

11.2

## Сверхширокополосный генератор хаоса с выделенной инерционностью микроволнового диапазона

© С.В. Савельев, Л.А. Морозова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино, Московская обл., Россия  
E-mail: mila-morozova.ludmila@yandex.ru

Поступило в Редакцию 14 января 2022 г.

В окончательной редакции 6 февраля 2023 г.

Принято к публикации 6 февраля 2023 г.

Предложена оригинальная схема построения сверхширокополосного однотранзисторного генератора шумоподобных колебаний микроволнового диапазона длин волн. Генератор содержит инерционный преобразователь выходного сигнала нелинейного усилителя с положительной обратной связью, сигналом которого модулируется напряжение питания активного элемента (транзистора). Создан экспериментальный макет генератора хаотического сигнала на базе отечественного транзистора 2Т982А-2, работающего в режиме малого сигнала. Полоса частот генерируемых шумовых колебаний при неравномерности спектра мощности 5 dB занимала диапазон частот от 2.3 до 7.4 GHz при интегральной мощности 5 mW с усредненной спектральной плотностью шумовых колебаний  $10^{-6}$  W/MHz. КПД генератора составил 1%.

**Ключевые слова:** мощный биполярный транзистор, сверхширокополосный спектр, динамический хаос, генератор с выделенной инерционностью.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.08.55128.19138

Генерирование шумовых широкополосных сигналов микроволнового диапазона длин волн тесно связано с созданием систем генерации на транзисторах [1–4]. Схемы устройств генерации высокой мощности обычно содержат один активный элемент — транзистор, работающий в режиме большого сигнала, — и пассивные элементы и позволяют добиваться высоких энергетических показателей выходного сигнала в полосе частот до 15% [4]. Наиболее ярким представителем транзисторов такого класса является отечественный мощный кремниевый транзистор 2Т982А-2 с эпитаксиально-планарной структурой  $n-p-n$ -типа. Данный транзистор в течение нескольких десятилетий с успехом применяется для построения мощных источников широкополосных хаотических колебаний микроволнового диапазона с усредненной спектральной плотностью шумовых колебаний  $10^{-3}$  W/MHz при КПД до 15%. Такие системы генерации предназначены для использования в системах радиолокации и приборостроения.

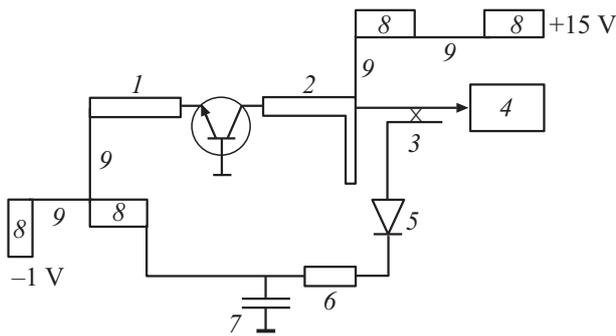
Вместе с тем остро стоит задача создания простых и надежных генераторов сверхширокополосных (СШП) колебаний микроволнового диапазона, имеющих усредненную спектральную плотность шумовых колебаний до  $10^{-6}$  W/MHz по порядку величины, для систем передачи информации, внутреннего управления устройствами беспроводных средств связи. Для использования таких систем были введены стандарты IEEE 802.15.4a для беспроводных персональных сетей сверхширокополосной связи и IEEE 802.15.6 для беспроводных персональных сетей медицинского и бытового назначения. Интерес представляет стандарт IEEE 802.15.6, поскольку он определяет использование СШП-сигналов для массового

индивидуального применения [5,6]. Кроме персональной связи сигнал со свойствами динамического хаоса востребован как носитель информации для средств ближней радиолокации и радиовидения [7,8].

В России, странах Евросоюза, Японии и др. разрешено нелицензируемое использование СШП-сигналов для беспроводной связи в диапазоне частот от 2.85 до 10.6 GHz со спектральной плотностью шумовых колебаний до  $10^{-6}$  W/MHz с соответствующими спектральными масками на неравномерность спектра мощности, составляющей 3–5 dB. Однако с учетом выполнения требований к использованию разрешенных спектральных плотностей и принятых спектральных масок наибольшее внимание уделяется диапазону частот от 3 до 8 GHz. Таким образом, актуальным является создание источников сверхширокополосных хаотических колебаний, работающих в указанном микроволновом диапазоне при спектральной плотности мощности в полосе генерации, соответствующей приведенным стандартам.

В настоящей работе продемонстрирована возможность генерации сверхширокополосных хаотических колебаний на базе транзистора 2Т982А-2 с параметрами, обеспечивающими требования международных стандартов систем связи.

Требования стандартов IEEE 802.15.4a,b накладывают строгие ограничения на параметры СШП-сигналов, использование которых разрешено в беспроводной связи в микроволновом диапазоне длин волн. Указанный выше нелицензируемый микроволновый диапазон и принятые спектральные маски дают реальную возможность использования в таких системах транзисторов высокой мощности. Такое построение источников динамического



**Рис. 1.** СШП-генератор с выделенной инерционностью в микроволновом диапазоне. 1 — согласующая цепь эмиттера, 2 — согласующая цепь коллектора, 3 — ответвитель электромагнитной мощности, 4 — нагрузка, 5 — диод Д403В, 6 — сопротивление, 7 — конденсатор, 8 и 9 — элементы фильтров питания на четвертьволновых линиях.

хаоса реализует простоту, надежность и компактность предлагаемых для решения данной задачи устройств.

Для обеспечения реализации поставленной задачи предлагается использовать автогенератор на базе транзистора 2Т982А-2 в режиме малых токов. Выбор такого подхода диктуется тем, что в режиме больших токов импедансы транзистора имеют малые активные величины, равные  $1 \Omega$  по порядку величины, что при использовании активного элемента в указанном режиме определяет высокое значение добротности, близкое к 10, а значит, стандартную для больших токов полосу шумовой генерации, не превышающую, как правило, 15%. В режиме работы транзистора при слабых токах значения импедансов увеличиваются в 10 и более раз, добротность системы уменьшается до значений менее единицы, что позволяет получать суммарную эффективную полосу спектра генерируемого шумового сигнала, практически равную заявленной интегральной полосе усиления транзистора.

Исходя из описанных выше принципов построения СШП-источника шумовых колебаний в настоящей работе предложена схема генератора шума на базе транзистора 2Т982А-2, работающего в режиме малого сигнала.

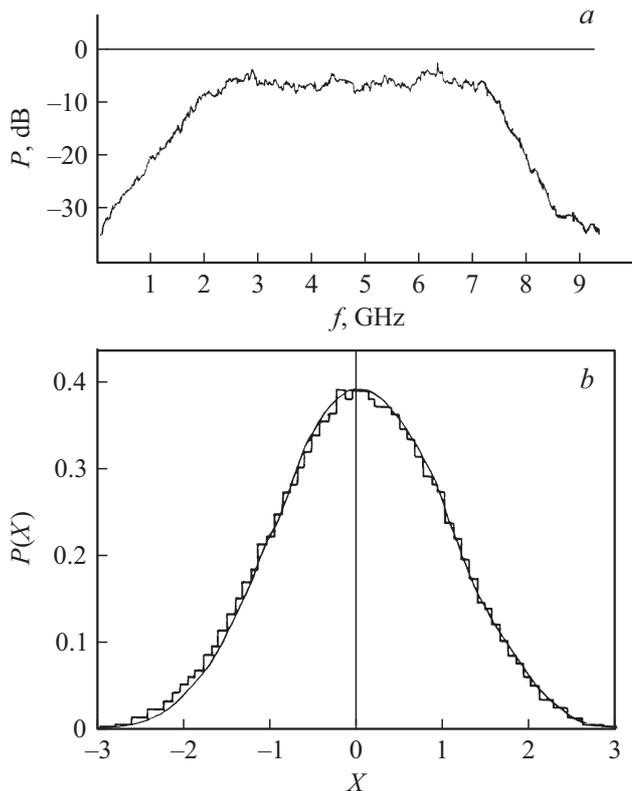
Схема СШП-генератора хаоса представлена на рис. 1. Генератор собран в соответствии со схемой генератора с выделенной инерционностью. Она была впервые введена в [9] и хорошо описывает динамику одностранзисторных генераторов на мощных биполярных транзисторах. Так, в исследованиях, представленных в [1,10], было установлено взаимно однозначное соответствие значений параметров модели генератора с выделенной инерционностью значениям параметров реальных устройств, численно и экспериментально исследована динамика модели в автоколебательном режиме с целью выявления закономерностей возникновения и развития регулярных и хаотических колебаний. Показано, что генератор с выделенной инерционностью переходит к генерации развитых хаотических колебаний с близким к нормальному

дифференциальным законом распределения плотности вероятностей при значениях параметра инерционности системы менее 0.06, т.е. для реализации хаотического режима автогенерации в системе необходимо ввести внешнюю цепь инерционного преобразования выходного сигнала активного элемента.

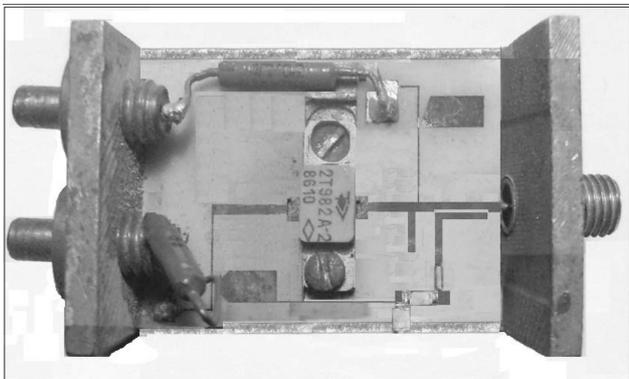
Макет генератора реализован в виде одностранзисторной системы, построенной на базе мощного транзистора 2Т982А-2, включенного по схеме с общей базой, и собранной по микрополосковой технологии на материале ФЛАН-10 толщиной 1 мм. Вход и выход транзистора подключены непосредственно к  $50 \Omega$ -микрополосковым линиям. Такое согласование транзистора обеспечивает режим его работы при малых токах. Рабочий ток транзистора находился в пределах 50 мА при номинальных напряжениях питания. Положительная обратная связь в системе организовывалась за счет внутренних емкостей транзистора. Генератор переходил в режим автогенерации при достижении напряжения на эмиттере  $-0.8 \text{ V}$ . В экспериментальном макете напряжения питания составляли  $-1.0 \text{ V}$  на эмиттере и  $+15 \text{ V}$  на коллекторе. Основная часть мощности хаотического сигнала с выхода генератора поступала в нагрузку. 20% мощности отводилось в цепь однополупериодного квадратичного детектора, включавшего в себя диод D типа Д403В, производивший однополупериодное преобразование сигнала, и RC-фильтр с параметрами, удовлетворяющими условию  $g = (fRC)^{-1} = 0.05$ , где  $f$  — центральная частота генератора. Значения элементов фильтра составляли  $R = 300 \Omega$ ,  $C = 250 \text{ pF}$ . Напряжение с выхода инерционного преобразователя модулировало напряжение питания эмиттера.

Механизм генерации хаотических колебаний в генераторе был следующим. При подаче напряжений питания происходило автовозбуждение колебаний в генераторе. При этом начинался рост положительного напряжения на выходе однополупериодного нелинейного преобразователя. Когда результирующее напряжение на эмиттере становилось более  $-0.8 \text{ V}$ , процесс генерации обрывался и повторялся заново. Таким образом, сигнал на выходе генератора представлял собой последовательность неповторяющихся цугов колебаний с произвольным числом единичных колебаний и случайной начальной фазой. В фазовом пространстве системы реализуется странный аттрактор типа аттрактора Шильникова. Наличие аттрактора Шильникова и перемежаемость указывают на развитую хаотическую динамику системы.

Спектр мощности выходного сигнала генератора хаоса представлен на рис. 2, а. Эффективная полоса частот генерируемых шумовых колебаний при неравномерности спектра мощности 5 дБ занимала диапазон частот от 2.3 до 7.4 GHz, интегральная мощность сигнала составляла 5 мВт, что давало значение  $10^{-6} \text{ W/MHz}$  для усредненной спектральной плотности генерируемых шумовых колебаний с нормальным дифференциальным законом распределения плотности вероятностей (рис. 2, б). КПД генератора при рабочем токе транзистора 50 мА составлял 1%.



**Рис. 2.** *a* — спектр мощности хаотических колебаний на выходе генератора; *b* — распределение плотности вероятности хаотических колебаний на выходе генератора.



**Рис. 3.** Экспериментальный макет СШП-генератора хаоса.

Таким образом, в работе предложен и реализован на практике сверхширокополосный однотранзисторный генератор хаотических колебаний с выделенной инерционностью в микроволновом диапазоне длин волн на базе отечественного транзистора 2Т982А-2 (рис. 3). Исследование влияния изменений значений напряжений питания на генерацию хаотических колебаний показало, что значительное (до 15%) уменьшение коллекторного напряжения питания не приводило к срыву хаотических колебаний, при этом уменьшалась (до 55%) интегральная мощность на выходе генератора. Режим генерации

хаоса устойчив к изменению температуры основания корпуса генератора, на котором крепится база транзистора, в диапазоне от  $-30$  до  $+60^\circ\text{C}$ . Устойчивость к внешним воздействиям в сочетании с параметрами выходного хаотического сигнала генератора позволяет рекомендовать его для использования в аппаратуре, работающей в соответствии со стандартами IEEE 802.15.4a для беспроводных персональных сетей сверхширокополосной связи и IEEE 802.15.6 для беспроводных персональных сетей медицинского и бытового назначения, а также в системах радиопротиводействия и активной шумовой радиолокации ближнего радиуса действия.

Следует отметить, что проведенные экспериментальные исследования транзисторного генератора с выделенной инерционностью микроволнового диапазона длин волн с целью создания СШП-сигналов позволяют предложить его реализацию на других типах активных элементов с зависимостью значения крутизны динамической характеристики от значений напряжений питания.

#### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] С.В. Савельев, Письма в ЖТФ, **38** (11), 20 (2012). [S.V. Savelyev, Tech. Phys. Lett., **38** (6), 506 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012060156].
- [2] С.В. Гришин, В.С. Гришин, Д.В. Романенко, Ю.П. Шараевский, Письма в ЖТФ, **40** (19), 51 (2014). [S.V. Grishin, V.S. Grishin, D.V. Romanenko, Yu.P. Sharaevskii, Tech. Phys. Lett., **40** (10), 853 (2014). DOI: 10.1134/S106378501410006X].
- [3] С.В. Савельев, Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал], № 6 (2017). <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/10/text.pdf>
- [4] С.В. Савельев, Л.А. Морозова, ЖТФ, **90** (12), 2148 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50135.418-19 [S.V. Savelyev, L.A. Morozova, Tech. Phys., **65** (12), 2056 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220120245].
- [5] IEEE 802.15.4a, standard for information technology; amendment 1: add alternate PHYs//2007.
- [6] IEEE P802.15.6/D01//2010.
- [7] V. Venkatasubramanian, H. Leung, X. Liu, IEEE Trans. Image Process., **18** (6), 1255 (2009). DOI: 10.1109/TIP.2009.2017340
- [8] Z. Liu, X. Zhu, W. Hu, F. Jiang, Int. J. Bifurc. Chaos, **17** (5), 1735 (2007). DOI: 10.1142/S0218127407018038
- [9] С.В. Савельев, Радиотехника и электроника, **37** (6), 1064 (1992).
- [10] С.В. Савельев, Радиотехника и электроника, **49** (7), 850 (2004). [S.V. Savelyev, J. Commun. Technol. Electron., **49**, 799 (2004).].