

На правах рукописи

КАПУСТИНА Анастасия Сергеевна

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ
ХАОСОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 05.13.01 –
«Системный анализ, управление и обработка информации»
(вычислительная техника и информатика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2010

Работа выполнена на кафедре синергетики и процессов управления Технологического института Южного федерального университета в г. Таганроге (ТТИ ЮФУ)

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор **А.А. Колесников**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **И.М. Першин**
кандидат технических наук, доцент **Е.П. Тумоян**

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» (СПбГУ ИТМО)

Защита диссертации состоится «25» ноября 2010 г. в 14 час. 20 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.208.22 в ТТИ ЮФУ по адресу: 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Д-406.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮФУ.

Автореферат разослан «__» октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор
Целых



А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из важнейших проблем в сфере коммуникаций является обеспечение надежной, устойчивой и стабильной работы систем передачи и защиты информации. В этой связи долгие годы возникновение хаотических колебаний в телекоммуникационных системах считалось нежелательным явлением. И лишь после многих исследований стало ясно, что причинами появления хаоса являются не только шумы и внешние возмущения, а в первую очередь сама собственная динамика нелинейной системы.

При всей внешней схожести хаотических колебаний, возникающих в неустойчивых нелинейных динамических системах, на случайные, они таковыми не являются. Хаотические процессы обладают многими свойствами случайных, в том числе непредсказуемостью на больших интервалах времени. Вместе с этим, хаотические колебания воспроизводимы и при повторении начальных условий процесса, система выдает одну и ту же фазовую траекторию.

Исследование причин появления хаоса в системе дало возможность ученым сделать вывод о возможности применения хаотических колебаний при создании новых технологий.

В связи с этим в последние годы бурно развивается принципиально новое научное направление, основанное на явлении самоорганизации в нелинейных системах с динамическим хаосом. Эти системы характеризуются так называемыми «странными» аттракторами, которые могут применяться в качестве гибких информационных процессоров, эффективно обрабатывающих информацию. Суть нового подхода состоит в том, что информация порождается как каскадом бифуркаций, приводящих к нарушению симметрии в системе, так и ее хаотической диссипативной динамикой, приводящей к все более тонкому разрешению процессов.

К генераторам информации – аттракторам предъявляются следующие основные требования: во-первых, большая емкость памяти и, во-вторых, способность к значительному сжатию информации. Известно, что регулярные аттракторы типа Ван дер Поля, Релея, Пуанкаре и др., имеющие размерность 1, малоэффективны как модули для хранения информации, но практически идеальны как устройства для сжатия информации. Однако в нелинейной динамике были обнаружены хаотические («странные») аттракторы, обладающие с информационной точки зрения универсальными свойствами: с одной стороны, они имеют значительную информационную размерность, а, с другой, они являются «компрессорами» информации.

Указанные свойства оказались весьма неожиданными для науки. Дело в том, что хаотические аттракторы, например, типа Лоренца осуществляют процессы обработки информации путем уменьшения

числа степеней свободы в фазовом пространстве. Это – процесс сжатия фазового пространства, который называют самоорганизацией системы. Таким образом, методы нелинейной динамики дают возможность создания принципиально новых методов обработки информации.

Цель работы состоит в разработке синергетического метода синтеза систем хаосодинамической обработки информации применительно к задачам скрытой передачи данных.

Направление исследований. В соответствии с поставленной целью в работе решена следующая совокупность основных задач:

- Исследование процессов самоорганизации информации на основе термодинамической и динамической теорий информации.
- Исследование базовых нелинейных математических моделей систем с регулярной и хаотической динамикой.
- Исследование методов построения хаотических генераторов и изучение нелинейной модели хаотического генератора Лоренца.
- Исследование метода глобальной реконструкции динамической системы.
- Разработка методики измерения «управляющего параметра», существенно влияющего на характер хаотических колебаний.
- Синтез нелинейного динамического наблюдателя для текущей идентификации «управляющего параметра» с целью последующего восстановления структуры аттрактора и восстановления скрытой информации.
- Синтез генераторов «управляющих параметров» в системах с хаотической динамикой.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы современной нелинейной динамики и синергетики, методы синергетической теории управления и теории дифференциальных уравнений, а также методы математического моделирования динамических систем. При проведении этапов синтеза и моделирования использовались прикладные математические пакеты Maple и MatLab.

Обоснованность научных положений и достоверность результатов исследований подтверждается согласованностью результатов теоретических исследований и компьютерного моделирования полученных хаосодинамических систем обработки информации.

Научная новизна. В работе получены и выносятся на защиту основные результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Синергетический метод реконструкции нелинейных систем с динамическим хаосом, основанный на процессе текущей идентификации управляющих параметров.

2. Методика синергетического синтеза наблюдателей параметров хаотических систем, основанная на идее введения инвариантных многообразий – целевых аттракторов в пространстве состояний синтезируемых систем.
3. Метод обработки и скрытой передачи информации, основанный на формировании хаотического аттрактора типа Лоренца, позволяющего осуществлять процессы обработки информации путем уменьшения числа степеней свободы в фазовом пространстве, т.е. в системе возникает процесс самоорганизации.
4. Метод синтеза генераторов «управляющих параметров» в системах с хаотической динамикой типа Лоренца, позволяющие сформировать в системах с хаотической динамикой регулярные режимы движения, необходимые для решения ряда технологических задач управления и обработки информации.

Практическая ценность работы. Разработанные в диссертации метод динамической обработки и защиты конфиденциальной информации, основанный на методе глобальной реконструкции динамики системы с использованием синергетического наблюдателя и метод синтеза генераторов «управляющих параметров» могут быть применены для создания нового класса самоорганизующихся систем обработки и защиты информации.

Реализация результатов. Полученные в диссертации научные и прикладные результаты нашли применение в учебном процессе кафедры синергетики и процессов управления Таганрогского технологического института Южного федерального университета (ТТИ ЮФУ).

Апробация работы. Научные и прикладные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС–2007)», г. Пятигорск; конференции «Инновационные технологии XXI века в информатике, управлении и образовании», г. Нальчик, 2008; 5^{ой} научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008) г. С-Петербург; IX Всероссийская научная конференция «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления», Таганрог, 2008, Международном Конгрессе по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT' 10», Дивноморское, 2010.

Публикации. Всего соискателем по теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 68 наименований, и приложения. Содержание диссертации изложено на 130 страницах и содержит 76 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, кратко изложены теоретические и практические результаты работы, представлена их научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные понятия динамического и термодинамического подходов к теории информации.

Рассмотрен термодинамический подход к теории информации, предложенный Г. Хакеном. В основе данного подхода лежит то, что сигналу можно приписать смысл, если принять во внимание отклик приемника. Получение сигнала системой означает задание с помощью сигнала управляющих параметров и начальных параметров. До получения сигнала система находится в нейтральном состоянии в некоем аттракторе, а после получения либо система остается в исходном состоянии и тогда сигнал бессмыслен, либо система переходит в новый аттрактор. С концептуальной точки зрения данный подход дает возможность понять, динамическая система порождает, сохраняет или уничтожает информацию. Для этого в понятии информации в традиционной теории информации вместо количества информации используется понятие значимости информации.

Другой рассмотренный в данной главе подход был предложен Д.С. Чернавским. Для определения информации в рамках подхода кроме количества вводится понятие ценности информации. Ценность информации зависит от преследуемой цели, и чем больше информация помогает достижению цели, тем более ценной она считается. С точки зрения динамического подхода, понятие информационная система применяется к системе, способной рецептировать, запоминать и генерировать информацию.

В сложных системах информация порождается не только каскадом бифуркаций, но и самой хаотической динамикой системы. В связи с этим, нелинейные динамические системы могут выступать как генераторы информации. Такими генераторами могут быть регулярные и хаотические осцилляторы. И в данной главе также представлен обзор и анализ качественных свойств базовых нелинейных динамических моделей колебательных систем с регулярной динамикой и хаотической динамикой.

Рассмотрены наиболее распространенные модели систем регулярных осцилляторов: осциллятора Ван дер Поля, генератора Релея, модели Пуанкаре и модели бросселятора, которым свойственен колебательный характер изменения переменных во времени и наличие в их пространстве состояний аттракторов типа «предельный цикл». Такие аттракторы имеют размерность фазового пространства равную 1 и поэтому малоэффективны для хранения информации.

Наиболее эффективными с этой точки зрения являются системы с хаотической динамикой, обладающие в пространстве состояний так

называемыми «странными» аттракторами. В связи с этим, в работе проведен обзор и исследованы качественные характеристики базовых математических моделей нелинейных колебательных систем с хаотической динамикой, таких как модель Лоренца, Ресслера, МГИН Анищенко-Астахова, генератора Чуа. Математические модели таких систем включают в себя в основном полиномиальные нелинейности, распространенные во многих объектах различной природы.

Отличительной особенностью странных (хаотических) аттракторов является фрактальность их геометрической структуры, дробная метрическая размерность, высокая чувствительность к начальным условиям и непредсказуемость поведения. Поэтому подобные системы обладают с информационной точки зрения универсальными свойствами и идеальны как для хранения информации, так и для сжатия, т.е. обработки информации.

Во второй главе исследованы различные методы обработки информации, с целью скрытой передачи данных, основанные на применении хаотических систем. Исследован метод глобальной реконструкции динамической системы, как метод обработки и скрытой передачи информации. Рассмотрен общий подход к реконструкции информационных сигналов с использованием параметрически модулированных хаотических генераторов. На основе метода АКАР разработан метод синтеза нелинейного динамического наблюдателя для текущей идентификации «управляющего параметра» с целью последующего восстановления структуры аттрактора и восстановления скрытой информации.

Метод динамической обработки и защиты информации на основе глобальной реконструкции динамической системы. Исходная динамическая система, генерирующая обрабатываемый сигнал, описывается нелинейными дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, \mu^0), \quad x \in R^n, \mu^0 \in R^m,$$

(1)

где x – вектор переменных состояния ХГ, F – вектор правых частей модели ХГ, μ^0 – вектор постоянных номинальных параметров ХГ. Отдельные параметры вектора μ^0 достаточно медленно модулируются передаваемыми информационными сигналами $\mu_i(t)$. В результате образуются новые параметры ХГ:

$$\mu_i^*(t) = \mu_i^0 + \mu_i(t), \quad i = 1, \dots, m,$$

(2)

где μ_i^0 – постоянные значения параметров системы (1), $\mu_i(t)$ – информационные сигналы.

Условия медленной модуляции можно представить в форме следующего неравенства:

$$\left| \frac{d\mu_i}{dt} \right| \ll \left| \frac{dx_j}{dt} \right| \quad (3)$$

для любых i и j . Тогда система уравнений (1) с учетом (2) принимает вид:

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}^0 + \boldsymbol{\mu}(t)), \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\mu}^0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_m^0)$, $\boldsymbol{\mu}(t) = (\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t))$.

Путем соответствующей замены переменных модели многих ХГ вида (4) преобразуется к виду:

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \quad \dot{x}_2 = x_3; \quad \dots \quad \dot{x}_{n-1} = x_n; \quad \dot{x}_n = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}^*) \quad (5)$$

Далее генерируемый сигнал, например $x_n(t)$, передается в канал связи, а на принимающей стороне значения сигналов $x_1(t), \dots, x_{n-1}(t)$ получают последовательно путем интегрирования системы уравнений (5). При этом на принимающей стороне по известным значениям сигналов $x_i(t), i = 1, \dots, n$ вычисляются параметры $\boldsymbol{\mu}^*$ посредством метода наименьших квадратов на основе уравнения

$$f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}^*) = 0. \quad (6)$$

В конечном итоге реконструированные информационные сигналы находятся из выражения (2), т.е.

$$\hat{\mu}_i(t) = \hat{\mu}_i^*(t) - \mu_i^0,$$

здесь $\hat{\mu}_i(t)$ – реконструированный информационный сигнал, $\hat{\mu}_i^*(t)$ – реконструированный модулированный параметр. Это означает, что, согласно (3), подход к реконструкции сигналов по своей сути является статическим со всеми вытекающими отсюда последствиями. Условие (3) требует выбора такого временного окна t^* , что в его пределах значения параметров $\mu_i^* \approx const$ допустимо еще считать практически постоянными. Иначе говоря, в течение времени t^* неавтономность системы (4) в расчет не принимается. Тогда, скользя временным окном вдоль несущего сигнала, например, $x_n(t)$ можно на основе математической модели ХГ (5) осуществить выделение сигналов модуляции $\mu_i(t)$ в реальном времени. Однако в нелинейной динамике хорошо известно свойство повышенной чувствительности ХГ типа

Лоренца, Релея и др. к малым изменениям их «управляющих параметров» и начальных условий.

В этой связи, находясь в рамках идеологии глобальной реконструкции, предлагается динамический метод обработки информации, основанный на текущем вычислении параметров $\mu_i^*(t)$ с помощью синергетического наблюдателя.

Предлагаемые методика и синтез динамического наблюдателя проиллюстрированы на конкретном примере ХГ, представленного моделью Лоренца:

$$\dot{x}(t) = \sigma(y - x); \quad \dot{y}(t) = rx - y - xz; \quad \dot{z}(t) = -bz + xy, \quad (7)$$

здесь $\mathbf{x} = (x, y, z)$ – вектор переменных состояния, $\mathbf{\mu}^0 = (\sigma, r, b)$ – вектор постоянных (номинальных) параметров.

Для этого вначале преобразована модель (7) к виду (5), для чего используем замену переменных:

$$X = x; \quad Y = \sigma(y - x); \quad Z = \sigma((r + \sigma)x - (\sigma + 1)y - xz).$$

В результате получена новая система

$$\dot{X}(t) = Y; \quad \dot{Y}(t) = Z; \quad \dot{Z}(t) = f(X, Y, Z, \mathbf{\mu}^0), \quad (8)$$

где

$$f(X, Y, Z, \mathbf{\mu}^0) = b\sigma X r_1 - b(\sigma + 1)Y - (b + \sigma + 1)Z - X^2 Y - \sigma X^3 + \frac{Y((\sigma + 1)Y + Z)}{X};$$

$$r_1 = r - 1.$$

(9)

Далее рассмотрим новый управляющий параметр генератора Лоренца:

$$r^*(t) = r + \mu(t). \quad (10)$$

Для этого будем полагать, что в канал связи передается сигнал $Z(t)$, сгенерированный системой (8-10), причем приняты следующие допущения: модулирующий сигнал $\mu(t)$ является кусочно-постоянным, т.е. осуществляется передача цифровой информации; параметры σ, b – известны, а параметр $r(t) > 0$ является модулируемым параметром. В зависимости от значения параметра r (при постоянстве σ, b), например, при $24,74 < r < 30,1$, в системе Лоренца (7) наблюдается хаотический режим функционирования, т.е. осуществляется генерация хаотических колебаний.

В этой связи предложена процедура построения наблюдателя за параметром $r_1 = r - 1$ на принимающей стороне для системы (8). Для

этого, неизвестный параметр заменяется его динамической моделью, отражающей эволюцию этого параметра. В нашем случае это модель вида $\dot{w}(t) = 0$, поскольку решением этого дифференциального уравнения является $w(t) = const$, что и отражает скачкообразное изменение во времени параметра $r_1(t)$. На этом основании сформирована следующая расширенная система:

$$\dot{X}(t) = Y; \quad \dot{Y}(t) = Z; \quad \dot{Z}(t) = b\sigma Xw + G_1; \quad \dot{w}(t) = 0, \quad (11)$$

где $G_1 = -b(\sigma + 1)Y - (b + \sigma + 1)Z - X^2Y - \sigma X^3 + \frac{Y((\sigma + 1)Y + Z)}{X}$, w – переменная состояния динамической модели параметра r_1 .

Как видно, в системе (11), в отличие от (8), параметр r_1 заменен переменной состояния модели w . В системе (11) наблюдаемыми (известными) являются переменные X, Y, Z , а ненаблюдаемой (неизвестной) переменной – w . Пусть \hat{w} – искомая оценка параметра r_1 , т.е. $\hat{w} = \hat{r}_1$. Для построения оценки этого параметра введем макропеременную

$$\psi = w - \hat{w} \quad (12)$$

и запишем уравнение редукции

$$\dot{\hat{w}} = Q(X, Y, Z) + v_1, \quad (13)$$

где $Q(X, Y, Z)$ – неизвестная функция от наблюдаемых переменных состояния системы (11), v_1 – переменная состояния динамического наблюдателя. Тогда производная по времени уравнения редукции принимает вид

$$\frac{d\hat{w}}{dt} = \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} \frac{dX}{dt} + \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} \frac{dY}{dt} + \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} + \frac{dv_1}{dt}. \quad (14)$$

Макропеременная (12) должна удовлетворять функциональному уравнению:

$$\dot{\psi}(t) + L(X, Y, Z)\psi = 0, \quad (15)$$

где $L(X, Y, Z)$ – неизвестная функция, обеспечивающая устойчивость уравнения (15).

Производная по времени макропеременной (12) имеет вид

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{dw}{dt} - \frac{d\hat{w}}{dt}.$$

Тогда, подставив в это уравнение соответствующие выражения (11)-(14), получим

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} Y - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} Z - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} (b\sigma X w + G_1) - \\ & - \frac{dv_1}{dt} + L(X, Y, Z)(w - \hat{w}) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Поскольку уравнение наблюдателя не должно содержать в себе ненаблюдаемые переменные состояния, то необходимо выписать из уравнения (16) все слагаемые, содержащие ненаблюдаемую переменную w :

$$w \left(-\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} b\sigma X + L(X, Y, Z) \right) = 0.$$

Это равенство выполняется при условии

$$-\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} b\sigma X + L(X, Y, Z) = 0, \quad (17)$$

так как $w \neq 0$. Тогда из (17) следует соотношение

$$\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} = \frac{L(X, Y, Z)}{b\sigma X},$$

проинтегрировав которое, получим

$$Q(X, Y, Z) = \frac{L(X, Y, Z)}{b\sigma X} Z. \quad (18)$$

С учетом полученного соотношения примем

$$L(X, Y, Z) = \alpha X^2, \quad (19)$$

здесь $\alpha > 0$ – постоянный коэффициент, задающий динамику (скорость) оценивания неизвестного параметра r_1 . Тогда из (18) и (19) имеем

$$Q(X, Y, Z) = \frac{\alpha}{b\sigma} XZ. \quad (20)$$

Теперь, зная $Q(X, Y, Z)$ (20) и $L(X, Y, Z)$ (19), мы можем из (16) выписать уравнение динамической составляющей наблюдателя возмущения:

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dt} &= -\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} Y - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} G_1 - L(X, Y, Z) \hat{w} = \\ &= -\left(\frac{\alpha}{b\sigma} Z\right) Y - \left(\frac{\alpha}{b\sigma} X\right) G_1 - \alpha X^2 \left(\frac{\alpha}{b\sigma} XZ + v_1\right) \end{aligned} \quad (21)$$

т.к. $\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} = 0$.

Кроме того, имеем выражение для оценки параметра r_1 :

$$\hat{w} = \hat{r}_1 = \frac{\alpha}{b\sigma} XZ + v_1.$$

(22)

Окончательно из (9) и (21) получаем:

$$\hat{r} = 1 + \hat{r}_1 = 1 + \frac{\alpha}{b\sigma} XZ + v_1.$$

(23)

Таким образом, синтезированный синергетический наблюдатель параметра r_1 состоит из двух составляющих: во-первых, динамической, заданной дифференциальным уравнением (16), и, во-вторых, статической, заданной выражением (18). Теперь из соотношения (10) найдем реконструированный на принимающей стороне информационный сигнал:

$$\mu_{\text{реконстр.}}(t) = \hat{r} - r,$$

(24)

который равен разности оцененного параметра и его номинального значения.

Смоделируем полученную систему реконструкции информации на основе ХГ Лоренца с синергетическим наблюдателем параметра. Неизменные параметры системы Лоренца (7): $b = 8/3$, $\sigma = 10$; номинальное значение модулируемого параметра $r = 24$. Информационный сигнал на передатчике $\mu(t)$ показан на рис. 1. На рис. 2 и 3 показаны результаты моделирования системы (8), т.е. ее поведение на передатчике.

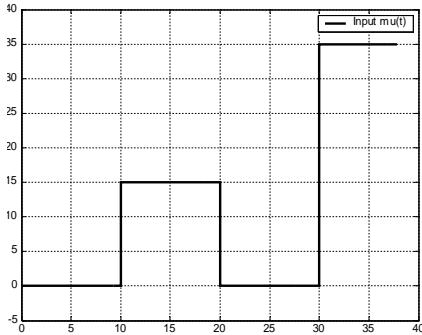


Рис. 1. – Информационный сигнал на передатчике

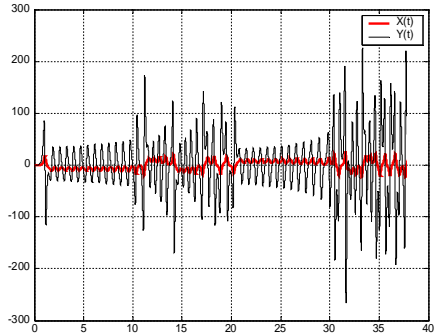


Рис. 2. – Графики изменения переменных $X(t), Y(t)$ на передатчике

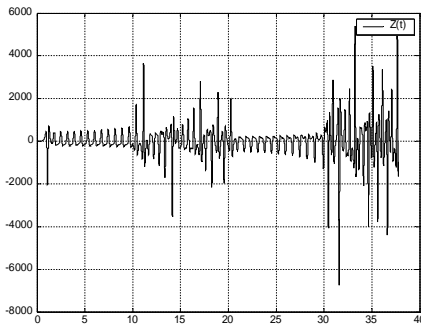


Рис. 3. – График изменения передаваемого сигнала $Z(t)$ на выходе передатчика

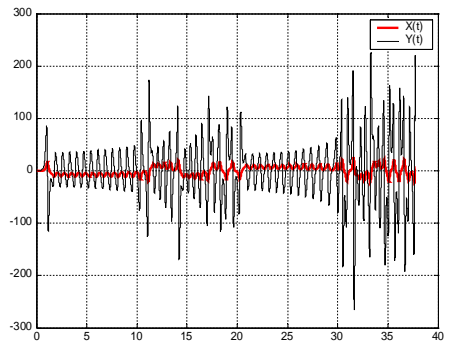


Рис. 4. – Графики изменения переменных $X(t), Y(t)$ на приемнике

Теперь выберем параметр синергетического наблюдателя: $\alpha = 0,2$. Поведение реконструированной системы (8), т.е. на приемнике, проиллюстрировано на рис. 4, а поведение оценки $\hat{r}(t)$ параметра r приведено на рис. 5. Реконструированный, согласно выражению (24), информационный сигнал на приемнике $\mu_{\text{реконстр.}}(t)$ показан на рис. 6.

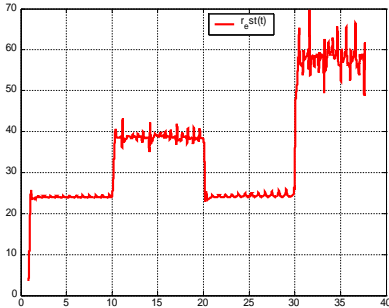


Рис. 5. – График изменения оценки параметра $\hat{r}(t)$ на приемнике

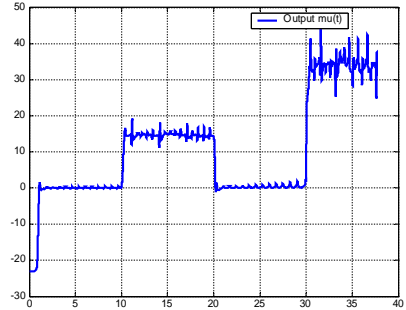


Рис. 6. – Реконструированный информационный сигнал на выходе приемника

Таким образом, предложен новый метод динамической обработки и защиты конфиденциальной информации, основанный на методе глобальной реконструкции динамики системы с использованием синергетического наблюдателя. Как следует из результатов моделирования, синтезированный наблюдатель обеспечивает достаточно точную оценку управляющего параметра $r(t)$ и реконструкцию информационного сигнала. Это позволяет применять данный метод к задаче скрытой передачи информации по каналам связи, используя в качестве несущего сигнала колебания хаотических генераторов, не смотря на их высокую чувствительность к малым изменениям «управляющих параметров» и начальных условий.

Но применяя метод АКАР, можно не только определять текущее значение «управляющего параметра», но и сформировать в сложной нелинейной системе типа Лоренца желаемые аттракторы.

Метод синтеза генераторов «управляющих параметров» в системах с хаотической динамикой. Синтезируем теперь генератор «управляющего параметра» $r(t)$. Для этого расширим модель (7), записав ее в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= y, \\ \dot{y}(t) &= -(1 + \sigma)y - \sigma(1 - r + z)x, \\ \dot{z}(t) &= -bz + \frac{1}{\sigma}xy + x^2, \\ \dot{r}(t) &= u(x, y, z) = F(t), \end{aligned} \quad (25)$$

где $u(x, y, z) = F(t)$ – генератор желаемых изменений «управляющего параметра» $r(t)$ с целью формирования соответствующих структур – аттракторов в модели Лоренца.

Итак, ставится задача: синтезировать обратную связь $u(x, y, z)$, обеспечивающую при произвольных начальных условиях x_0, y_0, z_0, r_0 формирование в структуре модели Лоренца желаемых аттракторов с соответствующими бифуркациями, например, типа «вилки». Для решения этой задачи введем, согласно методу АКАР, следующую макропеременную:

$$\psi = z - r + \mu - \alpha \cos x \quad (26)$$

Производная макропеременной ψ (26)

$$\dot{\psi}(t) = \frac{\partial \psi}{\partial z} \dot{z}(t) + \frac{\partial \psi}{\partial r} \dot{r}(t) + \frac{\partial \psi}{\partial x} \dot{x}(t), \quad (27)$$

где $\frac{\partial \psi}{\partial z} = 1$, $\frac{\partial \psi}{\partial r} = -1$, $\frac{\partial \psi}{\partial x} = \alpha \sin x$.

Тогда, подставляя ψ (26) и $\dot{\psi}(t)$ (27) в функциональное уравнение

$$T\dot{\psi}(t) + \psi = 0$$

Получим

$$\dot{z}(t) - \dot{r}(t) + \alpha \gamma \sin x + \frac{1}{T} \psi = 0$$

Подставим в это уравнение соответствующие выражения для $\dot{z}(t)$ и $\dot{r}(t)$ из (25), получим

$$-bz + \frac{1}{\sigma} xy + x^2 - u + \alpha \gamma \sin x + \frac{1}{T} \psi = 0,$$

отсюда

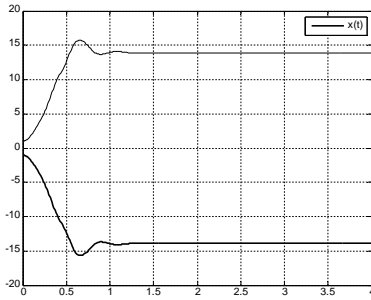
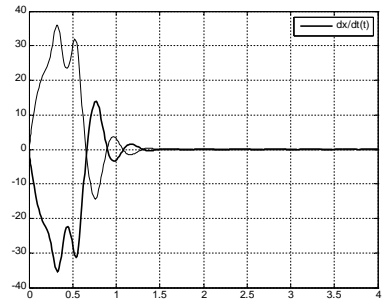
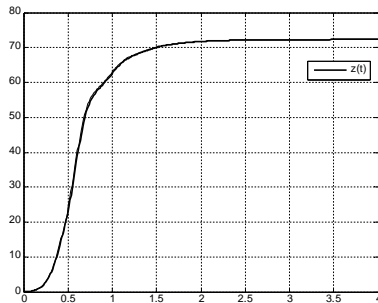
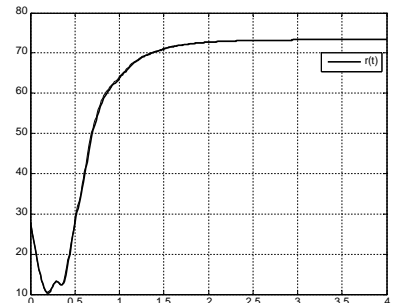
$$u = -bz + \frac{1}{\sigma} xy + x^2 + \alpha \gamma \sin x + \frac{1}{T} \psi \quad (28)$$

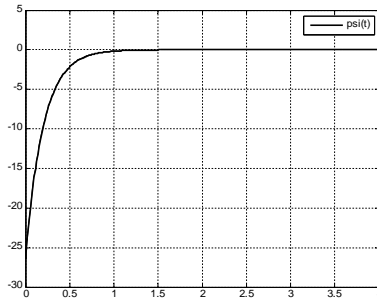
Очевидно, что система (25), (28) стартуя из произвольных начальных условий x_0, y_0, z_0, r_0 через время $t = (3+4)T$ неизбежно выходит на многообразии $\psi = 0$ (25), движение вдоль которого описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{x}_\psi(t) + (1+\sigma)\dot{x}_\psi(t) + \sigma(1-\mu + \alpha \cos x_\psi)x_\psi = 0 \quad (29)$$

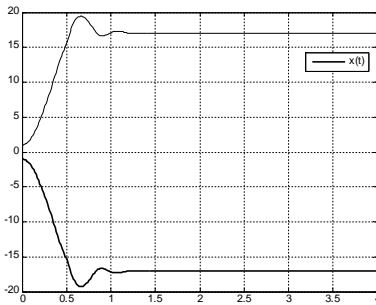
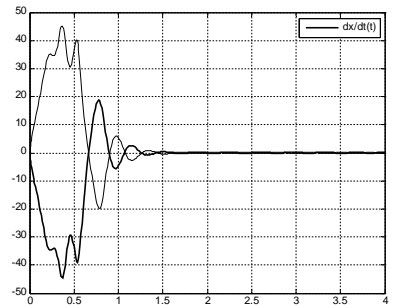
На рис. 7–11 приведены результаты моделирования системы (25), (28) для параметров $\sigma = 10$; $b = 8/3$; $\mu = 0,5$; $\alpha = -2$; $T = 0,2$ при начальных условиях $r(0) = 28$, $x(0) = 1$, $\dot{x}(0) = 0,2$, $z(0) = 0$. В этом случае, согласно структуре уравнения (29), система (25), (28) на финишном этапе своего движения выходит на аттрактор с бифуркацией

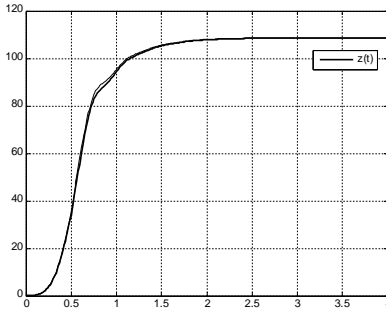
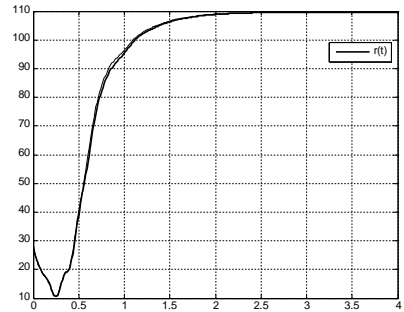
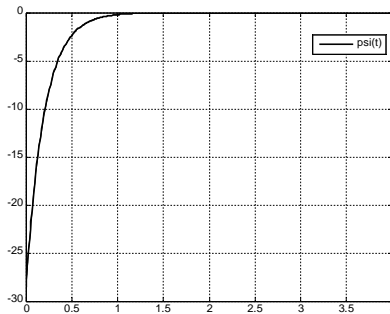
типа «вилки», параметры которой зависят от знака начальных условий по координате $\pm x_0$, что наглядно видно из рис. 7. При этом графики изменения $z(t)$, $r(t)$, $\psi(t)$ практически не различаются. Из рисунков 7–11 следует, что в системе (25), (27) не возникает каких-либо хаотических режимов движения, хотя, как известно, в модели Лоренца (7) с параметрами $\sigma = 10$; $b = 8/3$; $r_0 = 28$ такие режимы всегда существуют, при этом в установившемся режиме параметр $r = 72$.

Рис. 7 Графики изменения $x(t)$ Рис. 8 Графики изменения $\dot{x}(t)$ Рис. 9 Графики изменения $z(t)$ Рис. 10 Графики изменения $r(t)$

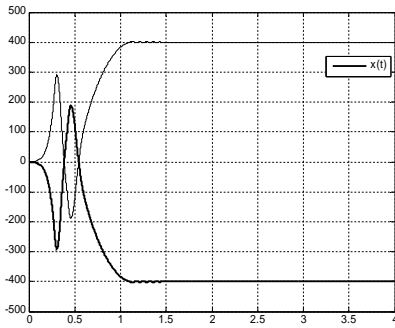
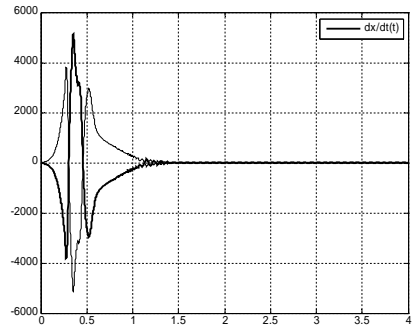
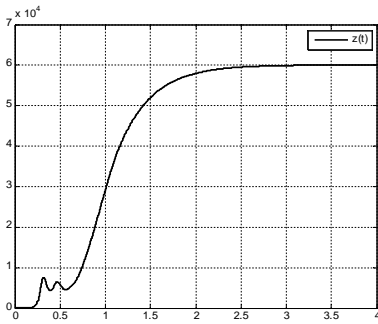
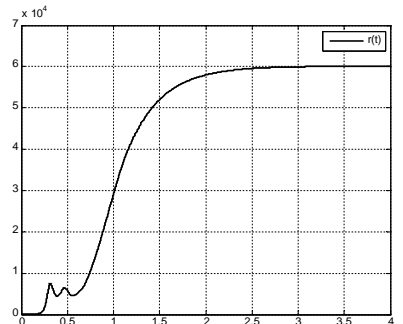
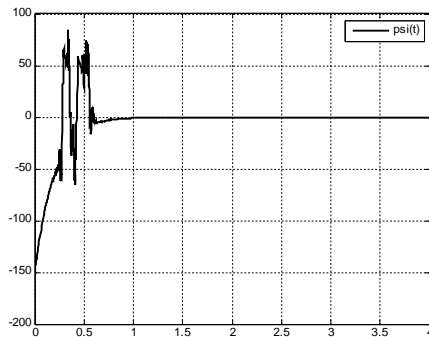
Рис. 11 Графики изменения $\psi(t)$

Аналогично на рис. 12–16 приведены результаты моделирования системы (25), (28) для параметров $\sigma = 10$; $b = 8/3$; $\mu = 0,5$; $\alpha = 2$; $T = 0,2$ при начальных условиях $r(0) = 28$, $x(0) = 1$, $\dot{x}(0) = 0,2$, $z(0) = 0$. В этом случае, система (25), (28) на финишном этапе своего движения также выходит на аттрактор с бифуркацией типа «вилки», параметры которой зависят от знака начальных условий по координате $\pm x_0$, что наглядно видно из рис. 12, при этом графики изменения $z(t)$, $r(t)$, $\psi(t)$ также практически не различаются. Из рисунков 12–16 следует, что в системе (25), (28) не возникает каких-либо хаотических режимов движения.

Рис. 12 Графики изменения $x(t)$ Рис. 13 Графики изменения $\dot{x}(t)$

Рис. 14 Графики изменения $z(t)$ Рис. 15 Графики изменения $r(t)$ Рис. 16 Графики изменения $\psi(t)$

При большом значении параметра r получаются результаты моделирования системы (25), (28), приведенные на рис. 17–21. В данном случае были выбраны параметры $\sigma = 10$; $b = 8/3$; $\mu = 0,5$; $\alpha = 2$; $T = 0,2$ и начальные условия $r(0) = 150$, $x(0) = \pm 0,5$, $\dot{x}(0) = 0$, $z(0) = 0,5$. В этом случае, система (25), (28) на финишном этапе своего движения также выходит на аттрактор с бифуркацией типа «вилки», параметры которой зависят от знака начальных условий по координате $\pm x_0$, что наглядно видно из рис. 17.

Рис. 17 Графики изменения $x(t)$ Рис. 18 Графики изменения $\dot{x}(t)$ Рис. 19 Графики изменения $z(t)$ Рис. 20 Графики изменения $r(t)$ Рис. 21 Графики изменения $\psi(t)$

Таким образом, если синтезировать генератор «управляющего параметра» $r(t)$, например вида (28), то тогда модель Лоренца

становится обычной системой дифференциальных уравнений, в которой отсутствует странный аттрактор, фрактальная размерность и хаос.

Аналогично могут быть синтезированы генераторы, формирующие в структуре модели Лоренца и другие аттракторы, например, с бифуркациями типа Андронова-Хопфа, транскритической и др.

В целом, оба метода позволяют построить новые классы систем хаосодинамической обработки и защиты информации.

В третьей главе описывается программно-моделирующий комплекс, позволяющий исследовать поведение систем с хаотической динамикой при разных значениях управляющих параметров. Данный комплекс позволяет моделировать процесс обработки информации на передатчике и процесс реконструкции сигнала на принимающей стороне, прошедшего по каналу связи.

Также построенный комплекс дает возможность моделировать работу генератора «управляющего параметра», основанного на применении метода АКАР, для управления хаотическими режимами, возникающими при функционировании комплексных систем.

В заключении диссертации приводятся основные научные и прикладные результаты, полученные автором в процессе разработки синергетических методов управления нелинейными автоколебательными системами с регулярной и хаотической динамикой, а также методов хаосодинамической обработки информации.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан синергетический метод реконструкции нелинейных систем с динамическим хаосом, основанный на процессе текущей идентификации управляющих параметров.
2. Разработана методика синергетического синтеза наблюдателей параметров хаотических систем, основанная на идее введения инвариантных многообразий – целевых аттракторов в пространстве состояний синтезируемых систем.
3. Разработан новый метод обработки и скрытой передачи информации, основанный на формировании хаотического аттрактора типа Лоренца, позволяющего осуществлять процессы обработки информации путем уменьшения числа степеней свободы в фазовом пространстве, т.е. в системе возникает процесс самоорганизации.
4. Разработан метод синтеза генераторов «управляющих параметров» в системах с хаотической динамикой типа Лоренца, позволяющие сформировать в системах с хаотической динамикой регулярные режимы движения.
5. Разработан программно-моделирующий комплекс, позволяющий исследовать поведение систем с хаотической динамикой в разных режимах их движения.

Основные положения диссертации изложены в 9 работах, из них в изданиях, входящих в перечень ВАК – 3 работы.

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Капустина А.С.** Синергетический метод синтеза систем динамической обработки информации // Труды международного Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT' 10». Научное издание в 4-х томах. – М.: Физматлит, 2010. – Т. 3. – С. 290-295.
2. **Колесников А.А., Капустина А.С.** Синергетический метод синтеза генераторов «управляющих параметров» в системах с хаотической динамикой // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – №12(113). С. 161-169.
3. **Колесников А.А., Капустина А.С.** Синергетический метод синтеза систем хаосодинамической обработки информации// Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. - Вып. 6 (34) -2010.- 15 с.- <http://ipb.mos.ru/ttb/2010-6/2010-6.html>.

Публикации в других изданиях:

4. **Колесников А.А., Капустина А.С.** Синергетический метод динамической обработки и защиты информации // Межвузовский научный сборник «Управление и информационные технологии». Пятигорск, «РИА-КМВ», 2007.- С.23-31.
5. **Шапвалов В.И., Капустина А.С., Симонова О.Н.** Информация и смысл // Сборник докладов международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2007)». – Пятигорск: Изд-во ПГТУ, 2007. – II том. – С. 46-51.
6. **Капустина А.С.** Динамическая обработка и защита информации: синергетический подход //IX Всероссийская научная конференция «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления»: Тезисы докладов. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. Т.2. – С. 152.
7. **Колесников А.А., Капустина А.С.** Метод динамической обработки и защиты информации с использованием синергетического наблюдателя// Сборник докладов 5-й научной конференции «Управление и информационные технологии (УИТ-2008)», Санкт-Петербург, 14-16 октября, 2008 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ («ЛЭТИ»), 2008. – Т.1. – С. 121-127.
8. **Ал.А. Колесников, А.Ф. Кононов, А.С. Капустина** Динамическая обработка и защита информации: синергетический подход//

Инновационные технологии XXI века в управлении, информатике и образовании: I Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Сборник тезисов. – Нальчик: Издательство М. и В. Котляровых, 2008. – С. 42-46.

9. **Kononov Anton F., Kapustina Anastasia S.** Controlled Chaos for secure communications // Book of Abstract of 2nd Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS 2009), Greece.-2009. - Pp. 39.

В работах, опубликованных в соавторстве, А.С. Капустиной принадлежат следующие результаты: в [2] разработан метод синергетического синтеза генераторов «управляющих параметров»; в [3] разработаны метод динамической обработки информации и метод синергетического синтеза генераторов «управляющих параметров»; в [4-5], [7-9] разработан метод динамической обработки и защиты информации, основанный на глобальной реконструкции динамической системы с использованием синергетического наблюдателя.

Соискатель

А.С. Капустина

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. п.л. – 1

Тираж экз. Заказ №

Издательство Таганрогского государственного радиотехнического
университета

ГСП 17 А, Таганрог – 28, Некрасовский, 44.