DOI: 10.24892/RIJIE/20250304

Исследование динамических характеристик сигналов при дискретизации и квантовании*

Казимиров А.Н.
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
kazimirovan@susu.ru

Аннотация. **Экспериментальное измерение параметров динамических систем представляет собой временной ряд значений параметра. Далее следует цифровая обработка сигналов. Целью обработки измерительных сигналов является получение оценок некоторых параметров исследуемой динамической системы, идентификация система и прогнозирование ее поведения. Следует учитывать, что при преобразовании аналогового сигнала на выходе первичного преобразователя в цифровую форму происходит его дискретизация по времени и квантование по уровню, для последующей цифровой обработки. Происходит изменение характеристик динамической системы. В результате искажается представление о динамике системы. Это может приводить к построению неадекватной математической модели. В конечном итоге моделированию другого объекта. В статье предлагается оценка динамической размерности по временному ряду наблюдений на основе вычисления корреляционного интеграла. Также показано изменение величины динамической размерности при дискретизации и квантовании для сигналов, демонстрирующих простую динамику гармоническую и сложную хаотическую. Традиционно используемые статистические и спектральные методы обработки временных рядов оказываются недостаточными для оценки параметров динамических систем. Предложен метод оценки динамической размерности сигналов со сложной динамикой. Показана его эффективность при дискретизации и квантовании измерительных сигналов, определении числа существенных динамических переменных.**

***Ключевые слова*: дискретизация и квантование аналогового сигнала, хаотическая динамика, корреляционный интеграл, динамическая размерность.**

Введение

Измерение физических параметров объекта исследования является основной задачей эксперимента. Первоначально производится преобразование физического колебания в электрический аналоговый сигнал. На втором этапе выполняется аналого-цифровое преобразование (АЦП) посредством двух основных операций: дискретизации и квантования аналогового сигнала. Для характеристики отличия исходного аналогового сигнала и его представления после операций дискретизации и квантования вводится понятие шума квантования. Математической моделью шума квантования обычно считают белый шум. Это позволяет рассматривать результат дискретизации и квантования как добавление белого шума к исходному аналоговому сигналу. Последовательность цифровых кодов в виде временного ряда данных с выхода АЦП подвергается необходимой цифровой обработке [1, 2]. На конечном этапе обработки осуществляется восстановление аналогового сигнала цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП). Основными методами обработки сигналов или временного ряда данных являются статистические и спектрального анализа.

В настоящее время для анализа временных рядов данных применяются алгоритмы нелинейной динамики [3]. Которые позволяют решить несколько задач. Первое, оценка некоторых параметров исследуемой динамической системы. Второе, прогнозирование временного ряда данных. Третье, задача идентификации для классификации исследуемой системы. Например, какой тип данных подвергается обработке? Детерминированные или случайные, что будет определять варианты дальнейшей обработке данных в виде временного ряда [4]. В приложении к исследованию динамики систем и, в частности, последующего математического моделирования систем и вычисления динамических параметров эти методы в настоящее время используются недостаточно.

Методы исследования динамических систем

В последние годы в физике открытых систем используется понятие “динамический хаос" для характеристики сложных движений в относительно простых динамических системах. Реальное хаотическое движение с учетом случайных источников флуктуаций (броуновское движение) называется "физическим хаосом" [5, 6]. В электронике динамическая хаотическая система может быть получена путем введения нелинейной обратной связи в генератор Ван-дер-Поля [7]. Когда колебательный процесс полностью упорядочен, спектр формируется одной гармоникой. Когда колебания случайны, возникает "белый шум". Современные методы нелинейной динамики позволяют получать информацию о степени упорядоченности динамического процесса из экспериментальных данных.

Важной является классификация систем на динамические и стохастические, которая основана на возможности прогнозирования поведения систем. При этом заданы начальные условия. Динамические – это предсказуемые, а стохастические – непредсказуемые на основе начальных данных движения. Теория динамических систем позволяет нам предсказывать динамику систем на неограниченное время, но экспериментальные данные этого не подтверждают. Это породило мнение, что предсказуемость ограничена из-за большого количества факторов, влияющих на движение системы, или неопределенности исходных данных. Другими словами, мы выясняем природу взаимо-

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

связи между рядом наблюдений и математической моделью в рамках концепции частичного детерминизма, которая отождествляет непредсказуемость со случайностью. В последние годы в физике открытых систем используется понятие “динамический хаос" для характеристики сложных движений в относительно простых динамических системах, например системы Лоренца, Рёсслера [6]. Каждая из этих систем описывается тремя нелинейными дифференциальными уравнениями. Такие системы примечательны тем, что при малом изменении начальных условий траектории движения в начале совпадают, но постепенно расходятся и становятся различны. Такие системы проявляют свойства присущие случайным и непредсказуемым процессам. Это свойство хаотических систем не позволяет прогнозировать их динамику на длительное время. Обычно не более двадцати процентов от длины наблюдаемого временного ряда измерений. Примером могут служить различные природные процессы. Традиционный подход к описанию хаотических динамических процессов является статистическим, определяются статистические характеристики и закон распределения. Этот подход к исследованию неизвестного процесса не позволяет различать стохастические и хаотические, но детерминированные динамические системы.

Современные информационные технологии (MATLAB и другие) позволяют моделировать динамические системы практически на основе любого известного математического описания [8]. В процессе функционирования динамической системы, во многих случаях, происходит выделение небольшого числа переменных или параметров порядка, которые определяют динамика всей системы. Таким образом, первой задачей, которую необходимо решить при построении математической модели системы на основе методов нелинейной динамики, является определение эффективного числа степеней свободы (параметров порядка), участвующих в соответствующем физическом процессе.

Существующие примеры нелинейных динамических систем позволяют надеяться, что, несмотря на сложную природу динамики систем, ее основные характеристики могут быть описаны нелинейной динамической системой с ограниченным числом независимых динамических переменных, а остальные особенности процесса учитываются теорией возмущений для этой динамической системы [9].

Алгоритм анализа временного ряда

Один из алгоритмов – это определение корреляционного интеграла [3, 5]. Корреляционный интеграл служит для оценки количества динамических переменных в описании исследуемого физического колебания. Корреляционный интеграл может быть получен по результатам измерений одной характеристики динамической системы, то есть временному ряду наблюдений с дискретизацией по времени Δt и числом членов ряда N.

$$C(r)=\frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\vartheta\left(r-\left|X_i-X_j\right|\right) \qquad (1)$$

где $\vartheta(x)$ – функция Хевисайда; $\vartheta(x)$ = 0 при x< 0 $\vartheta(x)$ = 1 при x>0.

Алгоритм определения корреляционный интеграла представим в виде следующей последовательности вычислений и преобразований.

1. На основе исходного временного ряда X_0 должна быть сформирована совокупность векторов $X_0, X_1, ..., X_{n-1}$ следующим образом:

$$X_0 : X_0(t_1), X_0(t_2), ..., X_0(t_N)$$
$$X_1 : X_0(t_1+\tau), X_0(t_2+\tau), ..., X_0(t_N+\tau) \qquad (2)$$
$$.$$
$$X_{n-1} : X_0(t_1+\tau(n-1)), X_0(t_2+\tau(n-1)), ..., X_0(t_N+\tau(n-1))$$

где τ – временная задержка, в цифровой системе обработки данных будет кратна Δt. Формируем пространства векторов X_i, последовательно увеличивая n.

2. Начиная с величины $n=2$ и далее, будет справедливо следующее. Для малых величин r корреляционный интеграл $C(r)$ как функция величины r будет изменяться таким образом:

$$C(r)=r^d. \qquad (3)$$

Логарифмируем это выражение и выразим *d*:

$$d=\frac{\ln\left[C(r)\right]}{\ln(r)} \qquad (4)$$

Значение d будет наклоном линии графика $\ln\left[C(r)\right]$ от аргумента $\ln(r)$, то есть от величины r.

3. Далее рассматриваем, как изменяется наклон d в зависимости от возрастающего значения n. Если d выходит на постоянное значение при возрастающей величине *n*, то из этого следует, что исследуемая динамическая система имеет ограниченную размерность. Минимальное значение *n*, при котором *d* остается постоянным соответствует числу независимых переменных необходимых для математического моделирования исследуемой системы. Величину *d* также называют динамической размерностью. В случае если временной ряд представляет случайную последовательность, то значение *d* последовательно увеличивается при возрастании *n*.

Анализ динамических систем

Рассмотрим применение этого алгоритма для исследования двух реальных динамических систем. Каждая система представлена временным рядом измерений из нескольких тысяч измерений, полученных на цифровом регистраторе (рис. 1, 2).

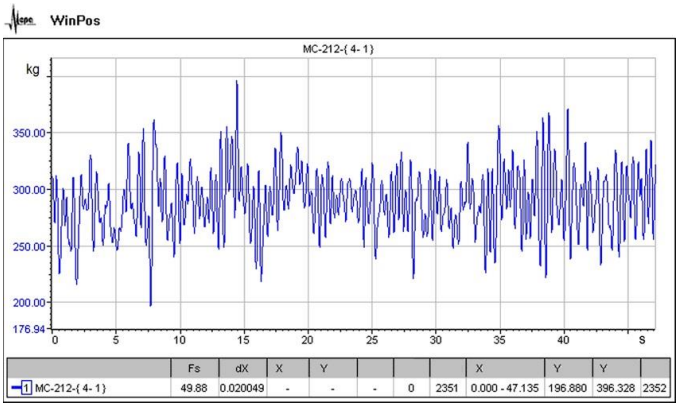

Рис. 1. Исследуемый динамический процесс в системе 1

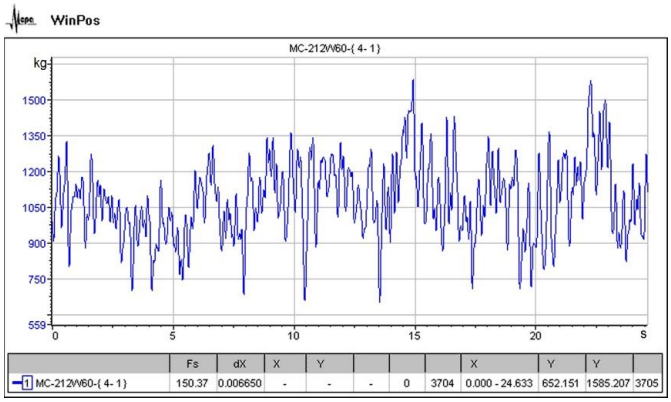

Рис. 2. Исследуемый динамический процесс в системе 2

Экспериментальные данные были обработаны с помощью программы анализа сигналов измерительно-вычислительного комплекса MIC-400D (вероятностные характеристики, быстрое преобразование Фурье).

По виду временных реализаций предполагаем сложный характер этих динамических процессов.

На рис. 3, 4 показаны графики результата математической обработки данных эксперимента в первой и второй динамических системах: спектры Фурье. Спектры являются достаточно широкополосными, что соответствует сложной динамике обоих процессов. При сравнении спектров затруднительно оценить характер динамики каждой из динамических систем. Является динамика каждой из систем упорядоченной или стохастической? Однозначного ответа нет.

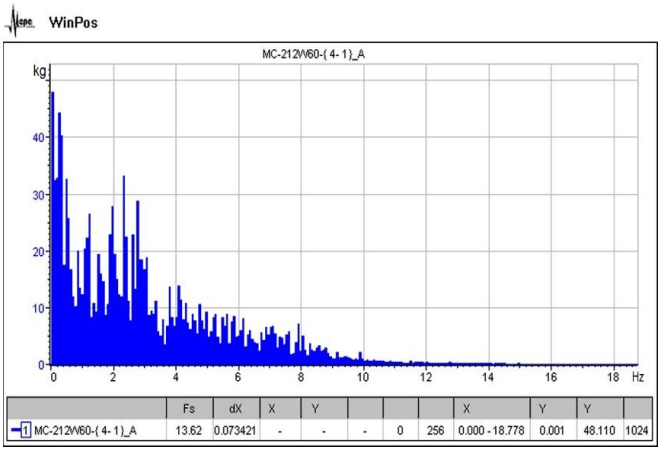

Рис. 3. Спектр Фурье ряда измерений в системе 1

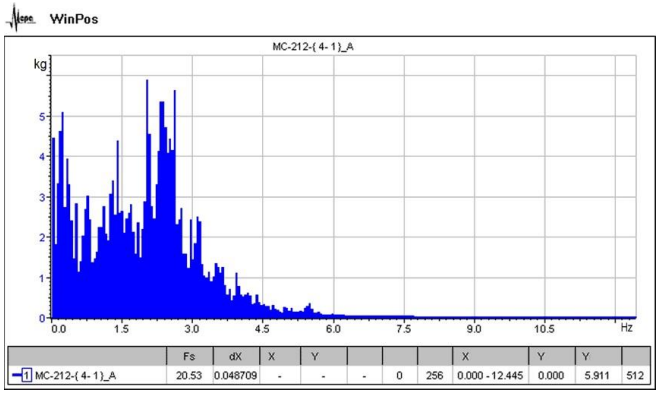

Рис. 4. Спектр Фурье ряда измерений в системе 2

На рис. 5, 6 показаны графики результата математической обработки данных эксперимента в первой и второй динамических системах: построена плотность распределения вероятности [15]. Плотность распределения вероятности временного ряда измерений соответствует нормальному закону распределения. Для второй системы имеем отклонение статистических характеристик и плотности распределения от нормального закона.

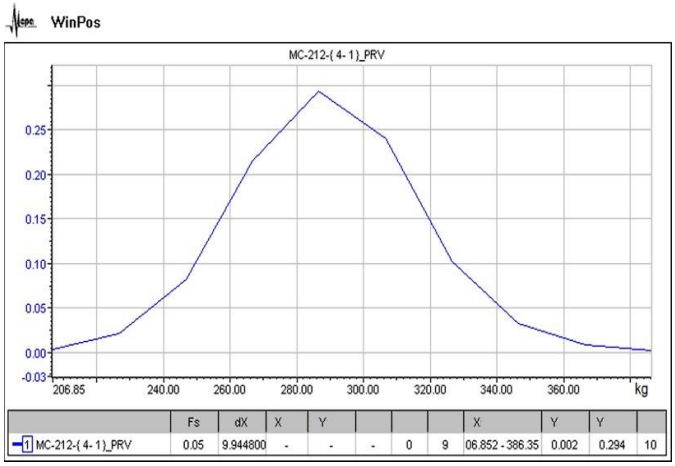

Рис. 5. Плотность вероятности ряда измерений в системе 1

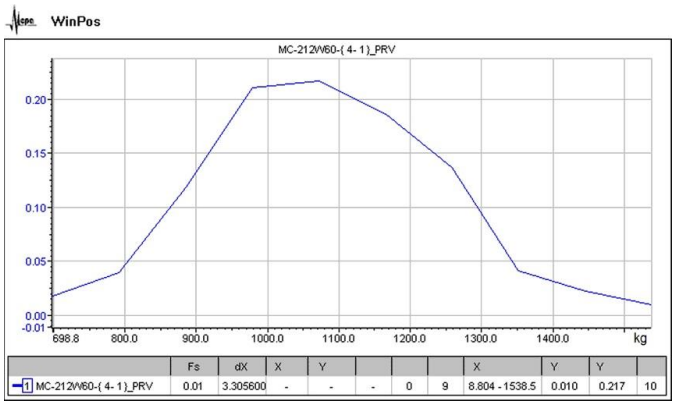

Рис. 6. Плотность вероятности ряда измерений в системе 2

Основываясь на статистических характеристиках и спектрах Фурье экспериментальных данных, невозможно выделить существенные различия в динамике систем. В [4] показано, что сложные, но детерминированные и случайные процессы могут обладать одинаковыми статистическими свойствами. Чтобы различать такие процессы, необходимо рассчитать динамическую размерность. Для этого необходимо воспользоваться алгоритмом расчета корреляционного интеграла. Далее на его основе оценку динамической размерности.

Основываясь на статистических характеристиках и спектрах Фурье ряда измерений, невозможно выделить существенные различия в динамике исследуемых систем. В [4] показано, что сложные, но детерминированные и случайные процессы могут обладать одинаковыми статистическими свойствами. Чтобы различать такие процессы, необходимо рассчитать динамическую размерность по временному ряду измерений.

На рис.7, 8 показаны результаты расчета корреляционного интеграла в виде семейства линий на графике $\ln\left[C\left(r\right)\right]$ в зависимости от значения аргумента $\ln(r)$ при последовательном увеличении значения *n*.

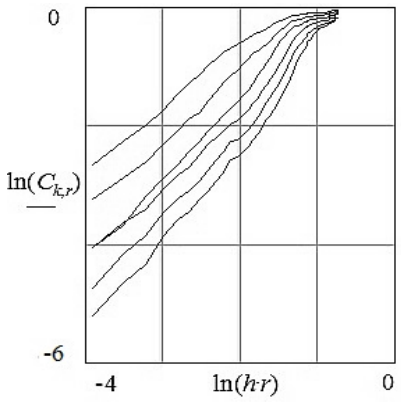

Рис. 7. Корреляционный интеграл системы 1

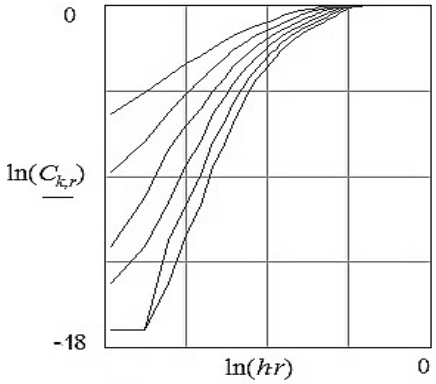

Рис. 8. Корреляционный интеграл системы 2

На рис. 9, 10 представлены последовательности значений динамической размерности *d* в зависимости от последовательно увеличивающихся значений *n*. Из графика на рис. 8 следует, что динамическая размерность первой системы составляет не более четырех. Таким образом, динамика первой системы может быть описана системой из четырех нелинейных дифференциальных уравнений.

Для описания динамики процесса второй динамической системы потребуются статистические методы. Потому, что когда значение *n* последовательно возрастает, значение динамической размерности *d* также увеличивается и насыщения значения не наблюдается.

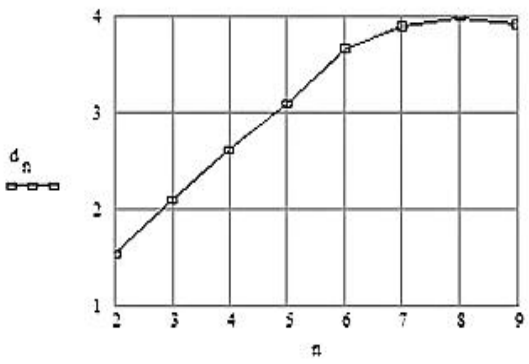

Рис. 9. Динамическая размерность системы 1

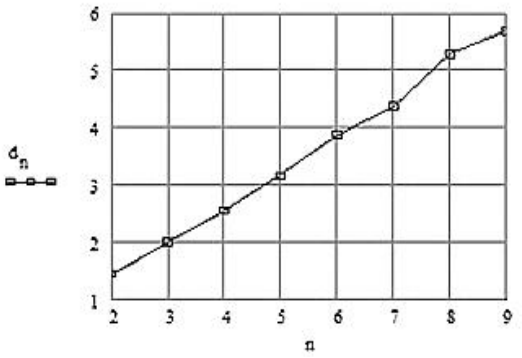

Рис. 10. Динамическая размерность системы 2

Приведенный пример нелинейных динамических систем позволяет надеяться, что, несмотря на сложный характер динамики в этих системах, в некоторых случаях система может быть описана нелинейной динамической системой с ограниченным числом независимых динамических переменных. Полученные данные, с одной стороны, позволяют дать традиционную интерпретацию результатам исследований, а с другой – дают основания для дальнейшей работы по описанию динамики сложных систем.

Исследование моделей динамических систем

Рассмотрим влияние параметров дискретизации и квантования на два динамических процесса. Один демонстрирует детерминированное упорядоченное поведение в системе второго порядка. Это развитие и установление гармонических колебаний в генераторе при “мягком” возбуждении колебаний. Второй, хаотические колебания в системе Лоренца. Так называемый детерминированный хаос. Система Лоренца используется в исследованиях как тестовая и достаточно изученная система, демонстрирующая сложный колебательный процесс. Система Лоренца содержит три дифференциальных уравнения, два из которых являются нелинейными. Динамическая размерность имеет значение 2,06 [7]. Дробную размерность еще называют фрактальной, она присуща, например, природным колебательным процессам, турбулентным течениям [5, 7]. Это оценка снизу порядка системы. Следовательно, математическое описание должно содержать три дифференциальных уравнения, причем как минимум одно должно быть нелинейным. Сложное неупорядоченное движение возникает при указанных значениях параметров *a*, *b*, *r*. Значение *r* должно быть обязательно больше 24,75. В этом случае в системе развиваются хаотические колебания.

Обработке будем подвергать сигнал, полученный при решении дифференциальных уравнений, то есть моделировании и этот же сигнал после дискретизации и квантования:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = -a \cdot x + a \cdot y \\ \dfrac{dy}{dt} = r \cdot x - y - x \cdot z \\ \dfrac{dz}{dt} = x \cdot y - b \cdot z \end{cases}$$
$$a = 10$$
$$b = \frac{8}{3} \qquad (5)$$
$$r = 25$$
$$d_{Lorenz} \approx 2,06$$

Развитие колебаний на выходе генератора показано на рис. 11. Временной ряд имеет 15000 значений. Такое колебание можно рассматривать как гармоническое с амплитудной детерминированной модуляцией. Колебание генерируется динамической системой второго порядка. Следовательно, динамическая размерность должна быть не более двух, $d \le 2$. Колебательный процесс является решением нелинейного дифференциального уравнения Ван-дер-Поля второго порядка [8]. Записанное в виде уравнений первого порядка оно имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = y \\ \dfrac{dy}{dt} = \mu \cdot (1 - x^2) \cdot y - x \end{cases} \quad (6)$$

В решении выберем значение параметра $\mu = 0{,}1$.

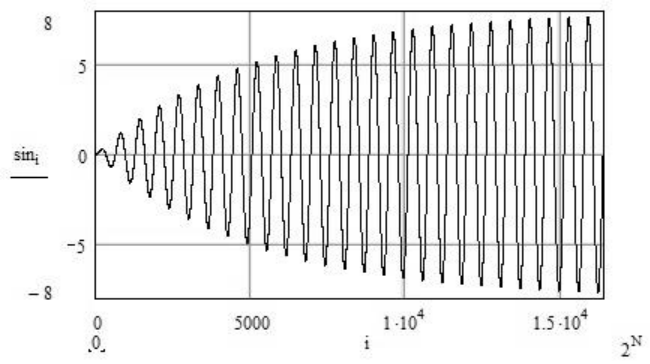

Рис. 11. Установление колебаний генератора

Колебание переменной y в системе Лоренца показано на рис. 12. Временной ряд имеет 15000 значений. Очевидно, что колебания имеют сложный неупорядоченный характер. На рис. 13 показан временной отрезок из 1024 отсчетов. Видно, что колебания переменной y имеют нерегулярный характер. Параметры математического моделирования на компьютере системы Лоренца выбраны так, чтобы вид колебательного процесса был почти “аналоговым”. Дискретные значения определяются разрядной сеткой компьютера.

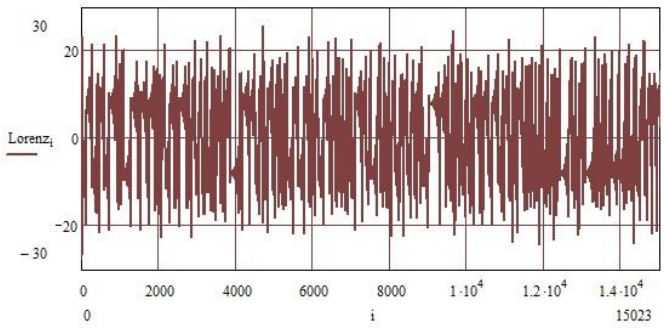

Рис. 12. Колебания в системе Лоренца

Колебание переменной y в системе Лоренца также подвергнем дискретизации и квантованию. Результат в виде цифровой последовательности или временного ряда представлен на рис. 14.

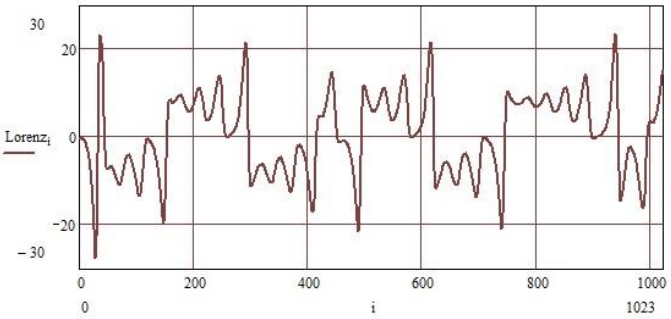

Рис. 13. Фрагмент колебаний в системе Лоренца

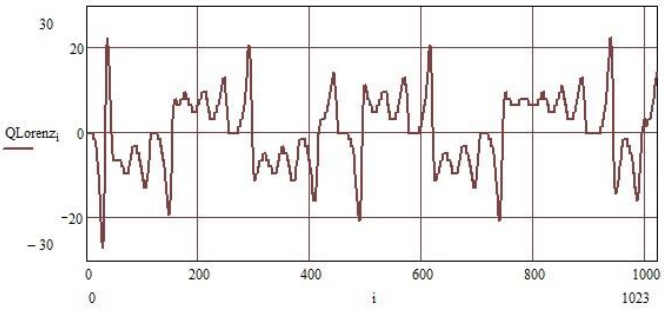

Рис. 14. График цифровой последовательности y

На рис. 15 приведен график спектра колебания в системе Лоренца, полученный с помощью комплексного преобразования Фурье. На рис. 16 график спектра колебания в системе Лоренца после дискретизации и квантования сигнала. Спектр сигнала на рис. 15 после дискретизации и квантования колебания в системе Лоренца расширяется. Следовательно, динамика процесса становится более случайной. Уровень высших гармоник также возрастает [10]. Обычно считается, что причиной является шум квантования сигнала. Каково изменение динамических характеристик этого колебательного процесса?

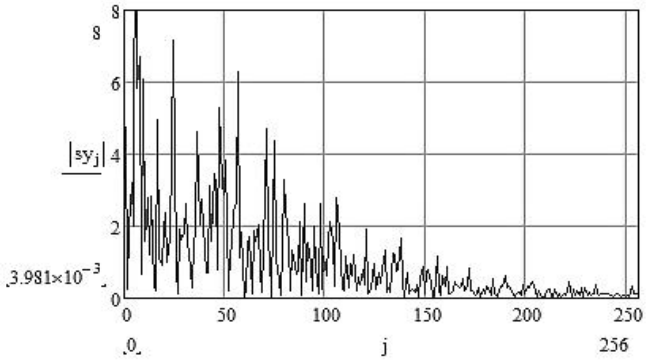

Рис. 15. Спектр колебания в системе Лоренца

Обратимся к алгоритму вычисления корреляционного интеграла, описанного выше. Будем последовательно увеличивать значения n от единицы до двенадцати и также последовательно вычислять значения d.

На рис. 17 представлен график расчета значений d. Величина d составляет значение приблизительно равное двум.

Для дальнейшего изложения результатов необходимо сделать дополнительные пояснения.

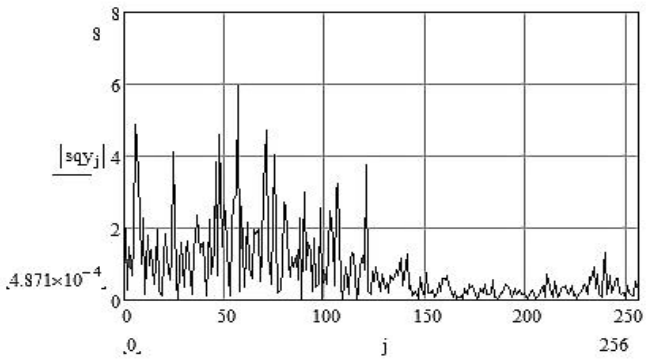

Рис. 16. Спектр цифровой последовательности *y*

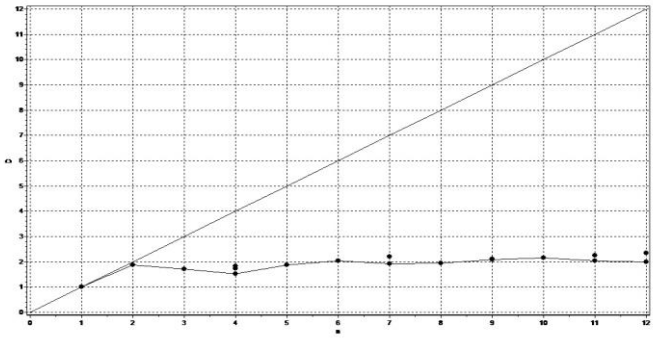

Рис. 17. Динамическая размерность системы Лоренца

Траектория движения системы Лоренца в фазовом пространстве *x*, *y*, *z* входит сферу и, согласно современной терминологии имеет аттрактор (от англ. Attract – притягивать). На фазовом портрете системы Лоренца в проекции на плоскость *x*, *y* (рис. 18), видны два притягивающих центра. Фазовый портрет соответствует колебаниям переменной *y* на максимальной и минимальной амплитудах. Аттрактор Лоренца имеет дробную размерность d=2,06. Геометрическая размерность соответствует количеству уравнений и равна трем. Отметим, что в трехмерном пространстве фазовая траектория не имеет взаимных пересечений, следовательно, величина размерности пространства вложения фазовой траектории составляет три. Дробная размерность является оценкой снизу числа динамических переменных. Система Лоренца описывается тремя дифференциальными уравнениями, два из которых являются нелинейными. Именно в системах нелинейных уравнений наблюдаются непериодические колебания, которые становятся различными с течением времени при изменении параметров системы уравнений и начальных условий. При незначительном изменении начальных условий траектории в фазовом пространстве со временем расходятся, соответственно различия колебаний возрастают. Это важное свойство хаотических колебаний, которое необходимо учитывать при моделировании таких систем [12-14].

Развитие колебания на выходе генератора (рис. 11) подвергнем дискретизации и квантованию. Результат представлен на рис. 19. Вычислим динамические размерности исходного колебания (рис. 11) и после дискретизации и квантования.

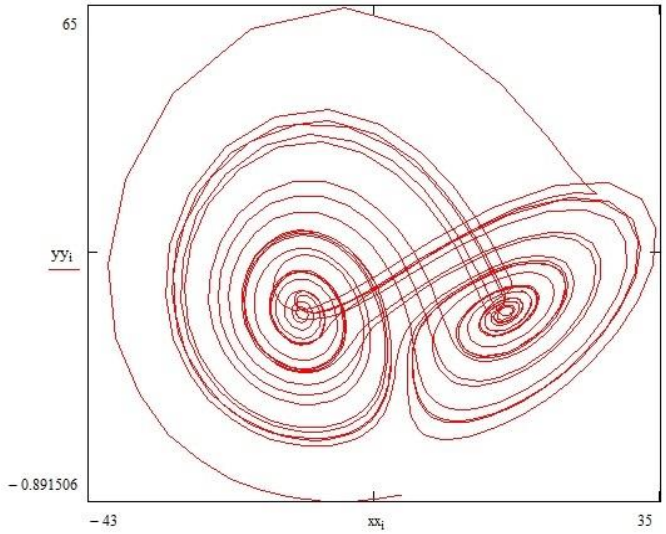

Рис. 18. Аттрактор системы Лоренца

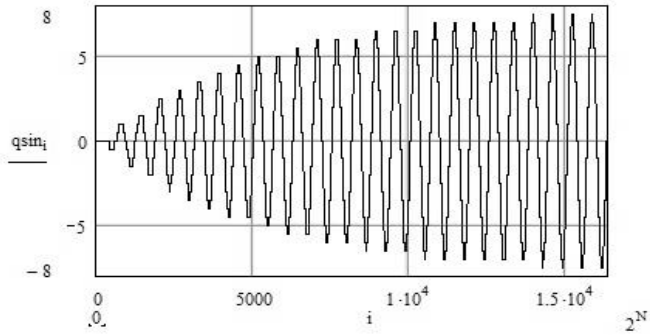

Рис. 19. Колебание после дискретизации и квантования

В соответствии с алгоритмом вычисления корреляционного интеграла, будем последовательно увеличивать значения *n* от единицы до восьми (этого вполне достаточно, как будет видно из графика) и также последовательно вычислять значения *d*. На рис. 20 представлен график расчета значений *d* колебания на рис. 11. Величина *d* составляет значение немногим менее двух. Таким образом, имеем дело с колебательной системой второго порядка.

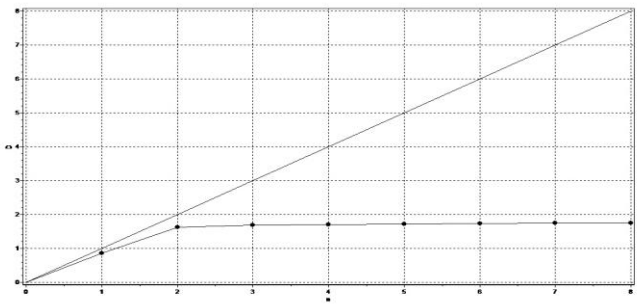

Рис. 20. Динамическая размерность колебания генератора

Аналогично вычислим значение *d* колебательного процесса на рис. 19. Размерность пространства вложения *n* будем увеличивать от одного до двенадцати. Максимальное значение *n* берем больше, так как появляются шумы квантования и важно оценить их влияние на величину динамической размерности. Результаты расчета на рис. 21.

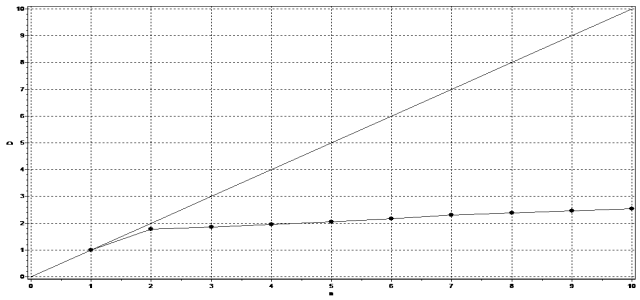

Рис. 21. Динамическая размерность колебания генератора при его дискретизации и квантовании

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы: первое, вычисленные динамические размерности соответствуют исследуемым динамическим системам; второе, для сигнала на выходе генератора после дискретизации и квантования теоретическое значение размерности сохраняется до значения $n = 4$, при дальнейшем увеличении n до десяти величина размерности монотонно возрастает до 2,6. Это можно объяснить добавлением шума квантования, на рис. 19 заметны ступеньки, характерные для процессов дискретизации и квантования. По крайней мере, при значениях $n \geq 4$ динамическая размерность соответствует системе второго порядка. Если $n > 4$, возрастание размерности объясняется аддитивным добавлением шума квантования к исследуемому колебанию.

Интерес представляет изменение величины динамической размерности d при изменении параметров дискретизации и квантования сложного динамического процесса. Проведем дискретизацию и квантование с различной разрядностью переменной y в динамической системе Лоренца (рис. 12, 13). Графики колебаний после дискретизации и квантования показаны на рис. 22, 23.

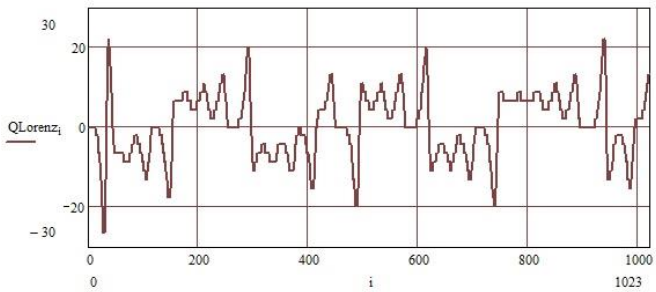

Рис. 22. График первой цифровой последовательности y

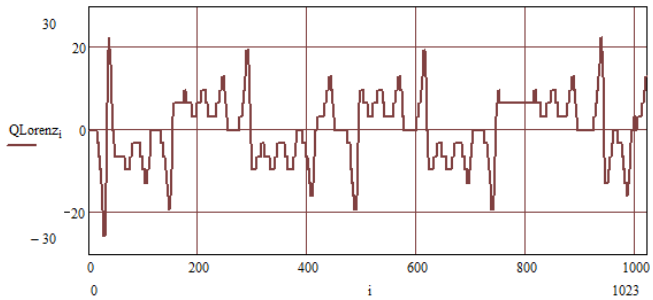

Рис. 23. График второй цифровой последовательности y

На графиках первой и второй последовательностей хорошо видны ступеньки квантования, причем во втором случае квантование происходит с меньшей разрядностью. В результате исследуемый процесс становится более грубым. Вычислим динамические размерности этих двух колебаний в квантованном представлении. На рис. 24 и рис. 25 показаны зависимости d от n, максимальная величина n составляет одиннадцать. На графике рис. 24 для последовательности с меньшим шагом квантования при значении n равном один и два d оказывается равным нулю.

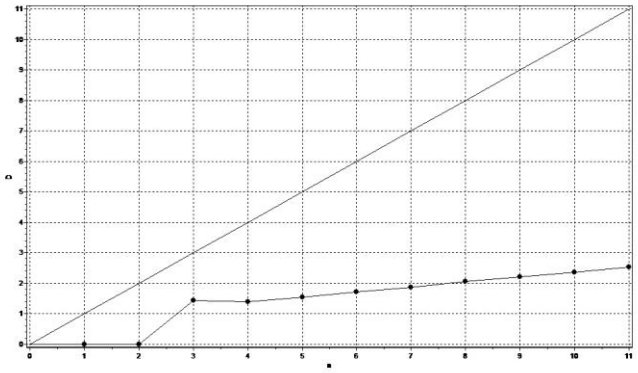

Рис. 24. Динамическая размерность первого колебания

Это можно объяснить так: при вычислении корреляционного интеграла необходимо задать величину r на основании которой определяется степень близости соседних траекторий в фазовом пространстве. При величине r меньше ступени квантования значение d оказывается нулевым. При увеличении шага квантования этот эффект проявляется явно на рис. 25. Динамическая размерность d равна нулю при значении n равном четырем. Наклон графика d несколько возрастает, что можно объяснить увеличением шума квантования. Отметим, что при увеличении значении n до восьми значение динамической размерности продолжает соответствовать системе Лоренца, далее d возрастает из наличия шума квантования. Даже при значении n равном одиннадцати d не превосходит величины три, а это соответствует динамической системе третьего порядка, то есть системе Лоренца.

Аналогичные исследования были проведены с гармоническими сигналами после АЦП преобразования в цифровой временной ряд. Пример такого сигнала на рис. 25.

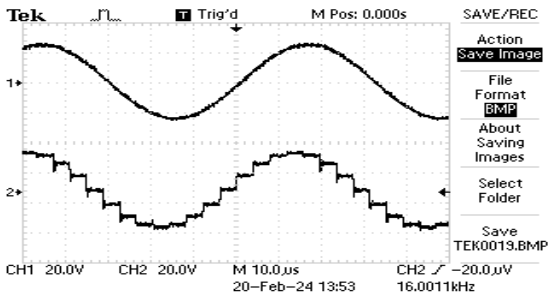

Рис. 25. Гармонический сигнал и его цифровое представление

Результаты этого исследования полностью соответствуют результатам для колебания на выходе генератора Ван-дер-Поля.

Заключение

В работе показано значение оценки корреляционного интеграла в натурных экспериментальных исследованиях систем со сложной динамикой и на исследованиях математических моделей систем с регулярной и хаотической динамикой. Даже по сравнительно небольшому временному ряду измерений удается классифицировать исследуемый динамический процесс. Определить вид динамики процесса: регулярная, стохастическая или хаотическая с малой размерностью. Наибольший интерес представляют системы с хаотической динамикой, это могут быть не только сигналы в электронных устройствах, но и природные процессы, турбулентные потоки [11]. По результатам исследований предлагаются следующие рекомендации при вычислении корреляционного показателя:

1. Выбор τ в (2) делается по минимуму коэффициента корреляции между основной последовательностью и задержанной на время τ;

2. Разрядность аналого-цифрового преобразования для классификации систем существенного значения не имеет, что расширяет сферу исследований быстро протекающих процессов, позволяющих зафиксировать короткий временной ряд измерений, что позволит исследовать быстрые однократные процессы;

3. В процессе измерений на результаты накладываются шумы различной природы, если уровень шума отражается на виде линий (рис. 7, рис. 9) корреляционного интеграла, то выбирается короткий линейный участок, по углу наклона оценивается динамическая размерность.

Оценка динамической размерности дает возможность определить порядок динамической системы и построить модель исследуемого процесса.

Литература

1. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Matlab / А.И. Солонина, С.М. Арбузов. – СПб: БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.

2. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. – М: Додэка-XXI, 2011. – 720 с.

3. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М: Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с.

4. Гласс Л. От часов к хаосу: Ритмы жизни / Л. Гласс, М. Мэки. – М: Мир, 1991. – 248 с.

5. Ахромеева Т.С. Нестационарные структуры и диффузионный хаос / Т.С. Ахромеева, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1992. – 544 с.

6. Николис Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. – М: Мир, 1990. – 344 с.

7. Залогин Н.Н. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических / Н.Н. Залогин, В.В. Кислов. – М: Радиотехника, 2006. – 208 с.

8. Каганов В.И. Колебания и волны в природе и технике. Компьютеризированный курс: Учебное пособие для вузов. – М: Горячая линия-Телеком, 2008. – 336 с.

9. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М: Постмаркет, 2000. – 352. с.

10. Дмитриев А.С. Генерация хаоса / А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Н.А. Максимов, А.И. Панас. – М: ТЕХНОСФЕРА, 2012. – 424 с.

11. Гамбурцев А.Г. Атлас временных вариаций природных процессов. Том 1 / А.Г. Гамбурцев, С.И. Александров, А.С. Беляков. – М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1994. – 176 с.

12. Казимиров А.Н. Фильтрация гармонического и хаотического сигналов в нелинейных радиоэлектронных системах // Тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. «» Физика и технические приложения волновых процессов. 10-14 сентября 2018 г. – URL: http://conf.psuti.ru/fitpvp-2018/proceedings.

13. Казимиров А.Н. Нелинейная фильтрация хаотического сигнала в радиотехнической системе // Пром-Инжиниринг: труды VI Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск, 2020. – С. 340-344.

14. Kazimirov A.N. Nonlinear filtering of chaotic signal based on stochastic resonance effect // Proc. of International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. –2020. – 9112037. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112037.

15. Анищенко В. С. Статистические свойства динамического хаоса / В.С. Анищенко, Т.Е. Вадивасова, Г.А. Окрокверцхов, Г.И. Стрелкова // Успехи физических наук. – 2005. – Т.175, № 2. – С. 163-179.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250304

Investigation of Dynamic Characteristics of Signals During Sampling and Quantization

Kazimirov A.N.
South Ural State University
Chelyabinsk, Russian Federation
kazimirovan@susu.ru

Abstract. **The experimental measurement of dynamic system parameters is a time series of parameter values. This is followed by digital signal processing. The purpose of measuring signal processing is to obtain estimates of some parameters of the dynamic system under study, identify the system and predict its behavior. It should be borne in mind that when an analog signal is converted to digital form at the output of the primary converter, it is sampled in time and quantized in level for subsequent digital processing. There is a change in the characteristics of the dynamic system. As a result, the idea of the dynamics of the system is distorted. This can lead to the construction of an inadequate mathematical model. In the end, we model another object. The article proposes an estimate of the dynamic dimension based on a time series of observations based on the calculation of the correlation integral. It also shows a change in the magnitude of the dynamic dimension during sampling and quantization for signals showing simple harmonic and complex chaotic dynamics. The traditionally used statistical and spectral methods of time series processing turn out to be insufficient for estimating the parameters of dynamic systems. A method for estimating the dynamic dimension of signals with complex dynamics is proposed. Its effectiveness in sampling and quantization of measurement signals, determining the number of significant dynamic variables is shown.**

Keywords: **sampling and quantization of an analog signal, chaotic dynamics, correlation integral, dynamic dimension.**

Библиографическое описание статьи

Казимиров А.Н. Исследование динамических характеристик сигналов при дискретизации и квантовании // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №3. – С. 23-31. DOI: 10.24892/RIJIE/20250304

Reference to article

Kazimirov A.N. Investigation of dynamic characteristics of signals during sampling and quantization, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.3, pp. 23-31. DOI: 10.24892/RIJIE/20250304
