

11;15

Генератор микроволнового хаоса с плоской огибающей спектра мощности в диапазоне 3–8 GHz

© А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Н.В. Румянцев

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Московский физико-технический институт (Государственный
университет), Московская область, Долгопрудный
E-mail: chaos@cplire.ru

Поступило в Редакцию 22 августа 2013 г.

В настоящее время активно развиваются сверхширокополосные (СШП) средства связи и радиолокации в нелицензируемом диапазоне частот 3.1–10.6 GHz. Одним из перспективных типов сверхширокополосных сигналов являются хаотические колебания. Предлагается и исследуется генератор хаотических колебаний с равномерной спектральной плотностью мощности в диапазоне частот 3–8 GHz. Обсуждается возможность использования таких генераторов в многополосных системах СШП связи и в качестве шумовых сигналов при радиотехнических измерениях.

Хаотические сигналы микроволнового диапазона рассматриваются как эффективный носитель информации для СШП беспроводных средств связи и введены в стандарты IEEE 802.15.4a (беспроводные персональные сети сверхширокополосной связи) [1] и IEEE 802.15.6 (беспроводные персональные сети медицинского и бытового назначения) [2]. Особый интерес представляет стандарт IEEE 802.15.6, поскольку он регламентирует использование СШП сигналов для массового индивидуального применения. Кроме персональной связи динамический хаос

как носитель информации важен для средств ближней радиолокации и радиовидения [3,4].

К настоящему времени в США, Евросоюзе, Японии, Корее и ряде других стран разрешено нелицензируемое использование СШП сигналов для беспроводной связи в диапазоне частот от 3.1 до 10.6 GHz (в России от 2.85 до 10.6 GHz) и приняты соответствующие спектральные маски. С учетом специфики разрешенных спектральных плотностей в разных странах, принявших спектральные маски, технологических возможностей и условий распространения наибольшее внимание исследователей и разработчиков уделяется диапазону частот от 3 до 8 GHz. В связи с этим актуальной является задача создания источников хаоса, работающих в этом диапазоне частот, и особенно универсальных источников хаоса, перекрывающих его целиком. При этом требуется обеспечить не только генерацию СШП хаотического сигнала с полосой 5 GHz, но и его достаточно равномерную спектральную плотность мощности в этой полосе.

В данной работе исследуется возможность создания такого микроволнового источника хаоса.

Теория генерации хаотических сигналов с заданным спектром мощности впервые была разработана для кольцевых автоколебательных систем с нелинейным элементом, имеющим падающий участок [5]. Однако при технической реализации твердотельные элементы с падающим участком представляют собой достаточно сложные устройства, реализации которых для микроволнового диапазона авторам неизвестны. Поэтому в дальнейшем разрабатывались принципы генерации, теория и методы расчета источников хаоса радио- и микроволнового диапазонов, в том числе с требуемыми спектральными характеристиками, использующих в качестве активных элементов СВЧ-транзисторы [6]. В [6] представлен также ряд примеров разработки хаотических осцилляторов, в том числе с мало меняющейся спектральной плотностью внутри некоторого заданного диапазона частот.

При этом показано, что создание источника хаоса с полосой частот более 2.5 октав, как в рассматриваемом случае, требует тонкого решения задачи синтеза системы. Кроме того, при значительном повышении верхней граничной частоты генерации начинают серьезно сказываться два фактора, которые были не так существенны при разработке генератора хаоса в диапазоне частот ниже 5–6 GHz, а именно: 1) размеры элементов схемы начинают влиять на длину

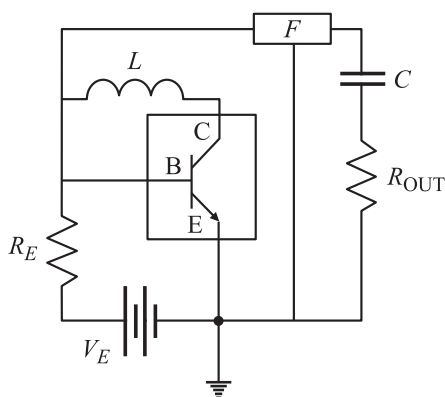


Рис. 1. Схема генератора.

связей в устройстве и 2) увеличиваются потери в материале подложки (FR-4), формальные частотные характеристики которого позволяют рассчитывать на успешное его использование до частот ~ 2 GHz.

В качестве активного элемента используется биполярный транзистор BFP620 с граничной частотой 70 GHz. Формальная эквивалентная схема предлагаемого генератора показана на рис. 1. По сравнению с генераторами хаоса более низких частот [6] в рассматриваемой системе отсутствует ряд элементов. Дело в том, что величины эквивалентных емкостей между выводами корпуса транзистора при генерации на высоких частотах достаточно, чтобы исключить из схемы навесные конденсаторы. Кроме того, вместо чип-индуктивности используется отрезок микрополосковой линии, что позволяет уменьшить величину индуктивности в цепи обратной связи и за счет этого поднять верхнюю границу частот генерируемого сигнала.

Разработка макета генератора производилась в два этапа.

Сначала было проведено схемотехническое моделирование генератора и подобраны значения параметров, обеспечивающих генерацию хаоса в требуемом диапазоне частот. Затем на основе полученных при моделировании результатов был разработан и изготовлен экспериментальный макет, выполненный на подложке из фольгированного фторопласта толщиной 1 mm. Вид макета показан на рис. 2.

Для получения требуемых хаотических режимов исследовались динамические режимы генератора в зависимости от величины параметров

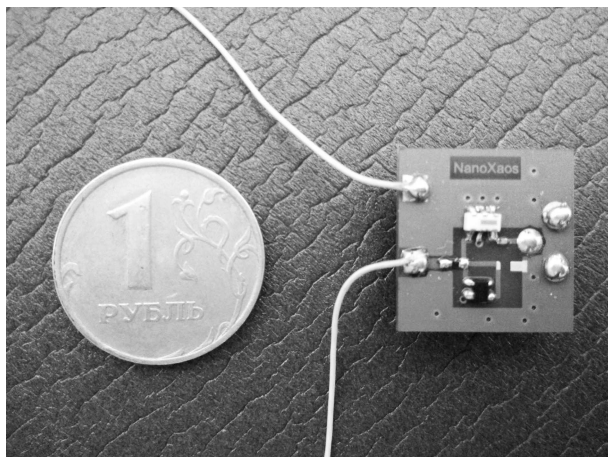


Рис. 2. Экспериментальный макет генератора.

системы. Основным параметром, определяющим динамический режим исследуемой системы, является напряжение на источнике питания. Рассмотрим эволюцию колебательных режимов генератора при изменении этого параметра.

Возбуждение колебаний в автоколебательной системе происходит при $U = 1.06 \text{ V}$ на частоте 3.58 GHz . При этом практически сразу появляется вторая гармоника основной частоты (рис. 3, *a*). При увеличении напряжения базовая частота постепенно снижается и при $U = 1.33 \text{ V}$ имеет значение 2.9 GHz . Одновременно растет спектральная амплитуда второй гармоники, которая сначала становится сопоставимой с первой, а затем начинает превышать ее. В спектре также появляется третья гармоника основной компоненты с частотой 8.7 GHz . Ее амплитуда примерно на 20 dB ниже, чем первой и второй гармоник. При $U = 1.35 \text{ V}$ происходит бифуркация, в результате которой появляется вторая базовая спектральная компонента на частоте 2.15 GHz и образуется сетка частот в диапазоне от 2 до 8 GHz . С увеличением напряжения до $U = 1.36 \text{ V}$ этот режим срывается в режим с базовой частотой генерации 1.83 GHz . Сильная нелинейность системы приводит к тому, что амплитуда первой гармоники примерно на 10 dB ниже, чем амплитуды второй и третьей гармоник. В спектре мощности наблюдается также четвертая гармоника по мощности на уровне ос-

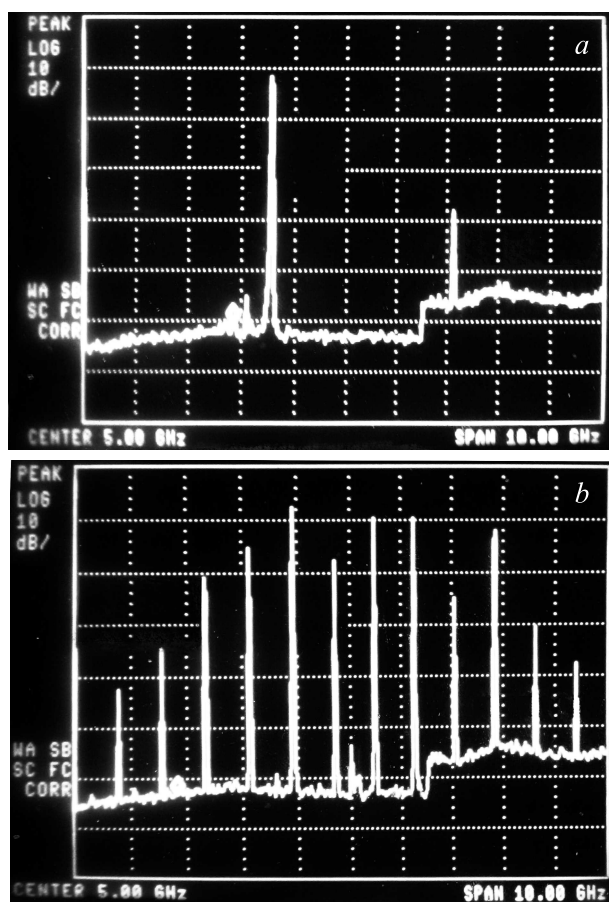


Рис. 3. Спектральная плотность мощности генерируемого сигнала при напряжении на источнике питания: *a* — $U = 1.06$ В, *b* — $U = 2.43$, *c* — $U = 2.5$, *d* — $U = 2.75$ В. По горизонтали отложена частота, диапазон частот от 0 до 10 GHz, цена деления 1 GHz; по вертикали — спектральная плотность мощности сигнала в децибелах, цена деления 10 dB.

новой гармоники. В диапазоне напряжений 2.43–2.51 В наблюдаются метастабильные режимы с различными сетками частот (рис. 3, *b*) и признаками хаотической динамики, срывающиеся через некоторое

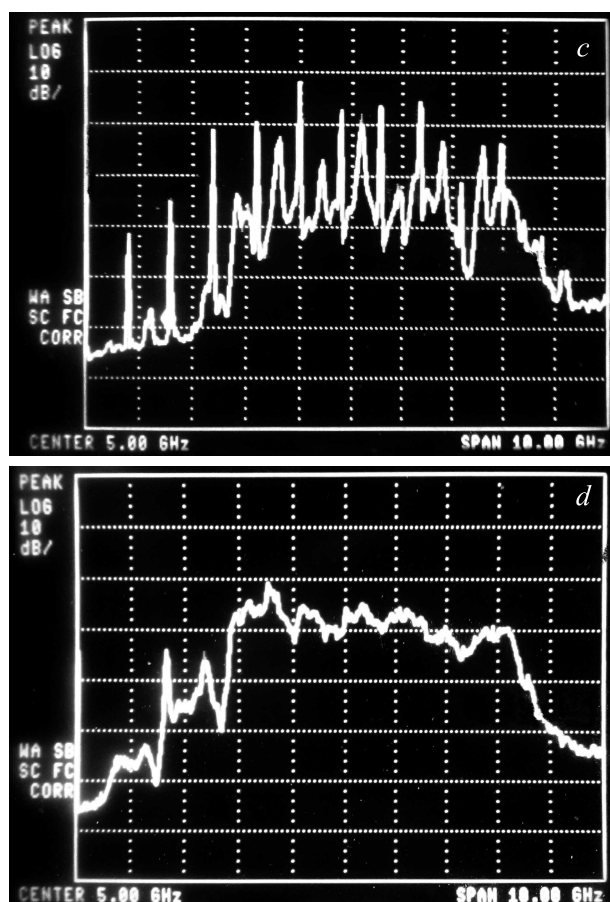


Рис. 3 (продолжение).

время в колебательный режим с базовой частотой 1.55 GHz. Начиная с напряжения питания 2.50 V, сначала в метастабильном режиме, а потом в режиме устойчивой генерации, наблюдается режим колебаний с удвоением периода (соответствующие спектральные компоненты между старшими гармониками). Затем возникает шумовая подложка (рис. 3, c), ее уровень постепенно растет и при напряжении $U = 2.75$ V образуется режим колебаний с достаточно равномерным спектром в

диапазоне 3–8 GHz (рис. 3, *d*). Полоса хаоса с равномерным спектром простирается примерно до напряжения $U = 2.78$ V, после чего возникает регулярный колебательный режим с характерным расстоянием между частотными компонентами, равным 580 MHz. Вторая область хаотических колебаний с равномерным спектром возникает при напряжении $U = 2.80$ V и простирается до напряжения $U = 3.10$ V. Ее ширина примерно в 10 раз шире, чем ширина первой зоны. При $U > 3.10$ V в спектре мощности начинают проявляться спектральные компоненты с базовой частотой 870 MHz и происходит постепенный переход к регулярному режиму с линейчатым спектром мощности. При дальнейшем увеличении напряжения вплоть до 5 V хаотических режимов не наблюдается.

На спектре мощности генерируемого хаотического сигнала наблюдается небольшой спад спектральной плотности мощности на высоких частотах, который может быть связан с большими потерями в материале подложки на высоких частотах.

Интегральная мощность колебаний в обеих областях хаотических режимов от -4.7 до -4.5 dBm в полосе генерации 5 GHz, что при пересчете на полосу 1 MHz дает среднюю спектральную плотность -42.6 dBm на MHz, что примерно соответствует ограничению на максимальную спектральную плотность излучения при нелицензируемом использовании СШП сигналов в спектральной маске США и европейских стран, но несколько выше, чем рекомендуемая спектральная плотность в маске Российской Федерации.

Эксперименты с несколькими образцами макетов продемонстрировали хорошую воспроизводимость характеристик от образца к образцу.

Таким образом, описываемый источник хаоса может рассматриваться как достаточно близкий прототип генератора СШП сигналов для систем связи, использующих в качестве носителя информации хаотические колебания.

В соответствии с законодательными актами минимальная полоса частот СШП сигнала не может быть меньше 500 MHz. Поскольку ширина полосы сигнала разработанного генератора составляет 5 GHz, он может быть использован при формировании несущих сигналов в нескольких неперекрывающихся полосах частот (до 10) многоканальных систем связи.

В заключение отметим еще одно возможное направление использования микроволновых хаотических автоколебательных систем рас-

смагриваемого типа: использование их в качестве источников шумовых сигналов при радиотехнических измерениях.

В настоящее время типовыми источниками шума для таких измерений являются калиброванные источники шумовых сигналов, реализованные на шумовых диодах [7].

Типичным шумовым диодом является диод NC303COT (компания Noisecom), работающий в диапазоне частот 0.1–8.0 GHz. Его рабочее напряжение 8–10 V, ток потребления 8 μ A и избыточный коэффициент шума (excess noise ration — ENR) 30–35 dB.

Эта же компания выпускает и шумовые модули на основе шумовых диодов, но только до частот 5 GHz. Так, шумовой модуль NC506 работает в диапазоне частот 200 kHz–5 GHz, имеет ток потребления от 0.2 до 5 mA при напряжении питания 12 V и избыточный коэффициент шума ENR 31 dB (спектральная плотность шума –143 dBm/Hz).

Как видно из этого краткого обсуждения, вопрос об эффективных источниках шумоподобных колебаний является актуальным и предпринимаются активные попытки создать такие источники на принципах, отличных от используемых в шумовых диодах [8]. В этом отношении источники хаотических колебаний являются одним из самых перспективных возможностей.

Рассматриваемый генератор хаоса имеет спектральную мощность сигнала –100 dBm/Hz, что на четыре порядка превышает характеристики шумовых источников. При этом у него в четыре раза меньше напряжение питания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 12-07-33106 мол_a_вед, ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы“, гос. контракт № 11.519.11.4027, и программы ОФН РАН „Современные проблемы радиофизики“.

Список литературы

- [1] IEEE 802.15.4a Standard for Information technology; Amendment 1: Add Alternate PHYs//2007.
- [2] IEEE P802.15.6/D01//2010.
- [3] Venkatasubramanian V., Leung H., Liu X. // IEEE Trans. On Image Procerssing. 2009. V. 18. N 6. P. 1255.

- [4] *Zhong Liu, Xiaohua Zhu, Wen Hu, Fei Jiang* // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 2007. V. 17. N 5. P. 1735.
- [5] *Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O.* // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 1996. V. 6. N 5. P. 851.
- [6] *Дмитриев А.С., Ефремов Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012. 423 с.
- [7] <http://www.noisecom.com/>
- [8] *Жилев Ю.В., Ильинская Н.Д., Инновенков А.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 15. P. 102.