

11

Генерация одиночных хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой под внешним шумовым воздействием

© С.В. Гришин, С.А. Никитов, Д.В. Романенко,
В.О. Худоложкин, Ю.П. Шараевский

Саратовский государственный университет
Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
НПЦ „Алмаз–Фазотрон“, Саратов
E-mail: grishfam@sgu.ru

Поступило в Редакцию 6 августа 2012 г.

Наблюдалась генерация одиночных хаотических СВЧ-импульсов в широкополосной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой под воздействием внешнего узкополосного шумового СВЧ-сигнала, находящегося за полосой частот хаотического СВЧ-сигнала. Хаотическая генерация возникла при параметрической неустойчивости поверхностной магнитостатической волны в ферромагнитной пленке, а формирование одиночных хаотических СВЧ-импульсов было обусловлено отсутствием полного подавления хаоса при узкополосном шумовом воздействии.

В настоящее время в связи с развитием теории динамического хаоса и созданием источников хаотических сигналов исследуется возможность использования динамического хаоса для передачи информации [1]. Среди хаотических сигналов наиболее перспективными носителями информации в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) являются периодические последовательности хаотических радиоимпульсов, представляющие собой фрагменты исходного хаотического сигнала с длительностями, превышающими длину „квазипериода“ хаотических колебаний [1]. Такие импульсные последовательности обычно формируются в автоколебательных системах с помощью электронных ключей [1] или модуляции питания транзисторного усилителя мощности [2].

Как показано в [3], периодические последовательности хаотических радиоимпульсов можно формировать за счет подавления хаоса внешними радиоимпульсами. В этом случае подавление хаотической динамики наблюдается на тех временных интервалах, где присутствует внешний СВЧ-сигнал, а на временных интервалах, где внешний СВЧ-сигнал отсутствует, генерируется хаос. В [3] последовательности хаотических радиоимпульсов формируются в клистронном генераторе хаоса при внешнем СВЧ-сигнале, находящемся на краю полосы частот хаотического сигнала (отстройка 13 МГц при центральной частоте клистрона 2797 МГц).

Впервые периодические последовательности хаотических СВЧ-импульсов с использованием частотного разделения хаотического и внешнего импульсно-модулированного (ИМ) СВЧ-сигналов были сформированы в широкополосном кольцевом генераторе хаоса на основе ферромагнитной пленки [4]. В такой автоколебательной системе генерация хаотического СВЧ-сигнала обусловлена параметрической неустойчивостью поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ), распространяющейся в ферромагнитной пленке. Здесь, как и в [3], при подаче внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала на вход усилителя наблюдается формирование хаотических СВЧ-импульсов за счет подавления хаоса на определенных временных интервалах. Однако в отличие от [3], при частотном разделении сигналов реализуется фильтрация внешнего сигнала на выходе генератора. Предложенный способ частотного разделения сигналов приводит, во-первых, к возможности наблюдать только за изменениями хаотического сигнала как во временной, так и в частотной областях, а во-вторых, к значительному подавлению гармонической составляющей между хаотическими СВЧ-импульсами.

Селекция хаотического СВЧ-сигнала позволяет наблюдать за изменением его характеристики при воздействии на автоколебательную систему более сложных СВЧ-сигналов, например гауссова шума. Случайное изменение во времени огибающей шумового СВЧ-сигнала дает возможность предположить, что подавление хаоса будет не всегда полным (т.е. подавление будет наблюдаться не на всех временных интервалах) в связи с большой вероятностью появления у огибающей такого сигнала нулевых значений. Генерация хаотического СВЧ-сигнала вблизи этих значений будет наблюдаться, по-видимому, в тех случаях, когда характерное время изменения огибающей шумового сигнала пре-

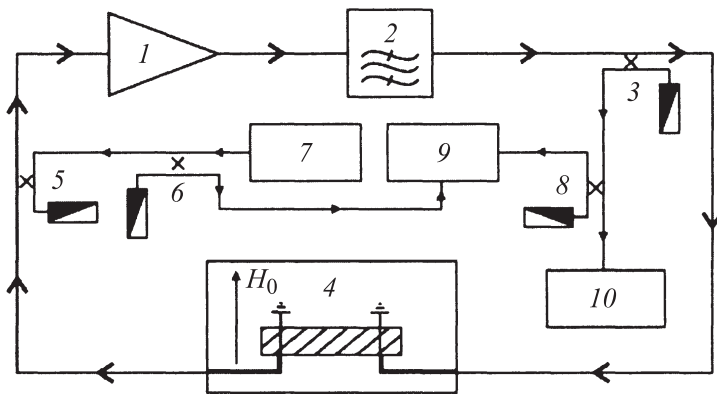


Рис. 1. Схема неавтономной кольцевой автоколебательной системы.

вышает квазипериод хаотических колебаний. Такая ситуация возможна при ширине полосы частот шумового СВЧ-сигнала, меньшей значения центральной частоты хаотического СВЧ-сигнала. Однако до настоящего времени подавление хаотической динамики широкополосного генератора при воздействии на него узкополосного шумового СВЧ-сигнала большой интенсивности не исследовалось.

В данном сообщении впервые демонстрируется генерация одиночных хаотических СВЧ-импульсов в широкополосной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой при внешнем узкополосном шумовом воздействии. Генерация одиночных хаотических СВЧ-импульсов наблюдается в случае, когда узкополосный шумовой СВЧ-сигнал большой интенсивности находится вне полосы частот хаотического СВЧ-сигнала, но в полосе частот усилителя мощности.

Исследуемая широкополосная автоколебательная система представляет собой последовательно соединенные в кольцо усилитель на полевых транзисторах GaAs 1, полосно-пропускающий фильтр 2 и нелинейную спин-волновую линию задержки 4 (рис. 1). Транзисторный усилитель характеризуется коэффициентом усиления в линейном режиме $K = 38.5$ dB в полосе частот 1.8–4.0 GHz и уровнем мощности насыщения $P_{sat} = 32.5$ dBm при входной мощности $P_{in} = +0.5$ dBm. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр обладает в полосе пропускания минимальным уровнем ослабления $A_0 = 10$ dB на частоте

те $f_0 = 1.979$ GHz, шириной полосы пропускания по уровню 3 dB $f_{3\text{dB}} = 80$ MHz и по уровню 40 dB $f_{40\text{dB}} = 191$ MHz. Спин-волновая линия задержки имеет полосковые проводники шириной $30\ \mu\text{m}$, расположенные на расстоянии 6 mm относительно друг друга. Пленка железитриевого граната с размерами $4 \times 10 \times 0.04$ mm накладывается поверх проводников. Внешнее постоянное магнитное поле направлено параллельно проводникам и подбирается таким образом, чтобы в пленке возбуждалась ПМСВ. Основная часть мощности с выхода усилителя возвращается обратно в кольцо, а меньшая часть мощности через направленные ответвители 3, 8 поступает на первый канал четырехканального осциллографа реального времени DSO81004B 9, имеющего полосу частот 10 GHz, и анализатор спектра ESA-E E4402B 10. Внешний узкополосный шумовой СВЧ-сигнал с шириной полосы $\Delta f_n = 5$ MHz формируется с помощью генератора ESG E4438C 7 и заводится в кольцо на вход усилителя 1 через направленный ответвитель 5. Для анализа шумового сигнала во временной области меньшая его часть поступает на второй канал осциллографа 9 через направленный ответвитель 6. При проведении эксперимента измерение временных реализаций сигналов (шумового и хаотического) с выходов ответвителей 5 и 8 синхронизируется во времени с учетом суммарного времени задержки 31 ns усилителя 1 и фильтра 2.

В автономном режиме исследуемая автоколебательная система генерирует широкополосный хаотический СВЧ-сигнал в полосе частот ~ 150 MHz (рис. 2, а) за счет параметрической неустойчивости ПМСВ первого порядка [5,6]. Одна из временных реализаций такого сигнала представлена на рис. 2, б (нижняя реализация). Уровень интегральной мощности хаотического СВЧ-сигнала соответствует линейному режиму работы усилителя.

В качестве внешнего воздействия используется узкополосный гауссов шум, который подается на вход усилителя в первом случае в полосе частот хаотического СВЧ-сигнала (рис. 2), а во втором — за его полосой (рис. 3). В первом случае, как следует из результатов, приведенных на рис. 2, а, при мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала, соответствующей режиму насыщения усилителя, наблюдается подавление спектральных составляющих хаотического СВЧ-сигнала. Спектр мощности генерируемого в кольце СВЧ-сигнала соответствует спектру мощности шумового СВЧ-сигнала при его прохождении через усилитель вне кольца. Как следует из рис. 2, б (верхняя реализация),

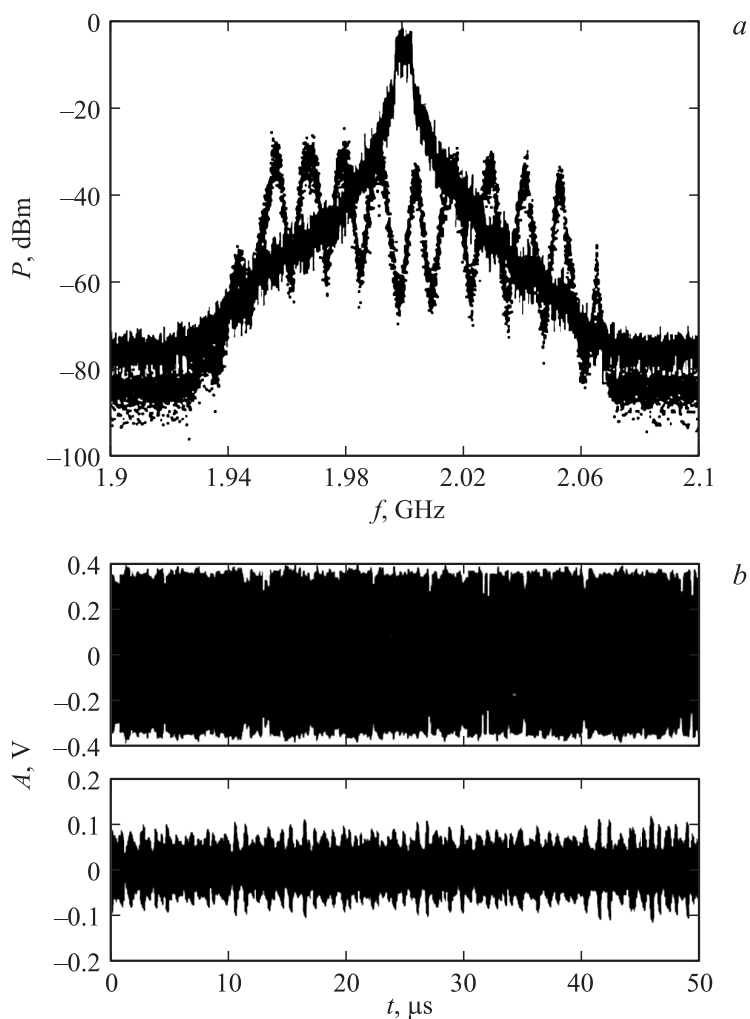


Рис. 2. Спектры мощности (а) хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого под внешним шумовым воздействием (сплошная линия) и в автономном режиме (точки); временные реализации (б) хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого под внешним шумовым воздействием (верхняя реализация) и в автономном режиме (нижняя реализация). Частота шумового СВЧ-сигнала $f_n = 2$ GHz, его мощность — $P_n = +10$ dBm.

генерируемый системой сигнал имеет больший размах по амплитуде и является ограниченным по сравнению с хаотическим сигналом в автономном режиме (рис. 2, *b* — нижняя реализация).

Наиболее интересным, на наш взгляд, является второй случай, когда отстройка по частоте между хаотическим и шумовым сигналами составляет величину ~ 900 МГц, что превышает суммарную полосу частот обоих сигналов практически в шесть раз. Использование в кольце полосового фильтра дает возможность значительно ослабить шумовой сигнал относительно хаотического сигнала, а применение цифровых фильтров при обработке временных реализаций позволяет полностью отфильтровать шумовой СВЧ-сигнал.

Как следует из представленных на рис. 3 результатов, при мощности шумового СВЧ-сигнала $P_n = -2$ dBm (рис. 3, *a*), соответствующей нелинейному режиму работы усилителя, наблюдаются изменения в хаотической динамике системы. В частотной области максимальные уровни спектральных компонент хаотического СВЧ-сигнала уменьшаются, а во временной области хаотический сигнал становится более „разреженным“ по сравнению с автономным режимом (рис. 2, *b*). Воздействие шума приводит к тому, что на одних временных интервалах хаотическая динамика полностью подавляется, а на других интервалах времени наблюдается генерация хаотических колебаний в виде цугов (хаотических импульсов). На вставке к рис. 3, *a* показан один из таких цугов с длительностью ~ 500 ns, тонкая структура которого состоит из последовательности одиночных импульсов с длительностью ~ 40 ns. Генерация хаотических колебаний наблюдается вблизи минимальных значений огибающей шумового СВЧ-сигнала и прекращается при превышении огибающей некоторого порогового значения. Отметим, что генерация одиночных хаотических СВЧ-импульсов впервые наблюдалась в [5], однако данные импульсы формировались в автономном генераторе хаоса.

Дальнейшее увеличение мощности шума до $P_n = +10$ dBm (рис. 3, *b*), когда усилитель работает в режиме насыщения выходной мощности, приводит к увеличению вероятности появления значений огибающей шумового сигнала, превышающих порог подавления хаоса, и, как следствие этого, к увеличению длительности временных интервалов, на которых хаотическая динамика системы является подавленной. В этом случае во временной области отчетливо видны отдельные всплески хаотической генерации в виде случайной последовательности

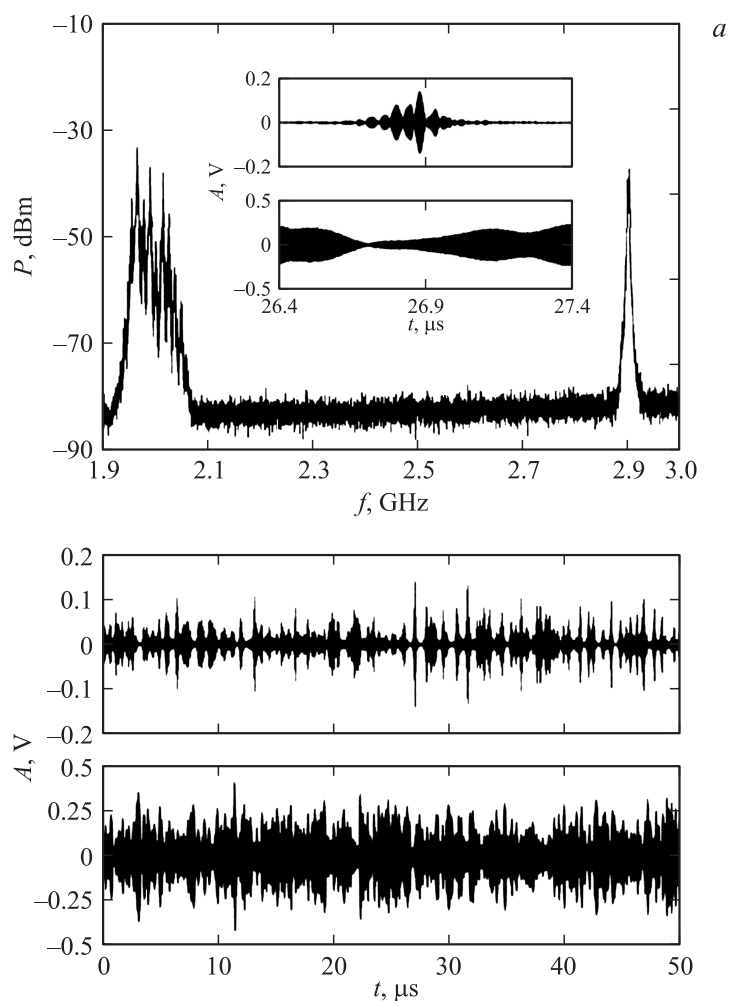
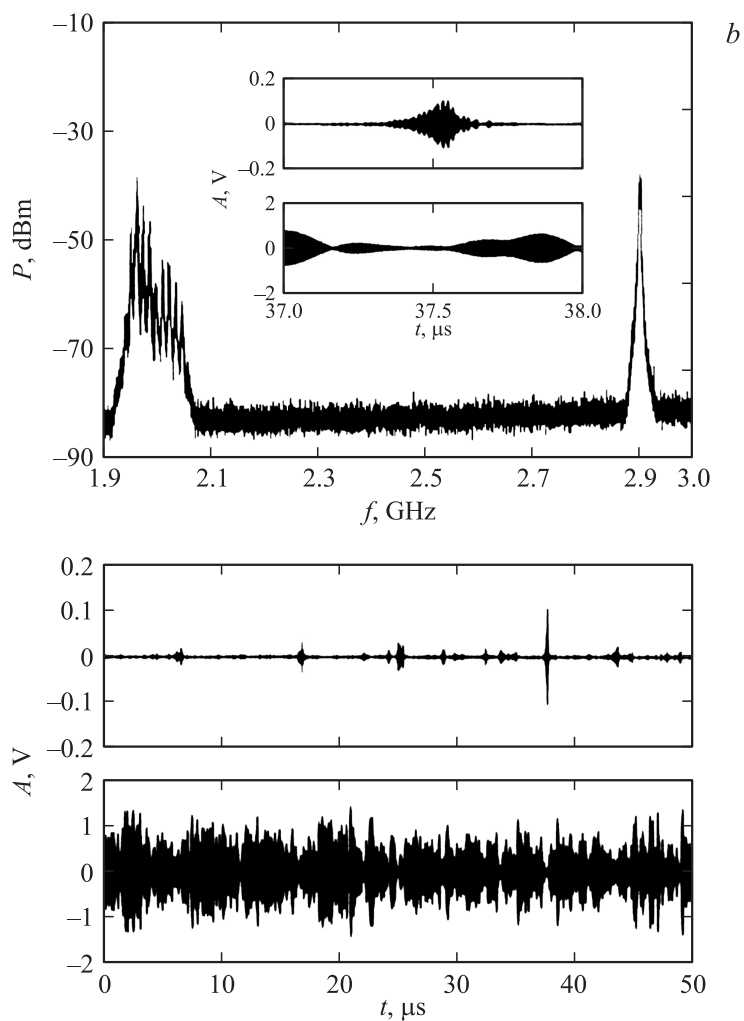


Рис. 3. Спектры мощности (левая колонка) хаотического СВЧ-сигнала под воздействием шума с частотой $f_n = 2.9$ GHz, а также синхронно измеренные временные реализации (правая колонка) хаотического СВЧ-сигнала под воздействием шума (верхние реализации) и шумового СВЧ-сигнала с выхода генератора шума (нижние реализации) при различных уровнях мощности шума P_n : -2 dBm (a) и $+10$ dBm (b). На вставках показаны фрагменты сигналов с верхних и нижних временных реализаций.

**Рис. 3** (продолжение).

цугов (хаотических импульсов), которые могут иметь длительности ~ 400 ns (см. вставку на рис. 3, *b*). Тонкая структура такого цуга не содержит последовательности одиночных импульсов, как на вставке к

рис. 3, а. В частотной области наблюдается подавление максимальных значений спектральных уровней мощности хаотического сигнала на величину ~ 20 dB, но ширина спектра хаотического сигнала по основанию его пьедестала остается практически постоянной.

Подавление хаотической динамики системы можно объяснить явлением кроссмодуляции в усилителе [7], приводящим к уменьшению коэффициента усиления сигнала малого уровня мощности (хаотического сигнала) при подаче на усилитель сигнала большого уровня мощности (шумового сигнала), отстроенного по частоте от малого сигнала. Уменьшение коэффициента усиления хаотического сигнала с ростом мощности шума приводит к срыву генерации хаотического сигнала на тех интервалах времени, где огибающая шумового сигнала превышает некоторое пороговое значение, что и обуславливает генерацию цугов хаотических колебаний. Необходимо подчеркнуть, что полного подавления хаотической динамики автоколебательной системы не удается достигнуть даже при максимально допустимых уровнях мощности шумового СВЧ-сигнала на входе усилителя.

Исходя из представленных на рис. 3 результатов, можно предположить, что такие же цуги хаотических колебаний должны генерироваться и при подаче узкополосного шума в полосу частот хаотического СВЧ-сигнала (рис. 2). Однако в последнем случае из-за отсутствия частотного разделения сигналов идентификация хаотических импульсов затруднена тем, что амплитуда шумового сигнала значительно превышает амплитуду хаотических СВЧ-импульсов.

Представленные результаты демонстрируют эффект генерации одиночных хаотических СВЧ-импульсов в широкополосной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой за счет неполного подавления хаоса при внешнем узкополосном шумовом воздействии. Дальнейшие исследования в этом направлении целесообразно продолжить для выяснения возможности генерации более коротких одиночных хаотических СВЧ-импульсов под воздействием широкополосных СВЧ-сигналов, включая шумовые и хаотические.

Авторы выражают благодарность начальнику лаборатории ЗАО НПЦ „Алмаз-Фазотрон“, к.т.н. В.С. Гришину за обсуждение результатов данной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00057), гранта правительства РФ для государственной поддержки

научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (проект № 11.G34.31.0030), президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-1430.2012.2) и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (проект № 14.740.11.1078).

Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [2] *Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 15. С. 1–6.
- [3] *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н.* // Патент на изобретение. РФ. № 2349027. 2009. Бюллетень № 7.
- [4] *Гришин С.В., Зарькова Е.В., Шараевский Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 5. С. 96–104.
- [5] *Wu M., Kalinikos D.F., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 237 202.
- [6] *Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 89–98.
- [7] *Goldberg H.V.* // Eletronic Design. 1970. V. 18. N 10. P. 76–78.