

## Динамические режимы автогенерации сверхвысокочастотного сигнала в радиофотонном кольцевом генераторе

© А.В. Кондрашов, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: kondrashov\_av@inbox.ru

(Поступило в Редакцию 28 июня 2016 г.)

Исследованы динамические режимы автогенерации сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала в радиофотонном генераторе. Генератор представлял собой кольцевую схему, в СВЧ тракте которой содержался фильтр нижних частот и СВЧ усилитель. Оптический тракт содержал линию задержки из оптоволокна. Генератор демонстрировал периодическую, хаотическую и шумовую динамики. Показано, что в режиме хаотической генерации корреляционная размерность аттрактора хаотического сигнала приходила в насыщение с ростом размерности фазового пространства. В случае шумовой генерации насыщения не происходило.

DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44135.1958

### Введение

В последние годы особый интерес исследователей вызывает разработка сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов динамического хаоса. Он обуславливается возможностью использования хаотических сигналов в телекоммуникационных [1] и радарных [2] системах, а также в генераторах случайных чисел [3]. При этом особое внимание уделяется ширине спектра генерируемого хаотического сигнала. Более широкий спектр позволяет реализовать более высокоскоростную систему связи либо добиться лучшей разрешающей способности радаров.

В литературе описаны СВЧ генераторы широкополосных хаотических сигналов, работающие на различных физических принципах. Так, в работе [4] предложен СВЧ генератор, использующий процесс взаимодействия полупроводниковой сверхрешетки с объемным или микрополосковым резонатором. В работе [5] исследован генератор хаотических колебаний в диапазоне 3–8 GHz на базе биполярного СВЧ транзистора.

В работах [6–9] были предложены электронно-перестраиваемые кольцевые генераторы, в которых в качестве нелинейных элементов применялись ферромагнитные пленки и феррит-сегнетоэлектрические структуры. Эти генераторы позволяют управлять параметрами автогенерируемого динамического хаоса с помощью варьирования магнитного или электрического полей, прикладываемых к нелинейному элементу.

В настоящее время интенсивно развивается направление, называемое радиофотоникой [10,11]. Оно объединяет в себе оптоэлектронные и СВЧ технологии, что позволяет сочетать преимущества обеих технологий при разработке новых устройств. Одним из достоинств оптоэлектронных компонентов является их широкополосность. Мгновенная полоса частот у промышленно выпускаемых компонентов достигает 100 GHz и имеет потенциал для дальнейшего расширения. Это делает

сравнительно простой возможность создания широкополосных оптоэлектронных генераторов СВЧ динамического хаоса [12].

В недавней работе [13] нами было опубликовано короткое сообщение об экспериментальном исследовании радиофотонного кольцевого генератора широкополосного СВЧ динамического хаоса с равномерной спектральной плотностью мощности в диапазоне 3–8 GHz. Целью настоящей работы являлось детальное исследование динамических режимов, реализующихся при автогенерации СВЧ сигнала в радиофотонном генераторе, а также численная оценка параметров генерируемых СВЧ сигналов.

### Экспериментальный макет

Блок-схема генератора показана на рис. 1. Основными узлами генератора являлись лазер 1 с длиной волны оптического излучения 1.55  $\mu\text{m}$  и мощностью 10 mW, электрооптический модулятор типа интерферометра Маха–Цендера 2 с полосой 10 GHz и полуволновым напряжением 3.3 V, оптический волновод 3 диаметром 8  $\mu\text{m}$  и длиной 100 m, фотодетектор 4 с верхней рабочей частотой 25 GHz, развязка по постоянному току 5, СВЧ усилители 6 с диапазоном частот 2–8 GHz, коэффициентом усиления 35 dB и выходной мощностью в линейном режиме до 1.5 W, переменный аттенюатор 7, СВЧ фильтр нижних частот (ФНЧ) 8 с частотой среза 3.5 GHz и СВЧ направленный ответвитель 9. Компоненты СВЧ тракта соединялись СВЧ кабелями.

Рассмотрим принцип работы генератора. Лазерный диод 1 излучает непрерывное оптическое излучение, выполняющее функцию несущего сигнала. Электрооптический модулятор 2 модулирует амплитуду оптического излучения СВЧ сигналом, поступающим из радиочастотного тракта. Модулированное оптическое излучение, распространяясь по оптоволоконному кабелю 3, задер-

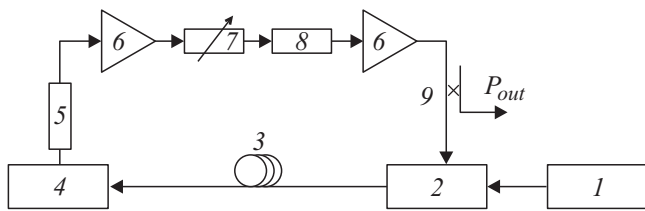


Рис. 1. Блок-схема экспериментального макета.

живается в нем на время около 521 ns и детектируется фотодетектором 4. Развязка по постоянному току 5 убирает постоянную составляющую напряжения на выходе фотодетектора. Полученный СВЧ сигнал усиливается с помощью СВЧ усилителей 6 и подается на электрооптический модулятор 2, замыкая кольцевую схему. Пара СВЧ усилителей 6 компенсирует суммарные потери на распространение СВЧ сигнала в кольце. Переменный аттенуатор 7 служит для управления этими потерями. Небольшая часть СВЧ сигнала выводится из кольца направленным ответвителем 9 с коэффициентом связи — 10 dB.

Заметим, что в описанном генераторе частотная полоса хаотической генерации определяется полосой пропускания СВЧ тракта, поэтому последний должен быть широкополосным. В представленной схеме нижнюю частоту хаотической генерации 3.5 GHz задавал ФНЧ 8. Верхняя частота хаотической генерации определялась верхней граничной частотой СВЧ усилителей и составляла 8 GHz.

Нелинейным элементом генератора являлся электрооптический модулятор. Именно косинусоидальная передаточная функция модулятора обуславливала нелинейность преобразования электрического СВЧ сигнала в волну огибающей оптического сигнала. Этот эффект ограничивал в целом СВЧ мощность в режиме генерации. Предварительные тестовые измерения показали, что мощность на выходе СВЧ тракта не превышала 910 mW, поэтому все его узлы работали в линейном режиме.

## Экспериментальные результаты

Экспериментальное исследование перехода к автогенерации хаотического сигнала проводилось путем плавного увеличения значения динамического параметра — коэффициента усиления кольца  $G$ . Увеличение  $G$  осуществлялось путем уменьшения ослабления СВЧ сигнала в переменном аттенуаторе 7. Значение  $G$ , при котором кольцо переходило в режим автогенерации, было условно принято равным нулю. Таким образом,  $G = 0$  dB соответствовало порогу автогенерации СВЧ сигнала. Увеличение коэффициента усиления кольца приводило к последовательной смене режимов автогенерации, обуславливаемой нелинейным видом переда-

точной характеристики электрооптического модулятора. Рассмотрим эти режимы.

На пороге автогенерации в кольце возникала генерация монохроматического СВЧ сигнала. Частота генерируемой гармоники составляла 3.676 GHz, а мощность 0.3 mW. Вокруг генерируемой гармоники наблюдались другие частотные пики, являющиеся результатом усиления шума на частотах, соответствующих гармоникам кольца. Они были ослаблены по мощности примерно на 40–50 dB. Поскольку эти гармоники не были связаны по фазе, на выходе генератора наблюдался постоянный уровень СВЧ мощности.

При увеличении коэффициента усиления  $G$  выше 7.3 dB мощность СВЧ сигнала на входе электрооптического модулятора начинала превышать 55 mW. Выше этой мощности в кольце происходила бифуркация, в результате которой возникала бистабильность. Одночастотная генерация сменялась многочастотной, причем центральная частота генерации перескакивала на гармонику с частотой 3.652 GHz. В спектре СВЧ сигнала при этом возникали гармоники с двумя частотами отстройки, примерно равными 1.92 и 178.6 MHz. В таком режиме наблюдались быстрые осцилляции различной длительности, которые далее мы будем называть цугами. Период быстрых осцилляций  $T_1$  был около 5.6 ns. Длительность цугов варьировалась и повторялась через некоторое количество цугов. В последовательности цугов можно было выделить некоторый период  $T_2 = 520.8$  ns (назовем его периодом медленных колебаний), который практически не зависел от  $G$ . Таким образом, каждый период медленных колебаний содержал несколько цугов быстрых осцилляций.

Описанный режим генерации являлся периодическим, поскольку соотношения частот генерируемых гармоник были кратными, а во временной области наблюдался амплитудно модулированный СВЧ сигнал с периодом  $T_2$  (рис. 2 и 3). Длительность и форма цугов на периоде менялась при увеличении коэффициента усиления кольца. Рассмотрим подробнее то, как выглядит сигнал во времени в таком режиме генерации.

На рис. 2, *a* показана временная реализация при  $G = 9$  dB. Видно, что на каждом периоде медленных колебаний  $T_2$  наблюдались три цуга длительностью 30, 90 и 120 ns. При  $G = 9.2$  dB (рис. 2, *b*) длительность цугов составила 20, 50 и 250 ns. На рис. 3, *a, b* показана в разных масштабах временная реализация, измеренная для  $G = 9.4$  dB. При таком  $G$  на периоде  $T_2$  вместо нескольких цугов наблюдался один, состоявший из большого числа быстрых осцилляций. Таким образом, при достижении  $G = 9.4$  dB все три цуга сливались в один, длительность которого была равна 450 ns. Быстрые осцилляции имели форму периодической последовательности темных нелинейных импульсов (рис. 3, *b*). Период импульсов составлял 5.49 ns, а их длительность была около 1.90 ns. На рис. 3, *c, d* показан спектр такого сигнала в разных масштабах. Видно, что спектр состоял из гармоник с большой и маленькой отстройкой по

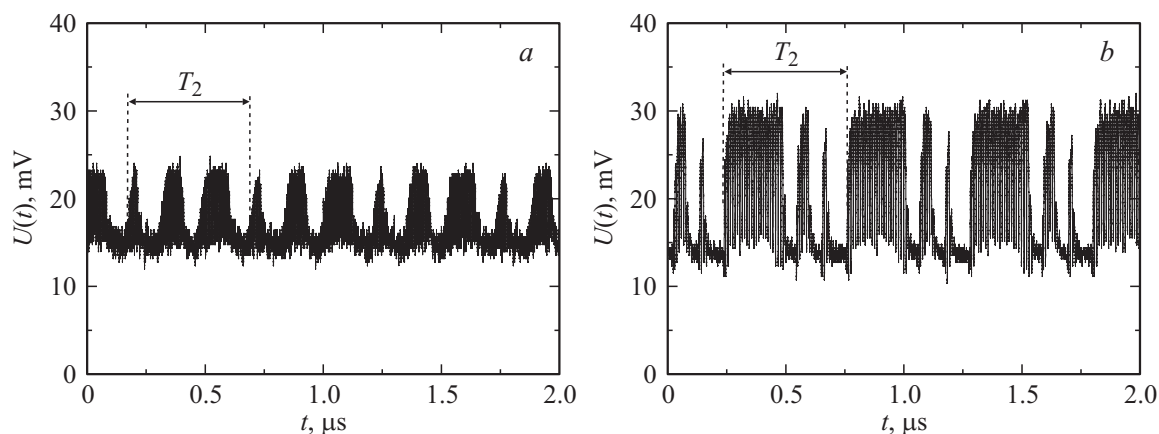


Рис. 2. Осциллограммы СВЧ сигналов, генерируемых при  $G = 9$  dB:  $a$  — 9,  $b$  — 9.2.

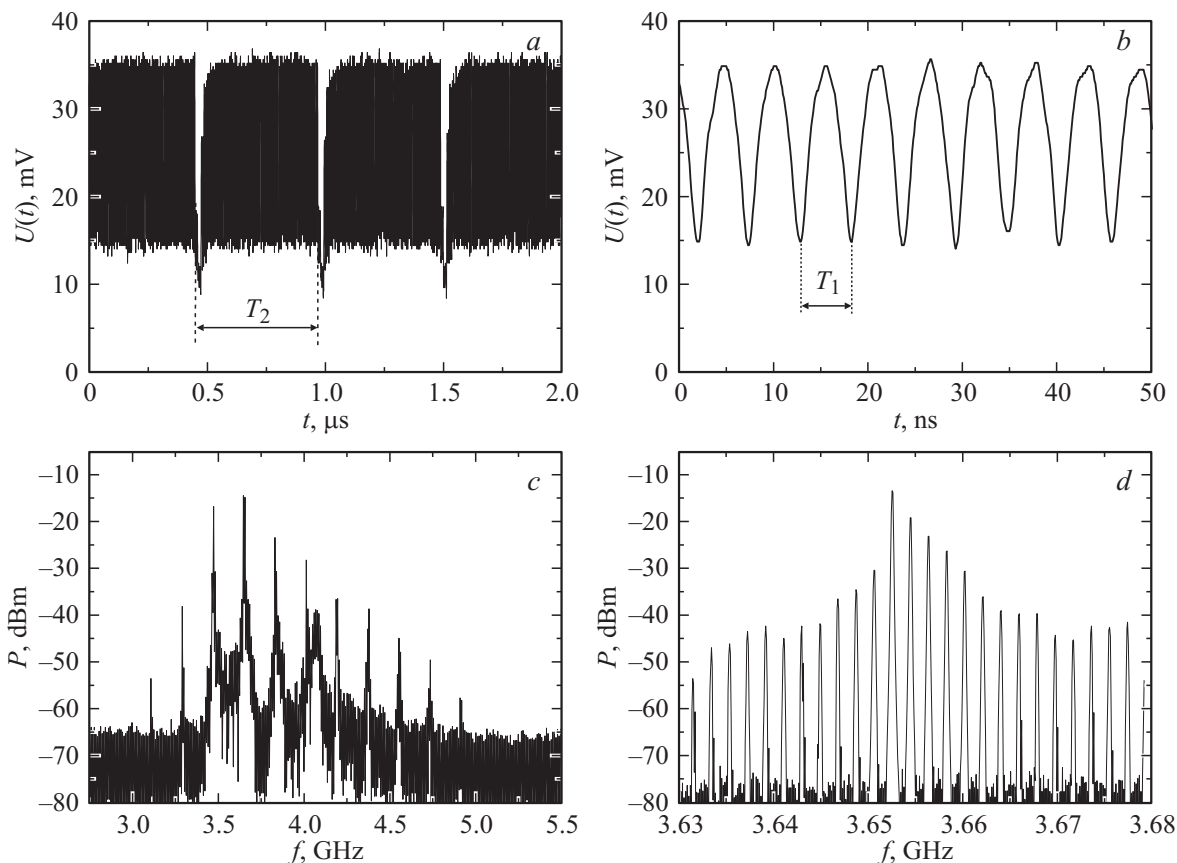
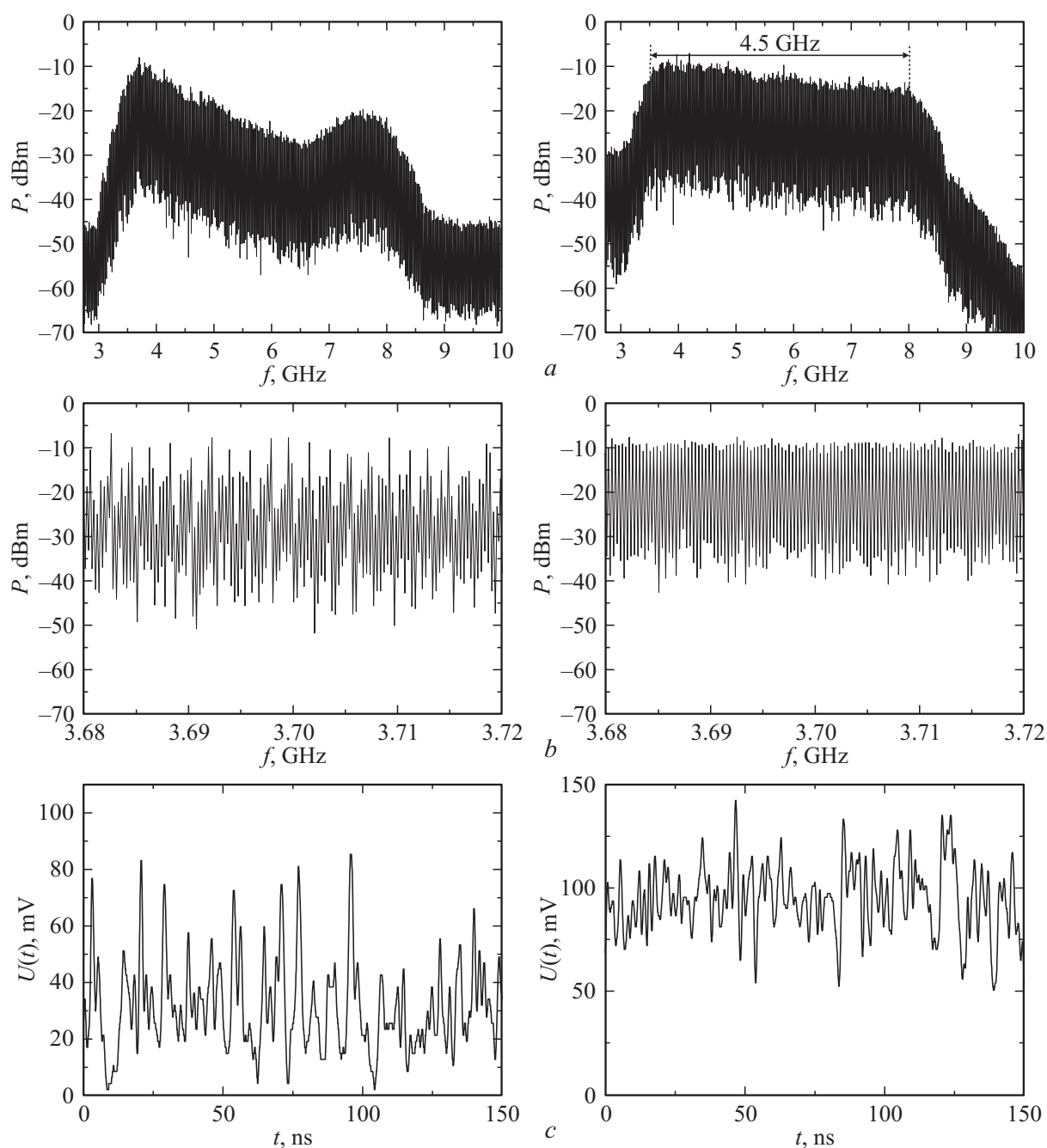


Рис. 3. Осциллограмма СВЧ сигнала при  $G = 9.4$  dB, показывающая медленные осцилляции амплитуды ( $a$ ), и та же осциллограмма в расширенном масштабе, показывающая быстрые осцилляции амплитуды ( $b$ ), а также спектр СВЧ сигнала ( $c$ ) и его фрагмент в расширенном масштабе ( $d$ ).

частоте, определявших форму, период и длительность медленных и быстрых осцилляций. Эти отстройки были равны 182.4 и 1.92 MHz соответственно.

При дальнейшем увеличении коэффициента усиления  $G$  выше 11.7 dB колебания в кольце стохастизировались, и спектр становился сплошным. На левой части рис. 4 представлены спектр и фрагмент осциллограммы

хаотического сигнала, измеренные при  $G = 15.1$  dB. Из рисунка можно видеть, что спектр выходного СВЧ сигнала представлял собой сплошной шумовой пьедестал с отдельными ярко выраженными гармониками. Эти гармоники соответствовали частотам собственных мод кольца. Огибающая генерируемого СВЧ сигнала представляла собой последовательность хорошо различных



**Рис. 4.** Спектры (а), их фрагменты в расширенном масштабе (б) и фрагменты осциллограмм (с), измеренные при хаотической генерации для  $G = 15.1$  dB (слева) и при шумовой генерации для  $G = 22.9$  dB (справа).

хаотических импульсов. Стохастизация колебаний в исследуемой кольцевой системе объясняется амплитудным механизмом перехода к динамическому хаосу, который обычно наблюдается в кольцевых автоколебательных системах, содержащих нелинейный элемент, передаточная характеристика которого имеет спадающий участок [14,15].

При достижении  $G$  значения 18.7 dB происходила смена режима генерации, при которой отдельные гармоники пропадали. Спектр выходного СВЧ сигнала становился

сплошным, а сигнал во времени приобретал сложную апериодическую форму. Спектральная характеристика и временная реализация, записанные для  $G = 22.9$  dB, показаны на правых панелях рис. 4.

### Анализ режимов генерации

Из анализа временных реализаций было определено, является ли генерируемый непериодический сигнал квазипериодическим сигналом, динамическим хаосом или

случайным шумом [16]. Для анализа режимов генерации записывались осциллограммы длительностью  $10\mu\text{s}$  с шагом между точками  $100\text{ps}$ . На первом этапе производилось построение фазовых портретов наблюдавшихся режимов генерации методом задержки. Координаты точек фазовых траекторий получались путем сдвига временной реализации на некоторое время задержки в соответствии с выражением

$$\mathbf{x}(t) = \{U(t), U(t + \tau), \dots, U(t + (d - 1)\tau)\}, \quad (1)$$

где  $U(t)$  — огибающая измеренного сигнала,  $\tau$  — время задержки,  $d$  — размерность фазового пространства.

На рис. 5, *a* представлен фазовый портрет колебаний в периодическом режиме генерации для  $G = 9.4\text{ dB}$ , временная реализация которого показана на рис. 3. Фазовый портрет представляет собой замкнутую петлю. Форма петли определялась формой быстрых осцилляций. В промежутки времени, в течение которых наблюдались быстрые осцилляции, динамика системы заключалась в движении по этой замкнутой петле. В промежутки времени между осцилляциями система перескакивала в точку, соответствующую низкому уровню генерируемой мощности. Для  $G = 9.4\text{ dB}$  эта точка имела координаты ( $10\text{ mV}$ ,  $10\text{ mV}$ ). Перескоки носили периодический характер. Для значений  $G$ , при которых реализовывался этот режим работы генератора, фазовый портрет был аналогичным. Увеличение коэффициента усиления увеличивало время движения системы по замкнутой петле и уменьшало время нахождения в точке.

Вследствие стохастизации колебаний при  $G > 11.7\text{ dB}$  форма аттрактора значительно изменялась. Траектории начинали занимать в фазовом пространстве некоторый объем, плотно заполняя его. На рис. 5, *b* показан фазовый портрет, соответствующий временной реализации при  $G = 15.1\text{ dB}$ , представленной на левой части рис. 4, *c*. Поскольку в этом режиме наблюдались хаотические импульсы с основанием вблизи уровня  $0\text{ mV}$ , фазовый портрет был вытянут к началу координат. Бифуркация, происходящая при  $G = 18.7\text{ dB}$ , изменяла временную реализацию, что приводило к изменению фазового портрета. Фазовые траектории начинали вращаться вокруг некоторой точки фазового пространства, не приближаясь к началу координат (рис. 5, *c*).

Бесструктурные фазовые портреты, показанные на рис. 5, *b, c*, характерны для систем, генерирующих либо хаотический сигнал с большой фрактальной размерностью, либо сигнал, имеющий природу случайного шума, фрактальная размерность которого не ограничена [16]. Чтобы выяснить природу генерируемых сигналов, был проведен расчет фрактальных размерностей полученных аттракторов.

Для расчета значений фрактальной размерности был использован алгоритм Грассбергера—Прокаччиа [17]. Он заключается в покрытии всего фазового портрета гиперсферами с характеристическим размером  $l$  и построении зависимости величины корреляционной суммы  $C$  от

значения  $l$ . Под корреляционной суммой  $C$  понимается среднее число точек фазового портрета, попадающих внутрь сферы. Значения корреляционной суммы и характеристического расстояния связаны соотношением

$$C(l) \propto l^{D_C}, \quad (2)$$

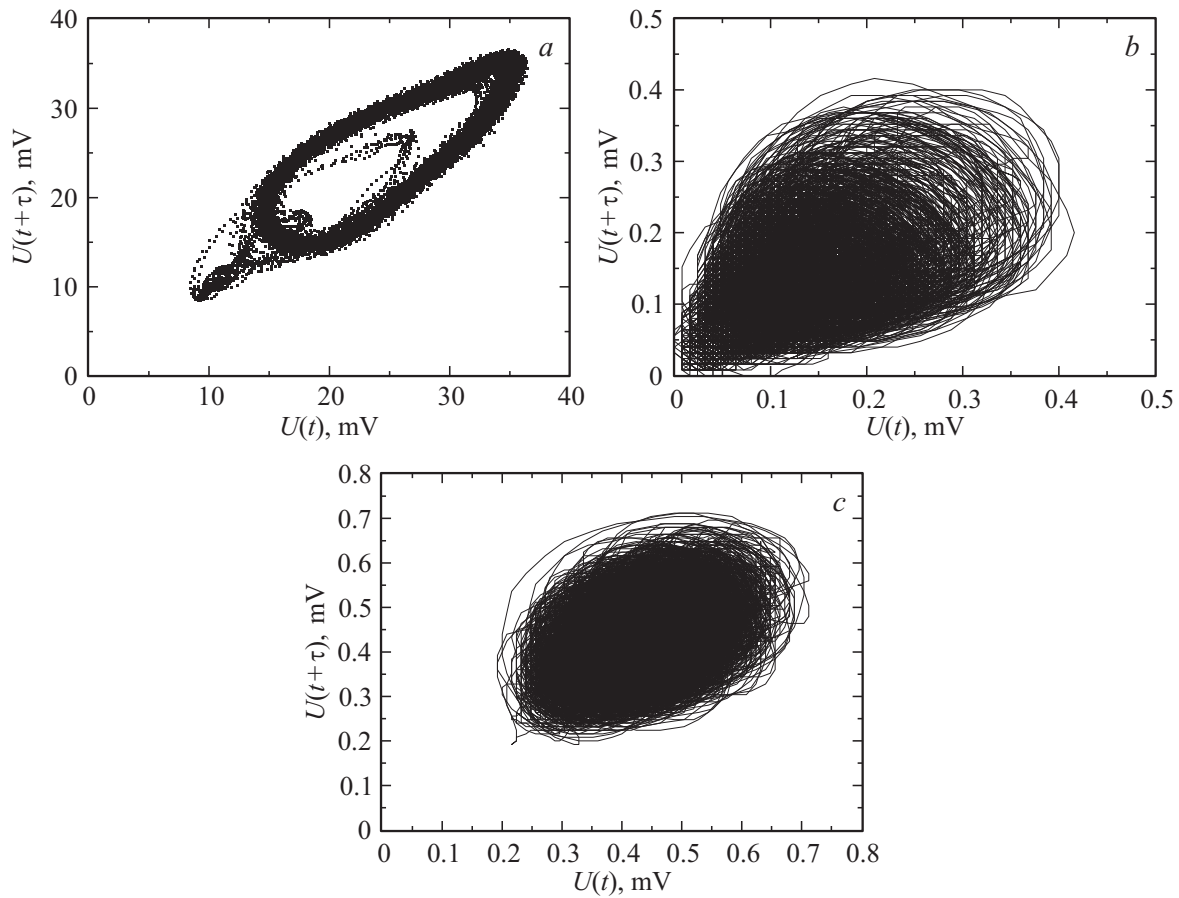
где  $D_C$  — корреляционная размерность проекции аттрактора в  $d$ -мерное фазовое пространство. Ее величина характеризует геометрическую форму проекции аттрактора, т.е. его топологию. Значение корреляционной размерности может меняться при увеличении размерности фазового пространства  $d$ , что объясняется более полным совпадением топологии аттрактора с топологией его проекции. Если начиная с некоторого значения  $d$  корреляционная размерность  $D_C$  проекции перестает изменяться, то топология проекции совпадает с топологией аттрактора, а полученное значение размерности  $D_C$  проекции является фрактальной размерностью аттрактора.

На рис. 6, *a* в логарифмическом масштабе показаны графики зависимостей корреляционной суммы от характеристического расстояния для аттрактора, полученного при  $G = 15.1\text{ dB}$  (рис. 5, *b*). В таком масштабе наклон линейной области зависимостей соответствует значению  $D_C$ . Разные линии на графике соответствуют различным значениям размерности фазового пространства  $d$ .

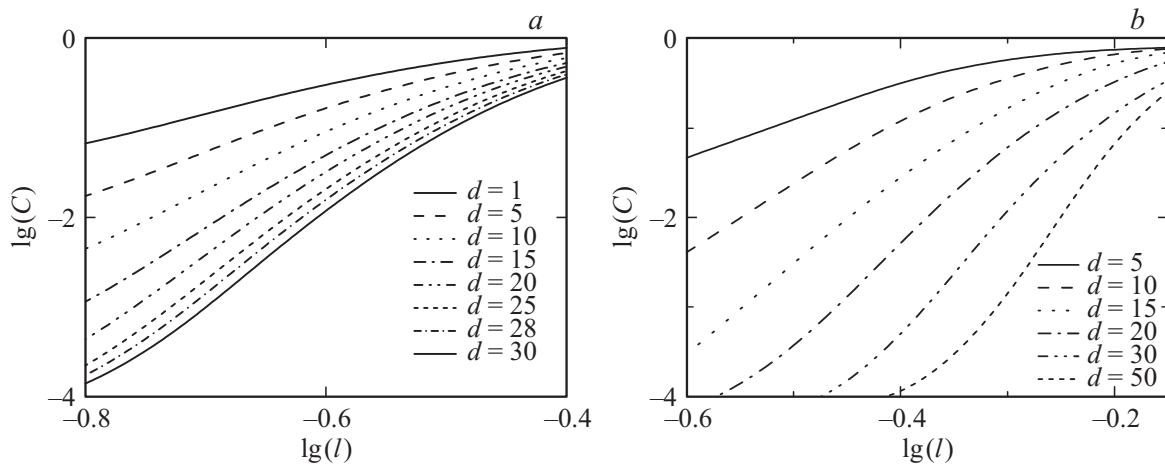
В соответствии с вышеизложенным можно видеть, что с ростом  $d$  наклон линейных областей зависимостей  $\lg(C)$  от  $\lg(l)$  сначала возрастает, что соответствует росту  $D_C$ . Затем при достижении  $d = 28$  наклон перестает заметно изменяться. Это говорит о том, что дальнейшее увеличение размерности фазового пространства не приводит к более точному определению топологии фазового портрета, а его размерность равна размерности странного аттрактора.

На рис. 6, *b* показаны графики зависимостей  $\lg(C)$  от  $\lg(l)$  для аттрактора, полученного при  $G = 22.9\text{ dB}$  (рис. 5, *c*). Из рисунка видно, что наклон линейных областей зависимостей растет вплоть до достаточно большого значения  $d = 50$ , не демонстрируя замедления роста. Это говорит об отсутствии упорядоченности во взаимном расположении траекторий фазового портрета.

На основе результатов, показанных на рис. 6, были построены зависимости корреляционных размерностей  $D_C$  от размерности фазового пространства  $d$ , которые приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что для  $G = 15.1\text{ dB}$  зависимость  $D_C(d)$  выходит на уровень 11.5 и далее не изменяется при размерности фазового пространства  $d = 28$ . Наличие уровня насыщения говорит о том, что при  $G = 15.1\text{ dB}$  форма фазового портрета и его проекций определялись формой странного аттрактора, возникшего в фазовом пространстве. Фрактальная размерность аттрактора равнялась 11.5, а минимальная размерность вложения равнялась 28. Конечные значения фрактальной и минимальной размерностей вложения



**Рис. 5.** Двумерные фазовые портреты СВЧ сигнала, генерируемого при  $G = 9.4$  dB (a), хаотической генерации для  $G = 15.1$  dB (b) и при шумовой генерации для  $G = 22.9$  dB (c).



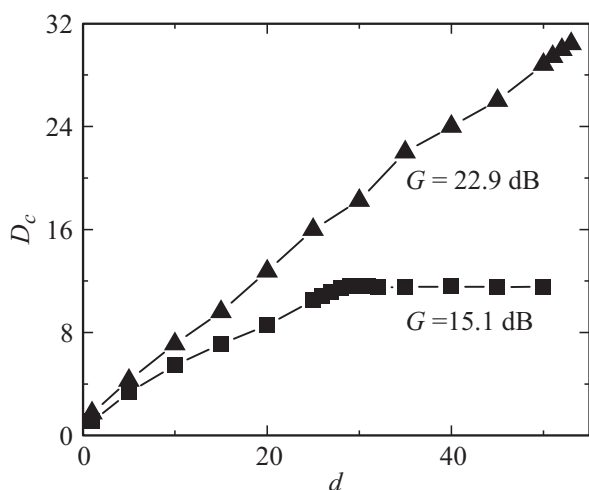
**Рис. 6.** Зависимости корреляционного интеграла от характеристического расстояния в логарифмическом масштабе, соответствующие хаотической генерации для  $G = 15.1$  dB (a) и при шумовой генерации для  $G = 22.9$  dB (b).

характеризуют наблюдавшийся сигнал как динамический хаос [16]. Зависимость  $D_C(d)$  для  $G = 22.9$  dB не имеет уровня насыщения, что свидетельствует в пользу шумовой природы генерируемого сигнала. Таким образом, результаты анализа фазовых портретов позволяют за-

ключить, что при  $G = 18.7$  dB генерация динамического хаоса в радиофотонном генераторе сменялась шумовой генерацией.

Помимо значения фрактальной размерности были рассчитаны значения старших показателей Ляпунова,





**Рис. 7.** Зависимости корреляционной размерности от размерности вложения, соответствующие хаотической генерации для  $G = 15.1$  dB (квадратики) и шумовой генерации для  $G = 22.9$  dB (треугольники).

характеризующих устойчивость аттрактора в фазовом пространстве. Расчет был проведен для размерности фазового пространства  $d = 28$  с помощью программного пакета Tisean [18]. Расчеты показали, что при  $G = 15.1$  dB старший Ляпуновский показатель имел значение  $2.8 \mu\text{s}^{-1}$ , а при  $G = 22.9$  dB он равнялся  $14.8 \mu\text{s}^{-1}$ . Полученные значения указывают на то, что в обоих случаях существует перемешивание фазовых траекторий в фазовом пространстве, но во втором случае разбегание траекторий фазового пространства более интенсивное. Это подтверждает то, что в радиофотонном генераторе с увеличением коэффициента усиления кольца сначала происходит переход от регулярной динамики к хаотической, а затем к шумовой.

## Заключение

Проведенное исследование показывает, что радиофотонный кольцевой генератор демонстрирует богатую нелинейную динамику. Для периодических режимов автогенерации характерны колебания с большой и малой частотами отстройки. При хаотической генерации для спектра характерны повышенный шумовой пьедестал с отдельными ярко выраженными гармониками, а временные реализации имеют вид хаотических последовательностей импульсов. В режиме шумовой генерации спектр сигнала имеет равномерную плотность мощности, а сигнал во времени имеет сложную аperiodическую форму.

Вид динамического режима, реализующегося в генераторе, подтверждается результатами анализа осциллограмм. В режиме хаотической генерации корреляционная размерность с ростом размерности вложения выходит в насыщение. При шумовой генерации такого насыщения не происходит. Сценарий перехода от авто-

генерации монохроматического сигнала к хаотической, а затем к шумовой автогенерации не носит универсальный характер.

Экспериментальная часть работы выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-02-00496 и 15-32-20357 мол\_а\_вед, гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ, а также госзадания Минобрнауки РФ. Теоретическая часть работы выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10440).

## Список литературы

- [1] Chaotic Signals in Digital Communications / Ed. by M. Eisencraft, R. Attux, R. Suyama. Boca Raton: CRC Press, 2013. 264 p.
- [2] Chaotic Signal Processing / Ed. by H. Leung. Philadelphia: SIAM, 2013. 367 p.
- [3] Li W., Reidler I., Aviad Y., Huang Y., Song H., Zhang Y., Rosenbluh M., Kante I. // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111. P. 044 102.
- [4] Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A., Kurkin S.A., Gaifullin M.B., Alexeeva N.V., Alekseev K.N., Greenaway M.T., Fromhold T.M., Patané A., Kusmartsev F.V., Maksimenko V.A., Moskalenko O.I., Balanov A.G. // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 112. P. 116 603.
- [5] Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Румянцев Н.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 2. С. 1–9.
- [6] Wu M., Kalinikos B.A., Patton C.E. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 237 202.
- [7] Гришин С.В., Гришин В.С., Романенко Д.В., Шараевский Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 19. С. 51–59.
- [8] Ustinov A.B., Kondrashov A.V., Nikitin A.A., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. P. 234 101.
- [9] Hagerstrom A., Wu M., Eykholt R., Kalinikos B.A. // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. P. 104 402.
- [10] Белкин М.Е., Сугов А.С. // Радиотехн. и электрон. 2009. Т. 54. Вып. 8. С. 901–914.
- [11] Liang W., Eliyahu D., Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Seidel D., Maleki L. // Nat. Commun. 2015. Vol. 6. P. 7957.
- [12] Callan K.E., Iling L., Gao Z., Gauthier D.J., Schöll E. // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 104. P. 113 901.
- [13] Устинов А.Б., Кондрашов А.В., Калинин Б.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 8. С. 28–36.
- [14] Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радио-технических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
- [15] Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 7. С. 65–74.
- [16] Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001. 528 с.
- [17] Grassberger P., Procaccia I. // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 50. P. 346–348.
- [18] Schreiber T., Schmitz A. // Phys. D. 2000. Vol. 142. P. 346–350.