

Возбуждение Метастабильного Хаоса в СВЧ Приемных Устройствах в Условиях Электромагнитных Помех Ультракороткой Длительности.

Болотов В.Н., Денисов С.В., Магда И.И., Новиков В.Е., Ткач Ю.В.
Институт Электромагнитных Исследований,
Харьков-22, 310022, А.Я. 10857, Украина:
Тел./Факс +380 572 435952, E-mail: emph@iemr.vl.net.ua

Содержание

1. Введение	31
1.1. Постановка задачи о воздействии излучений УКДИ на радиоэлектронную аппаратуру	32
2. Экспериментальные исследования возбуждения хаоса в СВЧ приемных устройствах.	33
2.1. Схема экспериментального исследования.	34
2.2. Объекты тестирования.	34
2.3. Экспериментальные данные.	34
3. Информационная концепция возбуждения хаоса в радиоэлектронных устройствах	39
3.1. Механизм хаотизации радиоэлектронного устройства с помощью малоамплитудного сложно-модулированного сигнала.	40
3.2. Проблемы классификации аттракторов и статистическая псевдометрика в пространстве радиоэлектронных устройств.	41
3.2.1. Информационные аспекты символической динамики хаотических систем.	42
3.2.2. Статистическая псевдометрика на множестве последовательностей.	43
4. Анализ экспериментальных данных.	44
5. Заключение	45

Аннотация

В работе излагаются результаты цикла экспериментальных и теоретических исследований, посвященных вопросам метрологии взаимодействия с радиоэлектронной аппаратурой (РЭА) и ее элементной базой электромагнитного излучения ультракороткой длительности импульса (УКДИ), длительностью $10^{-10} - 10^{-7}$ с. Представлена также концепция адаптивного тестирования аппаратуры (АТА), ориентированная на адекватное описание реакции сложного объекта на внешнее электромагнитное воздействие (ЭМВ). Рассматривается взаимодействие полей источников УКДИ с относительно узким и сверхширокополосным (СШП) спектром излучения со сложными радиоэлектронными устройствами. На примере реакции типовых приемно-усилительных трактов (ПУТ) СВЧ диапазона показана высокое функциональное деструктивное действие УКДИ даже при относительно небольших уровнях мощности излучения. В работе исследована возможность нарушения функционирования ПУТ в результате хаотизации их внутреннего состояния под воздействием коротких импульсов СВЧ, ЭМИ и их комбинации.

1. Введение

Современная электромагнитная обстановка (ЭМО) характерна наличием полей источников излучений естественного и искусственного происхождения, которые, во многих случаях, оказывают деструктивное действие на элементную базу радиоэлектронных приборов и на условия их функционирования. Поскольку величина плотности потока энергии излучения, в дальней зоне источника, пропорциональна квадрату производной тока в антенне, то очевидно, что его эффективность $\propto \tau_p^{-2}$, где τ_p - длительность импульса или его фронта и резко возрастает для импульсов ультракороткой длительности.

Прогресс в областях современных технологий и электроники больших мощностей в последние годы в значительной степени изменил современную электромагнитную обстановку (ЭМО). Эти изменения связаны не только с расширением номенклатуры традиционных источников излучений и их параметров, но и с появлением короткоимпульсных источников излучений нового типа [1,2]. К наиболее опасным видам электромагнитных излучений можно отнести излучения ультракороткой длительности импульса, создаваемые следующими типами источников искусственного происхождения. Такими источниками являются:

- мощные коммутирующие устройства в цепях короткоимпульсных модуляторов и высоковольтной защиты силовых энергетических установок;
- скоростные переключающие элементы, цепи устройств защиты от мощных СВЧ сигналов;
- цепи скоростных устройств современной вычислительной техники и передачи информации с рабочим диапазоном частот более 0.1 – 1 ГГц;
- мощные высоковольтные модуляторы и электрофизические установки специального назначения, использующие процессы УКДИ (элементы электроники больших мощностей);
- излучатели СШП радиолокационных средств, применяемых в радиолокации высокого разрешения, а также для подпочвенного зондирования;
- некоторые виды высоковольтных несобственных или поверхностных газовых разрядов и переходных процессов, инициируемых высокоэнергетичными потоками частиц или лазерного излучения;
- некоторые виды ЯВ и сверхмощные генераторы СВЧ и ЭМИ малой длительности.

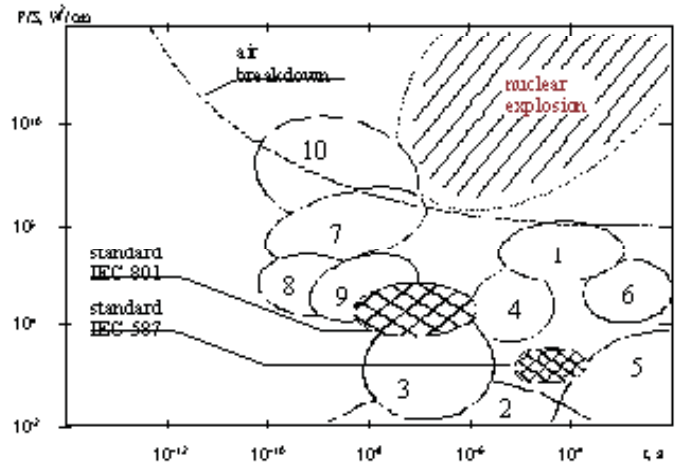


Рис. 1. Области предельных мощностей, формируемых различными видами источников излучений: 1 - электрический разряд; 2- радиовещательные станции; 3 - коммутирующие устройства; 4- высоковольтные модуляторы и радиолокационные средства; 5, 6 - токи короткого замыкания в высоковольтных устройствах различного назначения; 7 - высоковольтные модуляторы, используемые в экспериментальном оборудовании; 8 - скоростные системы передачи информации и компьютерные коммутирующие устройства; 9 - СШП радиолокаторы; 10 - мощные источники импульсов СВЧ излучения и ЭМИ малой длительности.

На Рис.1. условно показаны области предельных плотностей мощности, формируемых различными видами источников излучений. Здесь же приведены области критических параметров полей источников, регламентируемых некоторыми существующими стандартами МЭК.

Взаимодействие излучений УКДИ с относительно узким спектром (типа традиционного импульсного микроволнового излучения) или со сверхширокополосным спектром (типа ЭМИ) со сложными системами проявляется качественно иначе, чем традиционное длинноимпульсное или стационарное излучение. Это обусловлено малыми временами воздействия по сравнению с характерным временем теплового или иного релаксационного механизма в материалах и электронных структурах РЭА и ее компонентов, а также специфическим нелинейным характером реакции системы в целом.

С другой стороны, этот вид воздействующего фактора, ввиду малой длительности импульса, характерен большой широкополосностью, что обуславливает высокую проникающую способность и специфическую реакцию РЭА на сигнал УКДИ, различного вида распространяющийся в структурах устройства. Таким образом, несмотря на относительно более низкий энергетический потенциал, сигналы УКДИ, в ряде случаев, могут оказаться более эффективным деструктивным фактором

ЭМО, чем традиционные СВЧ/ЭМИ сигналы.

Причем следует обратить внимание на то обстоятельство, что речь идет не только (и не столько) об ухудшении соотношения сигнал/шум, но и о хаотизации электронных устройств.

В случае ситуации, которая в результате внешнего воздействия приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум, разработаны достаточно эффективные методы самого различного характера, позволяющие преодолеть возникающие проблемы и выделять полезную информацию на фоне шумов.

Однако, гораздо сложнее обстоит дело, когда в результате внешних воздействий имеет место хаотизация радиоэлектронной системы. В этом случае может наблюдаться не только частичное или полное искажение информации поступающей на вход системы, но и возможен переход достаточно сложной электронной системы или ее отдельных узлов и компонент в устойчивое "хаотизированное" состояние.

Характер процесса взаимодействия излучения УКДИ со сложными объектами РЭА и ее элементами, вкратце может быть сведен к следующим основным эффектам:

- антенный механизм возбуждаемых во внешних цепях и внутренних структурах токов и напряжений;
- множественность размерных и ориентационных резонансов;
- большой спектр деструктивных явлений, в том числе стрессового типа, (электрические прожоги и пробой, ударные акустические волны, адиабатический режим энерговыделения, преимущественно нетепловой механизм дефектообразования и др.);
- множественность локализаций дефектов структур (даже в результате однократного воздействия излучения УКДИ);
- характерное пространственное зонирование дефектов - периферийность энерговыделения и/или дефектообразования;
- образование неадекватных сигналов-откликов аппаратуры с длительностью в десятки - сотни раз превышающей длительность воздействия.

В хаотическом состоянии наблюдается, фактически, нарушение штатного режима функционирования системы близкое к тому виду нарушения функционирования, которое наблюдается в проблеме исследования стойкости радиоэлектронной аппаратуры. Однако, при формально схожих результатах внешнего воздействия, в основе нарушения штатного режима функционирования лежат различные

физические процессы. Так, в проблеме исследования стойкости, нарушение штатного функционирования, в основном, обусловлено изменением параметров как всей системы, так и отдельных ее узлов и элементов под воздействием внешних полей и сигналов с амплитудой, сравнимой или превышающей значения, допустимые для устройств данного класса. В том же случае, когда речь идет о "хаотизации" системы, в основе этого эффекта лежат более тонкие физические процессы, не только приводящие к сильному искажению рабочих сигналов или даже к их полному исчезновению, но и к переходу всей электронной системы в устойчивый режим функционирования сильно отличающийся от штатного. Таких режимов, не совпадающих с штатным, может быть один или даже несколько. Что существенно для режима "хаотизации", так это то, что в этом случае, в отличие от проблемы стойкости, амплитуда внешнего сигнала может даже не превышать верхнюю границу динамического диапазона исследуемого устройства, а если и превышает, то не очень сильно.

Таким образом, использование тонких физических эффектов, лежащих в основе "хаотизации" радиоэлектронной системы с помощью внешних воздействующих сигналов малой амплитуды, позволяет не только нарушать ее штатное функционирование и вызывать необратимое изменение ее параметров, но и фактически управлять ее состоянием.

Однако, следует отметить, что, как показали ранее проведенные исследования, в этом случае, хотя эффективное воздействие может осуществляться импульсами электромагнитного излучения малой амплитуды, но его эффективность в значительной степени определяется формой, спектральными характеристиками и законом следования внешних воздействующих импульсов.

1.1. Постановка задачи о воздействии излучений УКДИ на радиоэлектронную аппаратуру

Воспроизводимость сигнала-отклика на воздействие информационного внешнего сигнала и его неискаженная передача к устройствам анализа является обязательным свойством приемной аппаратуры. Поэтому адекватный прием и обработка информации должны обеспечиваться однозначностью преобразования сигнала вход-выход и стационарностью (квазистационарностью) условий приема. Понятие стационарности может быть определено в этом случае как неизменность функции преобразования сигнала в течение сеанса работы, которое нарушается лишь при малом временном масштабе процесса воздействия $\tau_p r_{oc}$, сравнимом с временем релаксации системы в нормальное состояние $\tau_r < \tau_p r_{oc}$.

Как известно, воздействие интенсивного внеш-

него воздействующего фактора (ВВФ) может приводить к нарушению адекватных условий приема. Превышение энергетического порога, вызывает в сложном электронном устройстве деструктивные явления (обратимого или необратимого характера), которые переводят систему в состояние с измененными параметрами. В результате время релаксации меняется и может становиться достаточно большим $\tau_r \gg \tau_{proc}$, а общее состояние системы может трактоваться как функциональный сбой. Достаточно неожиданным является сбой устройства при воздействии энергетически слабых сигналов.

Нами было показано [1], что, в отличие от очевидных деградационных воздействий, действие достаточно слабого надпорогового внешнего сигнала ультракороткой длительности (УКД) на чувствительные элементы электронных устройств также может приводить к неустойчивости системы и увеличению времени τ_r , что формально можно рассматривать как соответствие тому же неравенству и сбою системы. Таким образом, временной параметр τ_r является одним из важных предельных параметров, определяющих нарушение функционирования системы, (например, адекватного приема), как энергетический порог деградации определяет нарушение ее физического состояния.

В дополнительных исследованиях приемно-усилительных трактов (ПУТ) микроволнового диапазона было отмечено изменение τ_r в зависимости от сложности спектрального состава надпороговых сигналов [2]. Это различие в действии узкополосного и сверхширокополосного импульсных УКД сигналов, превышающих порог линейности входных устройств, связывалось с неоднородными граничными условиями в приемных трактах для различных частот спектров нелинейных откликов воздействующих УКД сигналов.

Несколько позже мы обратили внимание на то, что в результате воздействий относительно слабых внешних сигналов УКД, неадекватность физически работоспособной приемной системы (изменение τ_r и ухудшение соотношения сигнал-шум) было связано с развитием в устройстве состояний динамического хаоса [3].

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование условий и результатов развития процесса хаотизации в высокочувствительных ПУТ СВЧ диапазона при воздействии узкополосного микроволнового и сверхширокополосного видеоимпульсного излучений УКД малой амплитуды и их комбинаций.

2. Экспериментальные исследования возбуждения хаоса в СВЧ приемных устройствах.

Поскольку, в силу своего функционального назначения, внешнему воздействию наиболее подвержены входные цепи различных радиоэлектронных устройств, то в качестве объекта исследования был выбран высокочувствительный приемно-усилительный тракт, являющийся элементом активной фазированной решетки (АФАР) с рабочей частотой 3.11 ГГц.

Кроме того, дополнительно исследовался приемно-усилительный тракт с рабочей частотой 2. ГГц ранее исследовавшийся в экспериментах по электромагнитной совместимости. Сравнивая результаты, полученные для этого тракта, по электромагнитной совместимости с полученными результатами по его хаотизации, можно оценить эффективность нарушения функционирования под воздействием внешних СВЧ импульсов и ЭМИ, а также их комбинации обусловленные эффектом "хаотизации" и связанное с этим изменение параметров отдельных узлов, блоков и элементной базы.

Таким образом, в рамках данной работы исследована возможность нарушения функционирования приемно-усилительных трактов в результате их "хаотизации" под воздействием коротких импульсов СВЧ, ЭМИ и их комбинации, представляющей собой комбинированный импульс.

В работе излагаются результаты цикла экспериментальных и теоретических исследований посвященных вопросам метрологии взаимодействия с радиоэлектронной аппаратурой (РЭА) и ее элементной базой электромагнитного излучения ультракороткой длительности импульса (УКДИ), длительностью $10^{-10} - 10^{-7}$ с. Представлена также концепция адаптивного тестирования аппаратуры (АТА), ориентированная на адекватное описание реакции сложного объекта на внешнее электромагнитное воздействие (ЭМВ).

Рассматривается взаимодействие полей источников УКДИ с относительно узким и сверхширокополосным спектром излучения со сложными радиоэлектронными структурами, и в частности, рассматриваются также процессы неразрушающего характера. На примере реакции типовых приемно-усилительных трактов СВЧ диапазона, показано высокое функциональное деструктивное действие фактора даже при уровнях мощности излучения значительно меньших уровней появления деградационных эффектов в микроструктурах РЭА.

2.1. Схема экспериментального исследования.

Схема экспериментального оборудования приведена на рис.2. Рабочая зона экспериментов создавалась безэховой камерой полуоткрытого типа, в которую могли выводиться излучения различных источников излучений УКД - узкополосного микроволнового (УП СВЧ) и сверхширокополосного видеоимпульсного (СШП ВИ). Параметры источников излучений и возможные режимы воздействий приведены в таблице 1.

Аппаратура управления, регистрации и энергообеспечения располагалась в отдельном экранированном помещении, оборудованном электрическими фильтрами и связанном с рабочей зоной линиями с двойным экранированием. Сигналы источников излучений УКД контролировались мониторами, имеющими независимые СШП антенны в рабочей зоне.

Сигналы - отклики ПУТ регистрировались с помощью широкополосных детекторов, устанавливаемых на выходе различных элементов исследуемых устройств.

Сигналы - отклики передавались либо на вход скоростного широкополосного осциллографа (с рабочей полосой до 3.5 ГГц) либо на стробоскопический осциллограф с минимальным временем выборки (окном стробирования) 0.07 нс. Затем они оцифровывались 12-разрядным АЦП, и эти массивы заносились в буфер ЭВМ для дальнейшей обработки. Характерное количество временных точек одного массива выбрано порядка 1000. Усреднение данных, соответствующее требованиям обработки применяемыми методами, производилась по 100 реализациям.

2.2. Объекты тестирования.

В качестве объектов исследования были выбраны входные модули ПУТ, которые являются элементами различных устройств связи СВЧ диапазона. Исследования включали эксперименты со стандартными элементами ПУТ - защитными устройствами (ЗУ), полосовыми фильтрами и малошумящими усилителями (МШУ). Эти устройства в зависимости от рабочих параметров были различных типов (волноводного, коаксиального и микрополоскового), созданы на основе различных технологий и различной элементной базе.

2.3. Экспериментальные данные.

Результаты проведенных исследований создают представление об особенностях нелинейной динамики приемных модулей СВЧ диапазона и их пассивных и активных компонентов в условиях воздействия УКД сигналов:

- Характер амплитудной зависимости сигналов - откликов ПУТ и его активных компонентов на воздействие сигналов УКД качественно в целом соответствовал их реакции на стационарные и квазистационарные сигналы.

Типичный спектр этих явлений в МШУ, по мере увеличения амплитуды входного сигнала УКД, содержал известные стадии преобразования сигнала - линейную, нелинейную, насыщение, значительное уменьшение (вплоть до нуля) коэффициента усиления или "ослепление" ПУТ, рис.3.

- При достаточно большой амплитуде сигналов воздействия УКД реакция всех видов исследуемых ПУТ сопровождалась изменением формы и сложными колебаниями сигнала - отклика, содержащими несколько характерных временных масштабов. При больших значениях входных сигналов УКД $I_N/I_{N.LIM} = 10 - 100$ интересно отметить уменьшение коэффициента усиления МШУ, составляющее значительную часть сигнала - отклика ПУТ. Увеличение длительности этой фазы сигнала - отклика соответствовало увеличению I_N . Эта компонента отклика при еще больших $I_N/I_{N.LIM} = 100 - 1000$ принимала характер низкочастотной релаксации с периодом примерно равным τ_R прибора, полученной в условиях до появления НЧ модуляции. Появление этой компоненты в динамике ПУТ свидетельствует о параметрической связи режима питания МШУ и, соответственно, его коэффициента усиления с I_N .
- В частях ПУТ, содержащих только пассивные элементы (антенны, тракты передачи, фильтры и защитные устройства), также возбуждались хаотические отклики. Их хаотизация в условиях воздействия сигналов УКД, по-видимому, обусловлена конструктивными неоднородностями или относительной узкополосностью некоторых из них. В защитных устройствах, содержащих диоды с нелинейной характеристикой, наблюдалось некоторое увеличение порога хаотизации при одновременном действии гармонического и УКД сигналов (в режимах $IV + I$, $IV + II$ и $IV + V$).

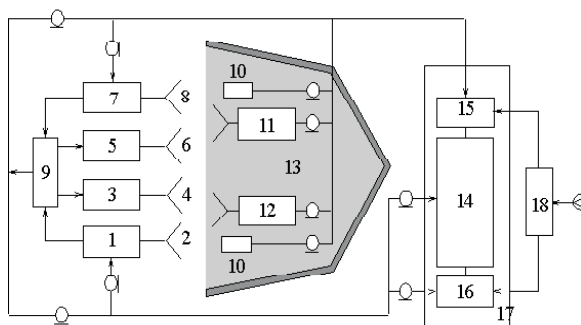


Рис. 2. Блок-схема экспериментального стенда для исследования хаотизации приемно-усилительных трактов. 1 и 2 - импульсный СВЧ генератор и антенна УКД с несущей частотой $f_0=2.0$ ГГц; 3, 5 и 4, 6 - генераторы и антенны видеоимпульсов УКД; 7 и 8 - импульсный СВЧ генератор и антенна с несущей частотой $f_0 = 3.11$ ГГц; 9 - генератор синхронизации и управления режимом работы источников излучения; 10 - мониторы параметров электромагнитных полей в рабочей зоне; 11 - испытуемый приемно-усилительный тракт с рабочей частотой $f_0 = 3.11$ ГГц; 12 - испытуемый приемно-усилительный тракт с рабочей частотой $f_0 = 2.0$ ГГц; 13 - частично экранированная безэховая камера (рабочая зона); 14 - аппаратный комплекс для контроля и регистрации характеристик исследуемых ПУТ, параметров полей в рабочей зоне, а также выходных характеристик генераторов СВЧ и видеоимпульсов; 15 - система сбора и обработки информации; 16 - аппаратный комплекс регистрации характеристик полей в рабочей зоне; 17 - экранированная камера; 18 - устройства системы электропитания и фильтрации помех.

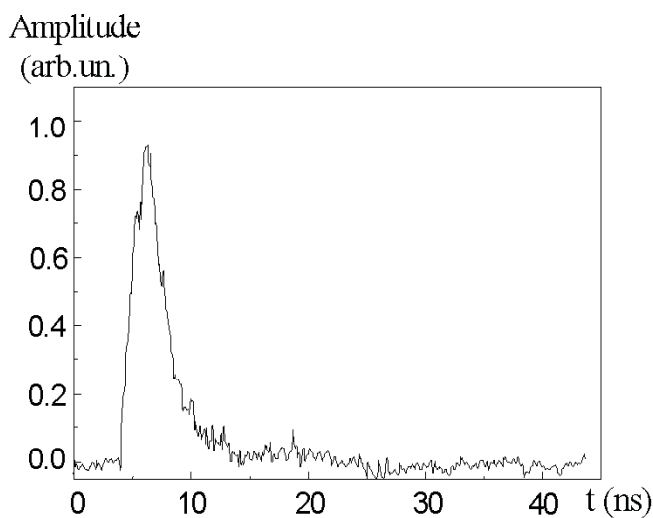


Рис. 3. Воздействующий импульс

Таблица 1. Параметры источников излучений УКД, используемых в тестах.

N	Тип	Режим	Дл. Импульса нс	Передний Фронт нс	Частот. диапазон ГГц	Ширина Полосы ГГц	Режим Работы	Мощн. Импульса Вт
I	УП СВЧ	УКДИ	30	5-6	1.7/2.0	0.07	Один./до 10кГц	до 20
II	УП СВЧ	УКДИ	30	5-6	3.0/3.1	0.08	Один./до 10кГц	до 15
III	УП СВЧ	УКДИ	10-20	5-6	9.4/10.0	0.07	Один./до 10кГц	до 4
IV	УП СВЧ	Непр.			2.0-12.0	до 0.05	Непр.	до 0.2
V	СШП	УКДИ	0.5-10	0.8	0.2-1.0		Один./до10кГц	до 10^4
VI	СШП	УКДИ	2/30	0.05/0.2	2-15		Один./до10кГц	до 10^3

Таблица 2. Особенности устройств и возможные режимы тестов хаотической динамики.

Тип ПУТ	Полоса Частот, ГГц	Технология ПУТ	Нелин. комп.ЗУ	Нелин. комп.МШУ	Режим теста
Интегр. Коаксиал./ Плоский	1.7 - 2.0	Гибрид.	PIN-диод	GaAs ПТШ	I,IV,V,VI, I+IV,I+V,I+VI
Микропол. Плоск.	3.0 - 3.1	Гибрид./ Монолит.	PIN-диод или транзистор	GaAs ПТШ	II,IV,V,VI, II+IV,II+VI,IV+V
Волновод	9.0-10.0	Вакуум	Сборка.PIN-диод	ЛБВ	III,IV,VI, III+IV,III+VI

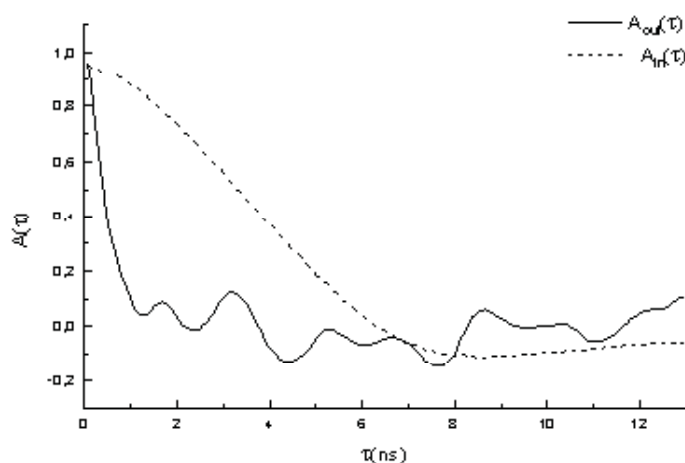


Рис. 4. Автокорреляционная функция для воздействующего импульса и сигнала-отклика.

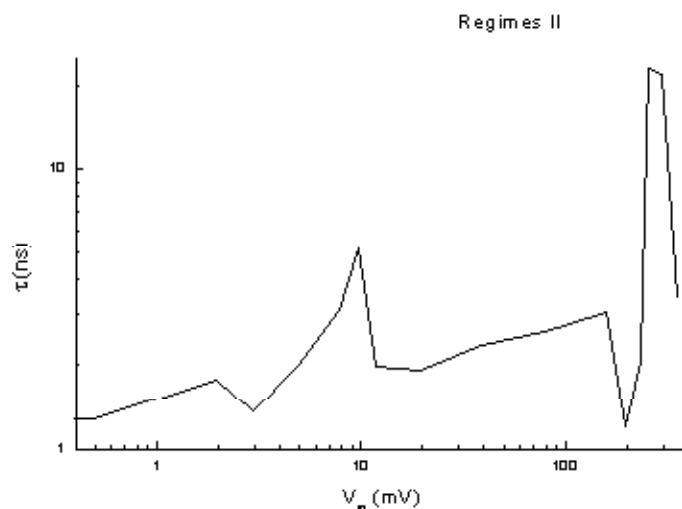


Рис. 5. Время потери автокорреляции в сигнале отклике в зависимости от начальной амплитуды сигнала.

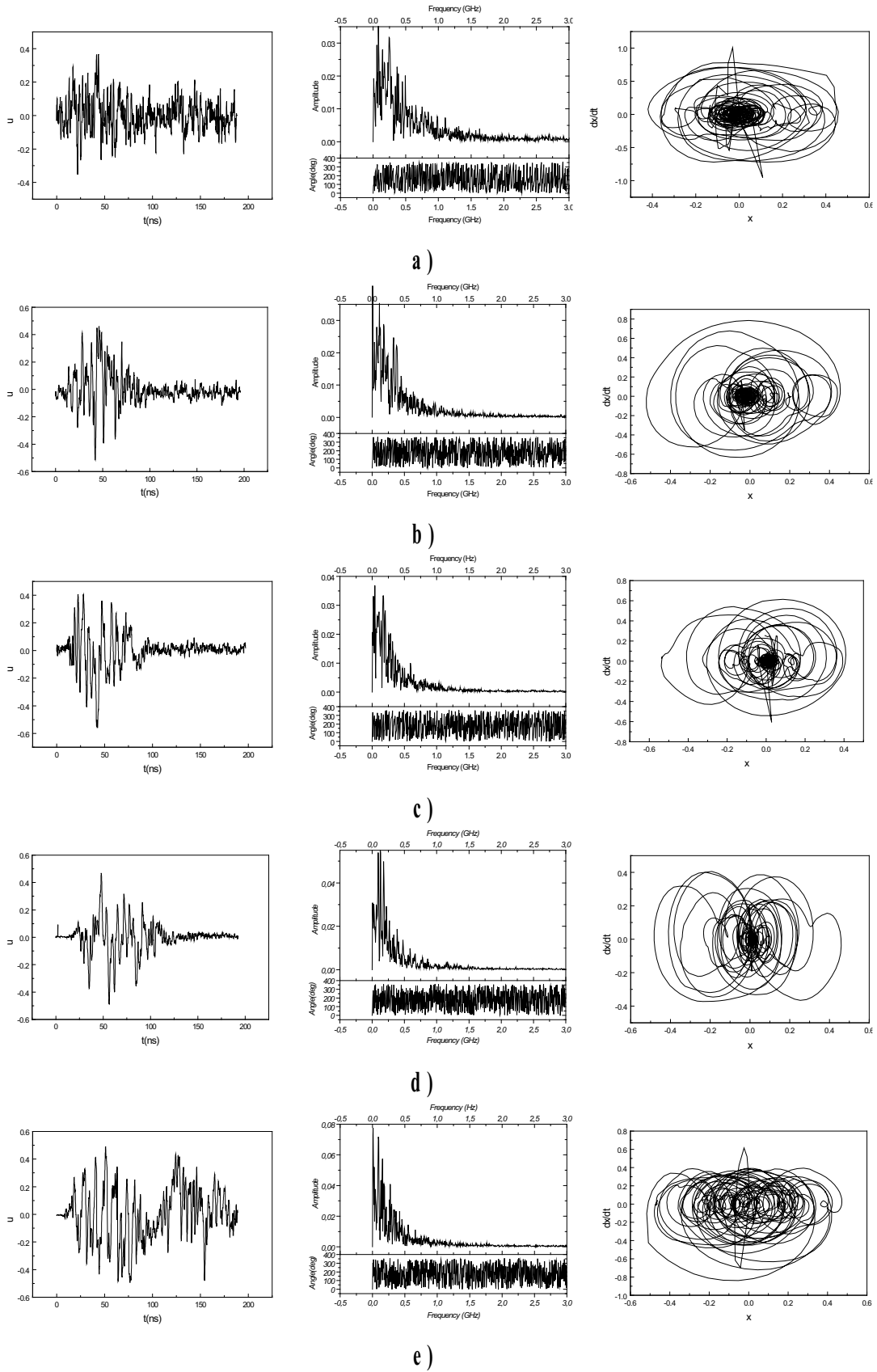


Рис. 6. Хаотизация сигналов в ПУТ 3.11 ГГц под воздействием одиночного СШП импульса различной мощности. (а-0.07 мВт; б-0.3 мВт; в-0.7 мВт; д-5.7 мВт; е-51 мВт).

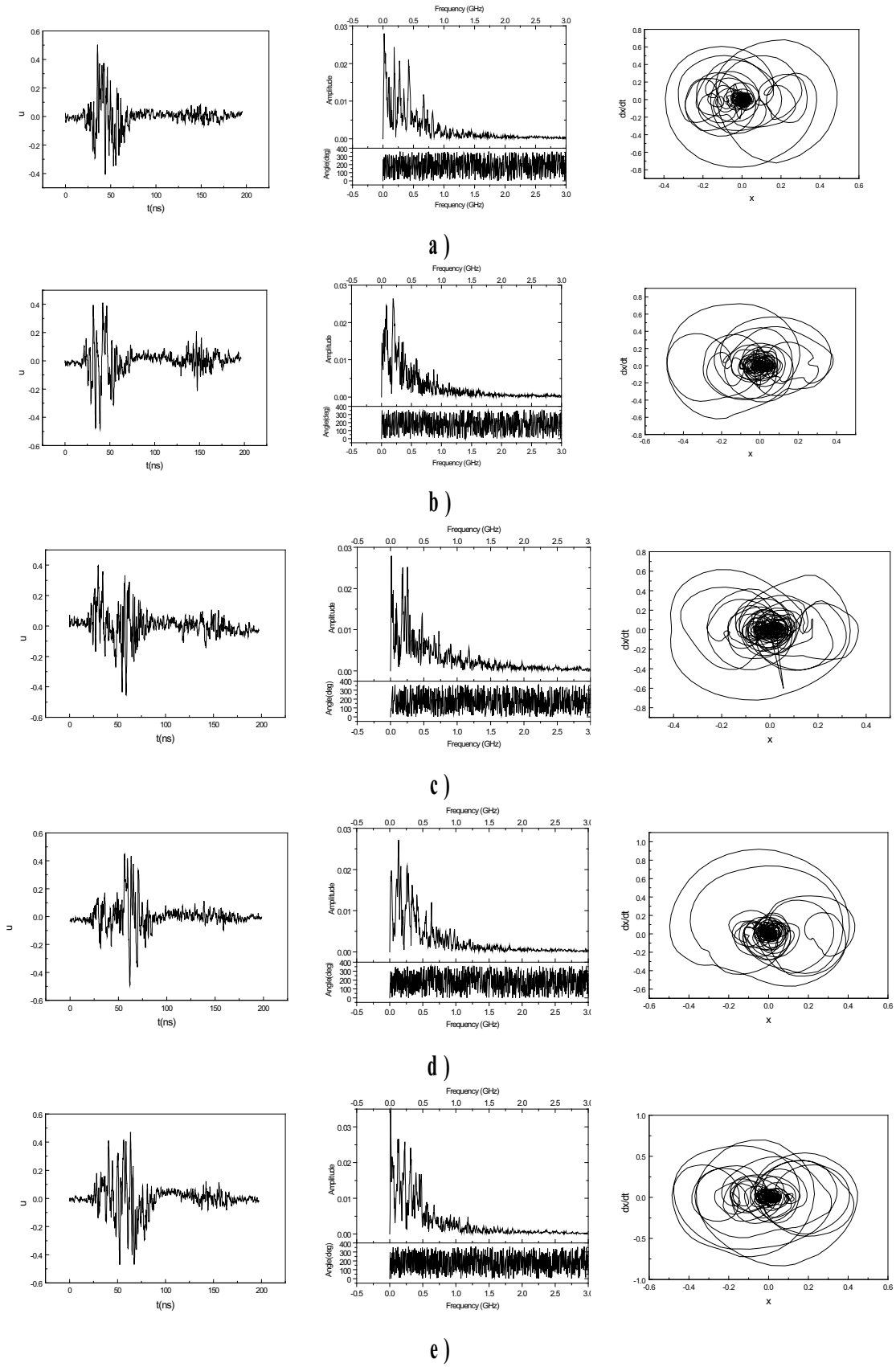


Рис. 7. Хаотизация сигналов в ПУТ 3.11 ГГц под воздействием комбинированного импульса различной мощности (СШП импульс + СВЧ импульс с задержкой 10 нс; а-0.07 мВт; б-0.3 мВт; в-0.7 мВт; д-5.7 мВт; е-51. мВт).

3. Информационная концепция возбуждения хаоса в радиоэлектронных устройствах

Современное радиоэлектронное устройство (РЭУ) представляет собой сложную систему, обладающую многоуровневой иерархической организацией, динамика которой имеет существенно нелинейный характер. Такая структура РЭУ определяется сложностью задач, которые ей необходимо решать. В тоже время и современная электромагнитная обстановка становится все более и более сложной, в связи с чем работа РЭУ предполагает наличие массивованных потоков информации как между блоками РЭУ, так и между РЭУ и его электромагнитным окружением.

Поэтому, с нашей точки зрения, следует различать два режима работы радиоэлектронных устройств:

- Функциональный.
- Информационный.

Функциональный режим работы определяется областью в пространстве параметров внешнего воздействия, ограниченной пороговыми значениями нарушения функционирования, связан с необратимым изменением рабочих параметров РЭУ, превышающих допустимые для нормальной эксплуатации значения для всего устройства и для его отдельных компонент.

Информационный режим работы РЭУ ограничен пороговыми значениями, определяемыми нарушением функционирования (После прекращения внешнего воздействия, наблюдается полное восстановление штатных характеристик устройства). Однако в отличие от функциональных режимов работы, информационные режимы имеет принципиально иную обусловленность.

Информационные потоки в радиоэлектронных устройствах имеют электромагнитную природу. Интенсивность этих потоков связана со сложностью иерархической структуры радиоэлектронной аппаратуры. Электромагнитная природа этих потоков определяет информационную природу взаимодействия внешних электромагнитных сигналов и радиоэлектронных устройств. Таким образом существует возможность не выходя за рамки функционального уровня (штатного режима работы) существенно воздействовать на работу электронных устройств и управлять ими на информационном уровне малоамплитудными сигналами сложной информационной структуры.

Результаты натурных и численных экспериментов указывают на возможность возбуждения хаотического режима в сложном РЭУ при помощи импульсных воздействий. Динамика системы при этом определяется "квазиаттрактором"- притягивающим множеством в фазовом пространстве системы, имеющего структуру странного аттрактора, и являющееся динамическим "ответом" системы на импульсное воздействие. При этом штатный режим работы РЭУ (при отсутствии импульсного воздействия) может быть принципиально нехаотичным. В основе предлагаемого подхода, лежит

представление о двух принципиально разных методах воздействия на РЭУ.

Первый метод определяется как "силовой", действие которого определяется амплитудными (энергетическими) характеристиками действующего сигнала. Эффективность таких воздействий определяется степенью функциональных нарушений работы РЭУ. Принципиально другим подходом является концепция информационного воздействия.

Цели такого воздействия могут быть определены как управление, т. е. выведение РЭУ из штатного режима функционирования и перевод его в непредусмотренный режим работы ("хаотизация") без нарушения при этом функциональной целостности и необратимых изменений элементной базы. Энергетические характеристики внешнего воздействия при этом могут быть на несколько порядков ниже пороговых. Возможность такого влияния сигналов на аппаратуру определяется сложной временной структурой внешнего воздействия, так что последнее представляет собой аperiodический сложно-модулированный сигнал.

Объединяя эти два подхода в понятие эффективности воздействия, понимая под последним степень отклонения работы РЭУ от штатного режима, мы полагаем что она может быть представлена как некая функция двух параметров:

$$F = F(K, E) \tag{1}$$

где обобщенный параметр K определяется сложностью данного сигнала, а E – энергетическими характеристиками. Силовой подход характеризуется при этом $K \cong 0$, а $E > E_k$, где E_k определяется пороговыми характеристиками РЭУ. Нулевая сложность сигнала при таком методе воздействия ясна из того, что при этом пользуются, как правило, либо одиночным импульсом, либо периодической последовательностью импульсов. Возможность возбуждения хаотических режимов в приемно-усилительном тракте (ПУТ) под воздействием последовательности импульсов экспериментально была показана выше.

В случае информационного воздействия значение переменных в формуле (1). В этом случае в качестве сигнала может использоваться, например, сложно-модулированная последовательность импульсов, получаемая из периодической с помощью процедуры "нарезки". Последняя осуществляется ключом, управляемым сложным хаотическим процессом

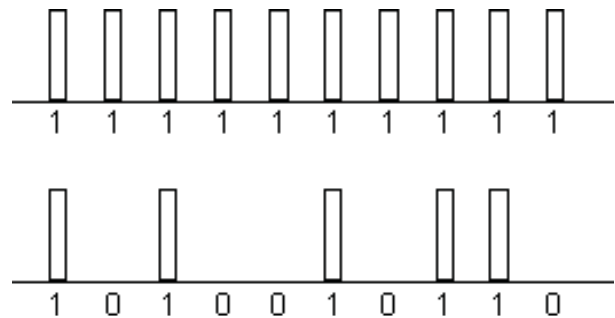


Рис. 8. Периодическая последовательность импульсов и фрактальная последовательность импульсов.

Естественно интерпретировать такой сигнал как бинарную последовательность, где "1" соответствует наличию импульса при $t_n = nT$, где T - период несущей периодической последовательности, а "0" — отсутствие (Рис. 4.). Такой подход дает возможность количественно определить сложность сигнала, используя формализм фрактальных бинарных последовательностей, являющихся дискретным аналогом непрерывных фрактальных сигналов.

Таким образом, утверждается, что существует принципиальная возможность возбуждения нештатных функциональных режимов сложных РЭУ, используя сложно модулированные "информационные" воздействия. Ниже мы рассмотрим возможные механизмы такой хаотизации.

3.1. Механизм хаотизации радиоэлектронного устройства с помощью малоамплитудного сложно модулированного сигнала.

Многие исследования сложных электронных устройств показали возможность возбуждения нелинейного динамического отклика при воздействии импульсных сигналов на их входные (пассивные и активные) элементы [1]- [3]. Этот хаотический отклик при дальнейшем распространении и преобразовании во внутренних цепях может приводить к существенным нарушениям работы всего устройства. В развиваемом подходе сделан упор на последнее обстоятельство, которое мы считаем особенно важным в моделях воздействий на аппаратуру малых по мощности короткоимпульсных сигналов.

Существующие физические модели динамического хаоса используют нелинейные дифференциальные уравнения, нелинейные интегро-дифференциальные уравнения либо отображения, использующие нелинейность граничных условий. Метод нелинейных отображений хорошо соответствует процессам отражения импульсов в пассивных и активных линиях передач при наличии рассогласования, из-за нелинейных граничных условий.

Учитываемая нами нестационарность граничных условий, существенная при УКД воздействиях, может приводить к совершенно иному механизму хаотизации при межкаскадном рассогласовании, который интерпретируется методами СИФ [4]- [5] (системой итерированных функций (IFS)), являющихся обобщением понятия отображения.

Обычно при исследовании проблема хаоса в радиоэлектронных устройствах используется идеология, рассматривающая РЭУ как сильнонелинейную систему. Динамика таких систем описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений или отображений, динамике которых генетически присуще хаотическое поведение. При этом естественным образом переносятся все понятия и результаты формализма динамического хаоса, в том числе наличие странных аттракторов.

Однако в стандартных электронных устройствах многие из основных структурных единиц (модулей), конструируются таким образом, чтобы вывести возможность выхода на нелинейный режим из области

штатного функционирования устройства. Поэтому возможность возникновения хаотических режимов в стандартных РЭУ вызывала большие сомнения.

Рассмотрим новый подход к проблеме возбуждения хаотических режимов в РЭУ.

Принципиальной основой предлагаемого подхода является понимание того, что хаотический режимы могут и не быть внутренне присущи динамике системы, а возникают и поддерживаются о благодаря определенному виду внешних воздействий. Сама система при этом может быть принципиально линейной, либо слабо нелинейной. Механизм стохастизаций определяется в данном случае нестационарностью режима работы РЭУ (например, нестационарностью граничных условий), которая инициализируется и поддерживается внешним воздействием. Феноменологической моделью такого механизма возбуждения может служить формализм СИФ [5].

В своей простейшей версии, определение СИФ требует множества аффинных преобразований $T := T_i |_{i=1,2,..,N}$, которые отображают подмножество Ω d -мерного действительного пространства в себя. Аффинные преобразования являются линейными однородными функциями, определяемыми как:

$$T_i(x) = M_i x + B_i \quad (2)$$

где M_i - некоторая определенная квадратная матрица и B_i - определенный вектор. Дополнительным является требование того, чтобы преобразования были сжимающими, т.е. чтобы якобианы $J_i = |det M_i|$ были меньше 1. В СИФ каждому преобразованию ставится в соответствие его вероятность p_i , так что

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1. \quad (3)$$

Эволюция, описываемая СИФ, происходит следующим образом. Выберем точку $x_0 \in \Omega$ и выбрав с вероятностью p_i преобразование T_i , вычислим $x_1 = T_i(x_0)$. Итерируя эту процедуру, мы генерируем на каждом шаге новую точку в Ω

$$x_k = T^{(k)}(x_{k-1}) \quad (4)$$

Функция $T^{(k)}$ выбирается случайным образом - в соответствии с данным вероятностным вектором $p = (p_1, p_2, \dots, p_N)$ из N преобразований T_i .

Было доказано [5], что последовательность x_0, x_1, x_2, \dots притягивается к подмножеству нулевого объема F которое, в общем случае, имеет фрактальную структуру. Действительно, F может быть точно разделено на N подмножеств F_i , каждое из которых является образом целого аттрактора F для преобразования $T_i: F_i = T_i(F)$

Конечно, как образ полного множества, каждое подмножество F_i может быть снова разделено на N подмножеств: $F_{ji} = T_j(F_i) = T_j(T_i(F))$ и т.д.

Эта процедура делает понятной самоподобную структуру множества F , которая может быть охарактеризована фрактальной размерностью D_f .

Для вычисления фрактальной размерности учтем, что масса (или число точек n_i) подмножества F_i удовлетворяет соотношению $n_i/n = L_i^{D_f}/L^{D_f}$, где L_i - линейный размер i -го подмножества F_i , $L_i = J_i^{1/D} L$,

n -полное число точек аттрактора а L -его линейный размер, D_e -размерность пространства вложения аттрактора. Якобиан преобразования J_i -определяет степень сжатия при преобразовании. Условие $\sum_{i=1}^N n_i = n$ (N -число функций (подмножеств)) приводит к соотношению, связывающему якобианы преобразований, их число и фрактальную размерность аттрактора

$$\sum_{i=1}^N J_i^{D_f/D_e} = 1. \quad (5)$$

Таким образом, наличие "триггерного" режима порождает динамический хаос. Следует отметить, что для этого достаточно отличия только в свободных членах B_i для разных преобразований из СИФ.

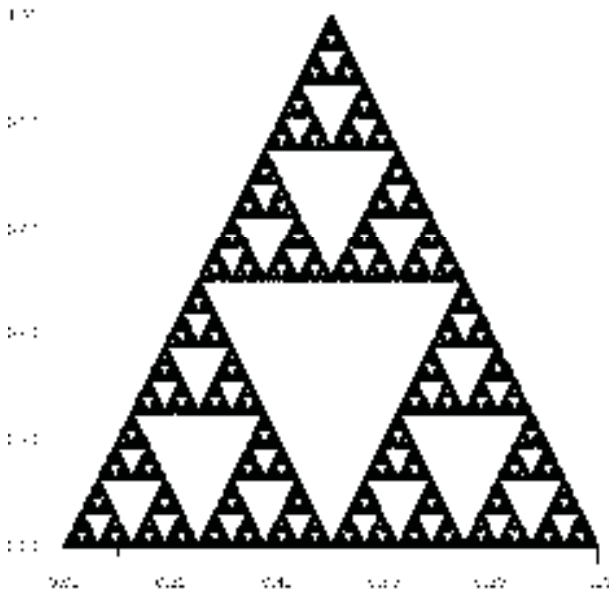


Рис. 9. Аттрактор типа: "ковер Серпинского", порожденный СИФ с параметрами взятыми из таб.1.

На Рис. 3.1. изображен аттрактор генерируемый СИФ (Ковер Серпинского). Параметры 4 аффинных преобразований приводящих к такому аттрактору приведены в таблице 3.

Таблица 3 Коэффициенты и якобианы аффинных преобразований IFS, генерирующей треугольный ковер Серпинского

I	a_i	b_i	c_i	d_i	u_i	v_i	J_i
1	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.25
2	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.25
3	0.5	0.0	0.0	0.5	0.25	0.5	0.25

Очевидно, что обычное дискретное преобразование $f : \Omega \rightarrow \Omega$ является предельным случаем СИФ с вырожденным вектором вероятности преобразований $p_i = \delta_{i1}$. Ниже мы рассмотрим модель импульсной стохастизации устройства, описываемую СИФ.

В основе функционирования почти всех РЭУ лежат колебательные процессы. Поэтому продемонстрируем описанный выше механизм генерации хаоса на примере простейшей линейной колебательной системы. Рассмотрим динамику линейного осциллятора под периодическим ударным воздействием. Гамильтониан такой

системы имеет вид:

$$H(t) = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega_0^2 q^2 + A \cos q \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n\tau) \quad (6)$$

Как давно известно, динамика такой системы может быть сведена к рассмотрению двумерного отображения:

$$\begin{aligned} I^{n+1} &= I^n + K \sin \theta^n \\ \theta^{n+1} &= \theta^n + I^{n+1} \pmod{2\pi} \end{aligned} \quad (7)$$

Это хорошо изученное стандартное отображение (отображение Чирикова), где наличие и развитость хаоса определяется параметром K . Достаточно развитый сепаратрисный хаос имеет место при $K \approx 1$. Параметр является, в рамках нашего подхода, "силовой" характеристикой внешнего воздействия на систему. Вид фазовой плоскости системы (7) показан на Рис. 6.

Рассмотрим теперь случай маятника, подвергающегося воздействию аperiodической последовательности импульсов, представленной соответствующей бинарной последовательностью (Рис. 4). Эта последовательность представляет собой "прореженный" вариант последовательности в первом случае. Легко показать, что при этом мы переходим к системе из двух отображений:

$$I^{n+1} = I^n + K \sin \theta^n \quad (8)$$

$$\theta^{n+1} = \theta^n + I^{n+1} \pmod{2\pi}$$

$$I^{n+1} = I^n \quad (9)$$

$$\theta^{n+1} = \theta^n + I^{n+1} \pmod{2\pi}$$

где отображение (8) имеет место в случае "1", а (9) - в случае "0".

Таким образом, мы получаем СИФ, в которой вероятностный вектор определяется структурой внешнего сигнала. На Рис. 7 изображен странный аттрактор, полученный в ходе эволюции такой СИФ при $\epsilon = 0.01$, где бинарная последовательность генерировалась с помощью аттрактора Лоренца.

Следует отметить, что в случае периодической последовательности импульсов при таком значении силового параметра никакой хаотический режим возникнуть не может.

Таким образом, видно, что в простейшей колебательной системе гораздо более эффективным путем стохастизации является использования аperiodического сложного воздействия, нежели силовой метод, использующий периодические последовательности.

3.2. Проблемы классификации аттракторов и статистическая псевдометрика в пространстве радиоэлектронных устройств.

При изучении хаотического поведения сигналов в радиоэлектронной аппаратуре одной из первых и главных задач является определение набора специфических характеристик для адекватного описания хаотической динамики (проблема диагностики) и проблема классификации хаотической динамики и аттракторов. Для нашего анализа существенными являются прежде всего

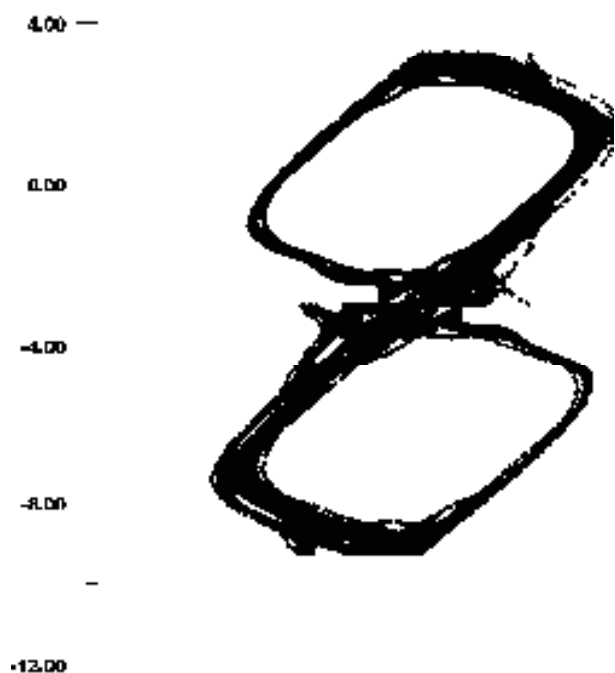


Рис. 10. Вид фазовой плоскости при воздействии на осциллятор периодической последовательности импульсов с достаточно большой интенсивностью ($K \approx 1$).

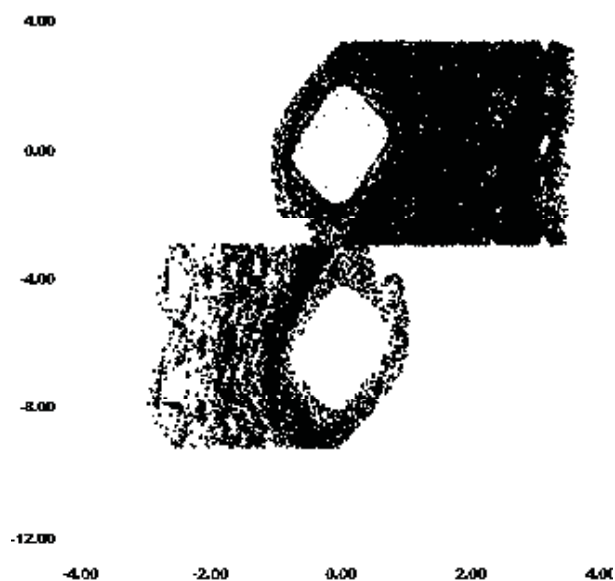


Рис. 11. Фазовая плоскость осциллятора, находящегося под воздействием сложномодулированной последовательности импульсов малой амплитуды ($\epsilon = 0.01$).

фрактальные и информационные характеристики динамических процессов в изучаемых устройствах.

Как нам кажется, наиболее существенными подходами к проблемам классификации аттракторов являются подходы с точки зрения теории информации и символической динамики.

В рамках информационного подхода к симво-

лической динамике, метрическая энтропия может быть трактована как удельная энтропия источника Шеннона-Макмилана, а проблема метрического изоморфизма динамических систем может быть рассмотрена как проблема кодирования. Класс хаотических систем с положительной энтропией h_m получил название ϵ -систем [7].

Было доказано, что в широком классе систем, так называемых слабобернуллиевских (включает в себя автоморфизмы Маркова, потоки геодезических на многообразии отрицательной кривизны, некоторые бильярдные системы), метрический изоморфизм обеспечивается равенством энтропии h_m . Однако, несколько позже было показано в классе всех ϵ -систем метрическая энтропия h_m не составляет полной системы инвариантов. Более того, число изоморфных типов ϵ -систем несчетно [11].

Этот факт может быть трактован, как несчетность множества символических последовательностей, обладающих одинаковой метрической энтропией, в котором невозможно установить общность правила кодирования для любой, произвольно взятой пары последовательностей. Т.о. возникает проблема классификации внутри этого множества. Мы полагаем, что она может быть решена с помощью введения специальной функции - статистической псевдометрики. Введение этой функции стимулировано некоторыми аналогиями из области математической лингвистики, теория стохастических машин и теории мультифракталов.

3.2.1. Информационные аспекты символической динамики хаотических систем.

Символическая динамика имеет дело с глобальными устойчивыми свойствами динамики, отвлекаясь от точного задания фазовых траекторий. Разбивая фазовое пространство (или пространство состояний) на конечное число кусков, и ставя в соответствие каждому из них символ (букву) из некоторого конечного алфавита L , мы можем перейти от рассмотрения траекторий в фазовом пространстве к рассмотрению символических последовательностей:

$$\varpi = \{\varpi_n\}_0^\infty; \varpi = \varpi_0\varpi_1\varpi_2\dots\varpi_n\dots \quad (10)$$

где $\varpi_n \in L$ - буква некоторого алфавита. Последовательность букв соответствует траекториям изучаемой системы, а отображение $\sigma\{\varpi_n\} = \{\varpi_{n+1}\}$ - движение вдоль этих траекторий. Метрические характеристики хаотической системы, такие, как корреляционные и статистические свойства, однозначно переносятся на свойства соответствующих символических последовательностей (при соответствующем разбиении).

Ансамбль для такой системы определяется мерой на множестве возможных конфигураций системы внутри ограниченной области длиной n . Существует m^n таких конфигураций (m -число букв в алфавите, а n -длина слов), задаваемых всевозможными наборами-словами: $\varpi = \varpi_0\varpi_1\varpi_2\dots\varpi_{n-1}$, каждой из которых в ансамбле приписывается определенный вес. Вопрос о распределении для большого канонического ансамбля таких термодинамических систем, при соответствующих условиях, может быть решен в рамках классической

термодинамики Гиббса-Больцмана. Такой подход лежит в основе термодинамического формализма символической динамики Рюэля-Боуэна-Синая [9], [6].

Информационный и термодинамический подход к символической динамике взаимно дополняют друг друга и позволяют при этом конструктивное описание глобальных свойств хаотических систем, используя представления о "сложности", "информации", "взаимодействии" и "равновесии".

С точки зрения теории информации символическая последовательность, порожденная некой динамической системой, может быть рассмотрена как сообщение. С точки зрения математической лингвистики - как текст. В обоих случаях возникают конструктивные аналогии, позволяющие ввести новые характеристики динамических систем.

Каждая символическая последовательность может быть рассмотрена как некий "текст", обладающий определенной статистической структурой. Статистические особенности такого "текста" отражают устойчивые инвариантные свойства соответствующей динамики, в том числе и характер корреляций. Итак, задача может быть сформулирована следующим образом: исследовать и получить количественную оценку глобальных свойств данной символической последовательности, таких как характер корреляций и статистическая структура.

Термодинамические аспекты символической динамики с использованием метода n -туплевого анализа Ципфа изложена в работе [6].

3.2.2. Статистическая псевдометрика на множестве последовательностей.

Без потери общности будем рассматривать бинарные последовательности, т.е. последовательности с алфавитом $\{0, 1\}$. Все построения и результаты без труда обобщаются в случае m -ричных последовательностей, а алгоритмы преобразования временного ряда экспериментальных данных в символическую последовательность хорошо развиты.

Рассмотрим множество Ω всех полубесконечных бинарных последовательностей $\varpi = \{\varpi_n\}_0^\infty$. Стандартной процедурой является метризация множества Ω с помощью функции Фреше:

$$\rho(\omega, \sigma) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1 - \delta_{\omega_i \sigma_i}}{2^i} \quad (11)$$

где δ_{ij} - символ Кронекера. Функция (1) удовлетворяет всем требованиям к метрике, а именно:

1. $\rho(\omega, \sigma) = \rho(\sigma, \omega)$
2. $\rho(\omega, \sigma) + \rho(\omega, \beta) \geq \rho(\omega, \beta)$
3. $\rho(\omega, \sigma) = 0$, если $\omega = \sigma$
4. если $\rho(\omega, \sigma) = 0$, то $\omega = \sigma$.

Сепарабельное полное метрическое пространство с такой метрикой Фреше представляет собой хороший объект с математической точки зрения, но обладает рядом недостатков с точки зрения символической динамики.

Нас интересуют интегральные свойства символической динамической системы, а следовательно и интегральные свойства символических траекторий (последовательностей), такие как энтропия, корреляционная

структура и т.д., в то время как метрика (1) оценивает "близость" начальных отрезков последовательностей.

Применим к последовательности ω , операцию сдвига $\sigma\{\varpi_n\} = \{\varpi_{n+1}\} = \omega'$, мы получим (за исключением тривиальных случаев) $\rho(\omega, \omega') \neq 0$. Последовательно применяя оператор σ к последовательности ω , мы будем получать (за исключением счетного множества случаев, каждый раз новое значение $\rho(\omega, \omega^{(n)})$. В тоже время очевидно, что если каждое ω является символической траекторией К-системы, то все $\omega^{(n)}$ соответствуют одной и той же траектории. Свойства этих последовательностей инвариантны относительно операции сдвига. Указанных недостатков лишена, введенная в работе псевдометрика

Введем в пространстве Ω функцию, определенную на паре последовательностей $\omega, \sigma \in \Omega$:

$$d_s = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{2^n-1} (h^{1/2}(p_\omega(i)) - h^{1/2}(p_\sigma(i)))^2 \quad (12)$$

где функция h определена как [12]:

$$h(x) = \begin{cases} -x \log x & 0 < x \leq 1 \\ 0 & x = 0 \end{cases} \quad (13)$$

а логарифм берется по основанию 2.

$p_\omega(i), p_\sigma(i)$ - асимптотическая частота встречи данного слова длин n , представленного как двоичная запись числа i . В нашем случае (полубесконечные последовательности), используя частотную идеологию теории вероятности, мы можем назвать такие частоты вероятностями соответствующие слову i в последовательности ω и σ .

Функция d_s может быть переписана в эквивалентной форме.

$$d_s(\sigma, \omega) = h_\omega + h_\sigma - 2h_{\omega\sigma} \quad (14)$$

где h_ω, h_σ -удельные энтропии, соответственно последовательностей ω и σ . Последний член

$$h_{\omega\sigma} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{2^n-1} (h(p_\omega(i))h(p_\sigma(i)))^{1/2} \quad (15)$$

учитывает разницу в статистической (словарно-частотной), структуре последовательностей ω и σ , или, в рамках частотной интерпретации, разницу в распределении вероятностей.

Функция $d_s(\omega, \sigma)$ может принимать любые неотрицательные значения, включая ∞ . Легко проверить, что она удовлетворяет условиям (1-3). Условие 4 в этом случае не выполняется, т.к. возможно бесконечное множество последовательностей, обладает одинаковой структурой (получаем из исходной, например, с помощью оператора сдвига σ). Выполнение всех остальных условий позволяет использовать функцию d_s в качестве псевдометрики на множестве Ω , определив псевдометрическое пространство (Ω, d_s) [13].

Определим множество $\{\varpi\}$, как состоящее в точности из тех последовательностей $\sigma \in \Omega$, для которых $d_s(\omega, \sigma) = 0$

Пусть - семейство всех множеств вида $\{\varpi\}$. Тогда разбиение есть фактор-множество Ω/R , где R -отношение $\{(\omega, \sigma) : d_s(\omega, \sigma) = 0\}$.

Назовем расстоянием между подмножествами и псевдометричного пространства число $D(A, B) =$

$dist(A, B) = \inf\{d_s(\omega, \sigma) : \omega \in A, \sigma \in B\}$. Тогда $(, D)$ - метрическое пространство, топология которого совпадает с фактор-топологией на D [13].

Отношение R , является отношением эквивалентности, разбивает множество Ω на классы эквивалентности, т.е. на семейство непустых и непересекающихся множеств, так, что последовательности принадлежащие одному классу, имеют одинаковую частотную структуру.

Важным свойством функции d_s является то, что равенство двух удельных энтропий h_ω и h_σ не означает равенство нулю функции $d_s(\omega, \sigma)$, так, что такие последовательности принадлежат, в общем случае, к разным классам эквивалентности. Отношение R является более жестким, чем равенство энтропий.

Необходимо сказать о сходимости псевдометрики $d_s(\omega, \sigma)$. Она сходится во всех случаях, когда сходятся h_ω и h_σ (т.к. $h_{\omega\sigma} \geq h_\omega + h_\sigma$). Это происходит тогда, когда соответствующие символические последовательности являются квазирегулярными, т.е. представляет собой символическую траекторию какой-либо К-системы

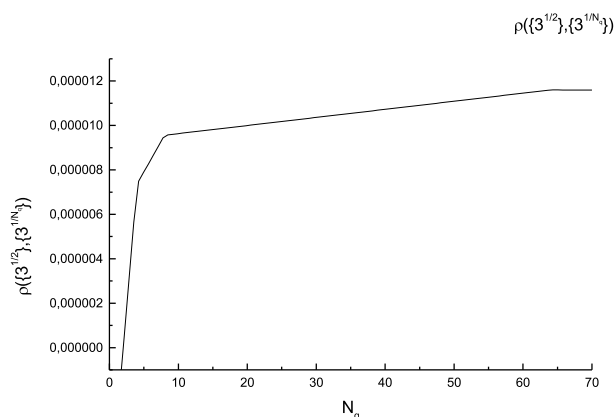


Рис. 12. Расстояние между символическими последовательностями, определяющимися разложением с разными степенями иррациональности.

Статистическая псевдометрика дает возможность введения информационного "расстояния" между аттракторами хаотических систем, рассматривая последние как множество всех возможных символических траекторий данной системы, которые образуют динамический "язык" системы. Последний является инвариантом системы, устойчивым к внешнему шуму. Применении символической динамики и псевдометрики может служить для классификации типа аттракторов, возбуждаемых в ПУТ и с ее помощью можно выяснять, в принципе, тип устройства, в котором произошли нарушения функционирования в результате хаотизации, имея при этом эталонные характеристики аттракторов для различных типов аналогичных устройств.

Такие исследования, очень перспективны, поскольку позволяют конкретно определить узел или отдельный блок достаточно сложного радиоэлектронного устройства в котором наблюдается нарушение функционирования, связанное с его хаотизацией. С помощью этого подхода, возможно также определение отдельных узлов и блоков, функционирование которых нарушает-

ся в результате внешнего воздействия.

Решение таких задач может представлять большое практическое значение в частности, при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, работающей в сложной электромагнитной обстановке.

Необходимость исследования сложной динамики ПУТ при воздействии и передаче импульсных сигналов приводит к необходимости использовать разнообразные методы обработки временных рядов. Наряду с традиционными и, безусловно полезными спектральными методами (спектры мощности, автокорреляционные функции и т.д.), требуются и специфические методы обработки, учитывающие хаотическую природу исследуемых сигналов в условиях большого уровня корреляций, присущий системам в состоянии динамического хаоса.

4. Анализ экспериментальных данных.

Моделирование и анализ восстановленных по временным реализациям динамических систем (например, пассивных систем типа ЗУ) показали, что основными факторами образования хаоса являются наличие кусочно-неоднородных участков СВЧ трактов передачи сигнала и взаимодействие сигналов, рассеянных этими участками.

Амплитудный фактор оказался недоминантным в образовании хаотической динамики многих типичных СВЧ устройств.

Этот вывод подтверждается данными испытаний ПУТ, включающих активные элементы - усилительные модули. Например, ПУТ с $f_0 = 2.0$ ГГц имел типичные спектры сигналов-откликов, соответствующие системе с фазовыми переходами ($1/f$ - шум).

Другой более конструктивно сложный ПУТ с $f_0 = 3.1$ ГГц, тестированный в различных режимах ВВФ (**V**, **VI** + **II** и **V** + **IV**), имел фрактальные коразмерности АХС, слабо зависящие от амплитуды ВВФ, но существенно от режимов тестов, в широком диапазоне изменения амплитуды ВВФ УКД - до 20 дБ. рис.4. Фрактальная коразмерность D сигнала просто связана со средним наклоном фурье спектра в логарифмическом масштабе ($H = 2D + 1$).

Анализ сигналов-откликов ПУТ, проведенный методами символической динамики, показал присутствие хаотического компонента практически для всех видов и амплитуд входных сигналов УКД.

Степень хаотизации и времена релаксационных процессов в ПУТ приобретали максимальные (минимальные) параметры при комбинированном (одиночном) воздействии сигналов УКД. Максимальные значения времени релаксации в условиях развитого хаоса достигали нескольких сотен длительностей воздействующего сигнала УКД. Например, для ПУТ с $f_0 = 2.0$ ГГц в режиме одиночных импульсов сильная хаотизация прибора наблюдалась при соотношении $I_N/I_{N.LIM} = 1.5 - 100$. При этом отношение длительности сигнала - отклика ПУТ (с учетом СШП антенны, ЗУ, тракта передачи и МШУ) к длительности одиночного сигнала воздействия УКД в режиме **V** на входе ПУТ менялось в пределах $\tau_R/\tau_i n = 10 - 30$. То же соотношение, но

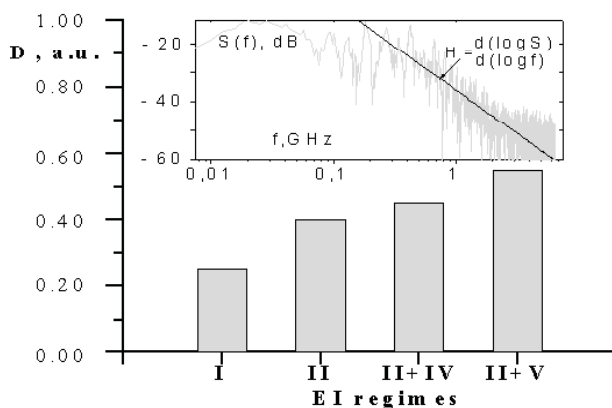


Рис. 13. Фрактальные коразмерности (показатели Херста) для сигналов откликов ПУТ с активными элементами.

только для пассивных компонентов ПУТ (антенны, ЗУ, тракта передачи) достигало 2 – 5.

Более точные данные о связи R с амплитудой сигнала УКД воздействия получены для ПУТ с $f_0 = 3.1$ ГГц. в режиме VI. Как видно из рис.5, время потери корреляции в сигнале-отклике имело немонотонную зависимость от амплитуды входного сигнала. Это, по-видимому, свидетельствует о параметрической природе развития хаотического процесса в электронном устройстве, связанном с отмеченной выше неустойчивостью режимов питания МПУ. Это утверждение подтверждается тем, что в условиях максимальной хаотизации ПУТ, когда скорость развития неустойчивости наиболее чувствительна к высокочастотным компонентам импульса воздействия, вариация амплитуды воздействующего сигнала довольно слабо влияла на длительность сигнала-отклика.

Аналогичная зависимость $R(I_N)$ прослеживается и в комбинированном режиме воздействия. В то же время, заметно отличие времени релаксации между комбинированным и одиночным воздействием сигналов УКД. Например, для ПУТ на ИМС с $f_0 = 3.1$ ГГц. τ_R в режимах II + II или II + VI увеличивалось по сравнению с режимом II в 1.3 - 1.4 раза. Для вакуумной ЛБВ с $f_0 = 9.4$ ГГц это различие τ_R для режимов III + VI и III при максимальной хаотизации не превышало 1.2.

Временная задержка между сигналами воздействия τ_D увеличивала время отклика системы. При $\tau_D < \tau_R$, взятого для одиночных воздействий, отмечалось некоторое изменение вида и степени хаотизации сигнала - отклика, а для больших задержек $\tau_D > \tau_R$ происходило разделение отклика и увеличение его примерно на величину τ_D .

5. Заключение

В рамках данной работы исследована возможность нарушения функционирования приемно-усилительных трактов в результате их хаотизации под воздействием импульсов СВЧ и СШП короткой длительности.

Хаотический отклик является стандартным нелиней-

ным откликом сложных электронных систем на внешний УКДИ сигнал даже для относительно небольших амплитуд. Природа этого отклика в основном связана с нелинейностью и нестационарностью условий прохождения и преобразования сигнала в микроволновых линиях передачи.

Сложность приемных устройств и временных характеристик воздействующего сигнала оказывают существенное влияние на хаотизацию в ПУТ. Амплитудный фактор оказался важным, но недоминантным при формировании хаотических режимов в чувствительных цепях радиоэлектронной аппаратуры.

Разработанные процедуры обработки сигналов носят универсальный характер и могут иметь многие практические применения при исследовании сложной динамики электронных систем под воздействием сигналов УКД и сигналов, обладающих сложной временной структурой. Эти методы важны также для тестирования и диагностики радиоэлектронного оборудования в сложной электромагнитной обстановке.

Список литературы

- [1] I.I. Magda, S.P. Bludov, N.P. Gadetski et al., Studies on Electronic Devices Degradation Phenomena Under Interference of Pulsed-Power Electromagnetic Fields, 3-rd Int. Crimian Conf. "UHF Tech. and Satellite Reception", Sevastopol, 1993, vol. 5, p. 523-526 (in Russian).
- [2] N.P. Gadetski, K.A. Kravtsov, I.I. Magda et al., The USP Effect on Detection and Frequency Conversion Receiving Sections, 5-th Int. Crimian Conf. Microwave Satellite Telecommunications Tech.", Sevastopol, 1995, vol. 1, p. 249-251 (in Russian).
- [3] N.P. Gadetski, K.A. Kravtsov, I.I. Magda et al., Studies on Electromagnetic Radiation of Ultrashort Duration Pulse Interference on UHF Electronic Devices. AMEREM '96, Abstracts, Albuquerque, New Mexico, 1996, p. 79.
- [4] S.V. Denisov and V.E. Novikov, Iterated Function Systems as the Model of Chaos Formation, CRIMICO '97, Proc. vol. 1, p. 60.
- [5] P.R. Massopust Fractal Functions, Fractal Surfaces, and Wavelets. Academic Press, San-Diego, 1995.
- [6] S.V. Denisov, Fractal Binary Sequences: Tsallis Thermodynamics and Zipf Law, Phys. Lett. A, 1997, vol. 235, p. 447.
- [7] Ресслер О. Хаос и турбулентность // В сб.: Синергетика. М.: Мир. 1984. С. 180.
- [8] Рюэль Д. Статистическая механика: строгие результаты. М. Мир, 1971.
- [9] Боуэн Р. Символическая динамика. М. Мир, 1982.
- [10] Czirok A. at all, Phys. Rev. E. V.52, P.446, 1995.
- [11] Peng C.K. at all, Phys. Rev. Lett. V.70, P.1343, 1993.
- [12] Billingsley P., Ergodic Theory and Information (JohnWiley and Sons, N.Y., 1965).
- [13] Келли Дж. Общая топология. М., Наука, 1981.