / D. Faranda, Y. Sato, B. Saint-Michel, C. Wiertel-Gasquet, V. Padilla et al. // Physical Review Letters, American Physical Society, 2017. - 119 (1). - PP.014502.
5. Musaev, A. The Genesis of Uncertainty: Structural Analysis of Stochastic Chaos in Finance Markets. Complexity / A. Musaev, A. Makshanov, D. Grigoriev // Wiley, 2023. - Vol. 2023.- Article ID 1302220, 16 p.
6. Wold, H. O. A study in the analysis of stationary time series Uppsala: Almqvist & Wiksells. 1938. - 214 p.
7. Musaev, A. Algorithms of sequential identification of system component in chaotic processes / A. Musaev, A. Makshanov, D. Grigoriev // International Journal of Dynamics and Control. Springer Nature: 2023.
8. Клини, С. К. Введение в метаматематику // Пер. с англ. М.: Либроком, 2008. - 526с.
9. Юсупов, Р. М. К оцениванию эффективности информационных систем. Методологические аспекты / Р. М. Юсупов, А. А. Мусаев // Информационные технологии, 2017. - Том 23. - №5. - С. 323-332.
10. Мусаев, А. А. Численное исследование управляющих стратегий, основанных на анализе трендов. // Труды СПИИРАН, 2014. - Вып. 36. - С. 180-193.

Мусаев А.А., Колосов М.А. Стохастический хаос: проблемы моделирования. Рассмотрена задача формирования системной составляющей наблюдаемого случайного процесса, отражающего значимые изменения состояния динамической системы. Показано, что критерии качества формирования системной составляющей должны определяться требованиями иерархически вышестоящей метасистемы. При этом возникает новая постановка задачи оценивания, приводящая к необходимости построения вычислительных схем, существенно отличающихся от известных алгоритмов статистической фильтрации.

Ключевые слова: стохастический хаос, электронные рынки, динамика котировок, системная составляющая, динамическая система, метасистема, статистическое оценивание, фильтрация.

Musaev A.A., Kolosov M.A. Stochastic chaos: problems of modeling. The problem of forming a system component of the observed random process reflecting significant changes in the state of the dynamic system is considered. It is shown that the quality criteria for the formation of a system component should be determined by the requirements of a hierarchically superior meta-system. At the same time, a new formulation of the estimation problem arises, leading to the need to build computational schemes that differ significantly from the known algorithms of statistical filtration.

Keywords: stochastic chaos, electronic markets, price dynamics, system component, dynamic system, meta-system, statistical estimation, filtering.

Статья поступила в редакцию 03.05.2024
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.