

09;13

Радиофотонный генератор хаотического и шумового сигналов

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

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“

E-mail: ustinov-rus@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 ноября 2015 г.

Впервые экспериментально исследован переход к хаосу и проведен анализ широкополосного хаотического сверхвысокочастотного сигнала, генерируемого радиофотонным генератором. Генератор представлял собой кольцевую схему, в СВЧ-тракте которой содержался фильтр нижних частот и СВЧ-усилитель. Оптический тракт содержал линию задержки из оптоволокна. Продемонстрирована возможность генерации хаотических колебаний с равномерной спектральной плотностью мощности в диапазоне 3–8 GHz.

В последние годы наблюдается устойчивый интерес к разработке и исследованию генераторов сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов, основанных на различных физических принципах. Так, в работах [1–4] описываются спин-волновые генераторы стационарных и хаотических сигналов на основе ферромагнитных пленок. Работы [5–7] посвящены спинтронным наноосцилляторам. В работе [8] сообщается о разработке генератора широкополосного хаоса в диапазоне 3–8 GHz, изготовленного на основе биполярного СВЧ-транзистора.

В настоящее время стали актуальными исследования в междисциплинарных направлениях, которые позволяют сочетать преимущества различных технологий. Одним из таких направлений является радиофотоника (сверхвысокочастотная оптоэлектроника), объединяющая в себе оптоэлектронные и СВЧ микроэлектронные технологии [9,10]. Например, оптоэлектронные генераторы монохроматического СВЧ-сигнала имеют сверхнизкий уровень фазового шума, не достижимый при использовании одних только микроэлектронных технологий [11–15].

Одним из преимуществ оптоэлектронных компонентов является их широкополосность. Мгновенная полоса частот у промышленно выпускаемых компонентов достигает 50 GHz и имеет потенциал для

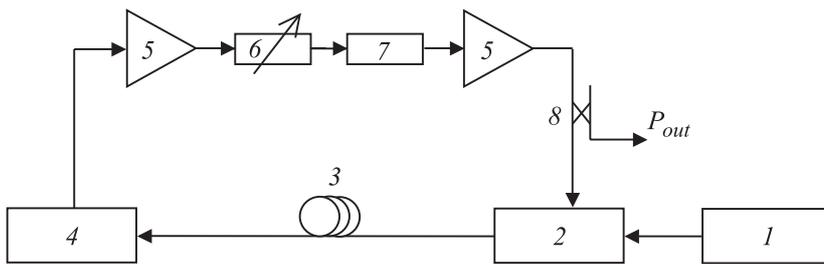


Рис. 1. Блок-схема радиофотонного генератора динамического хаоса.

дальнейшего расширения. Это делает сравнительно простой возможность создания широкополосных оптоэлектронных генераторов СВЧ динамического хаоса [16].

Целью представленной работы являлось исследование перехода к хаосу и изучение режимов стационарной и хаотической генерации СВЧ-сигналов в радиофотонном генераторе, а также рассмотрение возможностей получения хаотической генерации с равномерной спектральной плотностью мощности в широком диапазоне частот.

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 , СВЧ-усилители 5 с диапазоном частот $2\text{--}8 \text{ GHz}$, коэффициентом усиления 35 dB и выходной мощностью в линейном режиме до 1.5 W , переменный аттенюатор 6, СВЧ-фильтр нижних частот (ФНЧ) 7 и СВЧ направленный ответвитель 8. Компоненты СВЧ-тракта соединялись СВЧ-кабелями.

Рассмотрим принцип работы схемы. 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, задерживается в нем на время около 521 ns и детектируется фотодетектором 4. Сигнал на выходе фотодетектора

представляет собой сверхвысокочастотный сигнал. Этот сигнал усиливается с помощью СВЧ-усилителей 5 и подается на электрооптический модулятор 2, замыкая кольцевую схему. Пара СВЧ-усилителей 5 компенсирует суммарные потери на распространение СВЧ-сигнала в кольце. Переменный аттенуатор 6 служит для управления этими потерями. Небольшая часть СВЧ-сигнала выводится из кольца направленным ответвителем 8 с коэффициентом связи -10 dB.

Заметим, что в описанном генераторе частотная полоса хаотической генерации определяется полосой пропускания СВЧ-тракта. Поэтому этот тракт должен быть широкополосным. В этом состоит одно из отличий генератора хаоса от генераторов монохроматического СВЧ-сигнала, где в СВЧ-тракте используется узкополосный частотоподающий элемент [11–15]. В нашем случае нижнюю частоту хаотической генерации задавал ФНЧ 7. В экспериментах использовались разные модели фильтров с частотами отсечки 2.5, 3 и 3.5 GHz. 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. Это обеспечивало переход от стационарной генерации к хаотической при увеличении коэффициента усиления G в кольце. Измерения коэффициента передачи СВЧ-сигнала в оптическом тракте показали, что при низких уровнях СВЧ-мощности вносимые потери составляют -48 dB. При превышении СВЧ-мощности 10 mW вносимые потери начинали возрастать и становились значительными при приближении к мощности 55 mW, соответствующей половине полуволнового напряжения.

Для сравнения были также проведены измерения при отсутствии 100-метрового оптоволоконного кабеля, когда излучение с выхода модулятора сразу подавалось на фотодетектор. В этом случае потери СВЧ-сигнала в оптическом тракте с увеличением мощности возрастали по точно такому же закону. Этим подтверждалось отсутствие нелинейных эффектов в оптоволокне. При измерениях рабочая точка модулятора была смещена в квадратуру.

Анализ экспериментальных данных показал, что мощность на выходе СВЧ-тракта не превышала 910 mW, поэтому все его узлы работали в линейном режиме. Таким образом, нелинейность кольцевой системы заключалась в нелинейности модуляции СВЧ-мощности

интегрально-оптическим модулятором. Этот эффект ограничивал в целом СВЧ-мощность в режиме генерации. Как показали измерения, фаза сигнала от мощности не зависела.

Рассмотрим типичные результаты исследования перехода к хаосу, полученные в случае использования в схеме ФНЧ с частотой отсечки 3.5 GHz. Эксперименты проводились по мере плавного уменьшения ослабления СВЧ-сигнала в переменном аттенюаторе 6. При некотором значении ослабления в исследуемой кольцевой схеме возникала монохроматическая генерация СВЧ-сигнала. Коэффициент усиления G кольца на пороге генерации был принят равным нулю. Частота генерируемой гармоники составляла 3.676 GHz, а мощность 0.3 mW. Вокруг нее наблюдались другие гармоники, являющиеся результатом усиления шума на частотах, соответствующих гармоникам кольца. Они были ослаблены по мощности примерно на 40–50 dB. Поскольку эти гармоники не связаны по фазе, то на выходе генератора наблюдался постоянный уровень СВЧ-мощности. Разница частот между гармониками составляла 1.916 MHz, что хорошо соответствовало времени задержки сигнала в кольце, равному 521 ns. Необходимо отметить, что всегда наблюдалась гармоника удвоенной частоты 7.352 GHz. Ее мощность на пороге генерации была на 40 dB ниже мощности основной гармоники.

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 колебания становились нестабильными. Одночастотная генерация сменялась многочастотной, причем центральная частота генерации перескакивала на гармонику с частотой 3.652 GHz. В таком режиме наблюдались либо одновременно, либо по отдельности (в зависимости от коэффициента усиления G) быстрые и медленные осцилляции амплитуды СВЧ-сигнала, имевшие два характерных периода 5.49 и 520.7 ns. В спектре СВЧ-сигнала при этом наблюдались гармоники с двумя соответствующими частотами отстройки 180.75 и 1.916 MHz. Типичные результаты, измеренные для $G = 9.4$ dB, приведены на рис. 2.

Обращает на себя внимание тот факт, что при $G = 9.4$ dB наблюдалась генерация периодической последовательности темных нелинейных импульсов (рис. 2, *b*). Ее период составлял 5.49 ns, а длительность одного импульса была около 1.90 ns. Наблюдаемое при постепенном увеличении G развитие этой последовательности и особенно ее частотного спектра наводит на мысль о ее диссипативной солитонной природе,

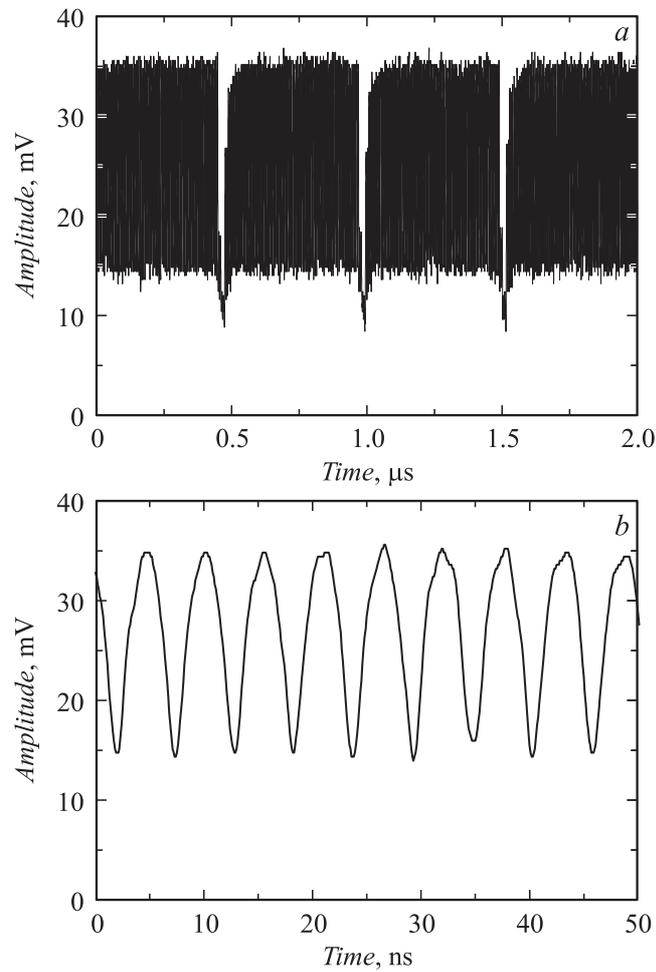


Рис. 2. Осциллограмма СВЧ-сигнала (*a*), показывающая медленные осцилляции амплитуды, и та же осциллограмма в расширенном масштабе (*b*), показывающая быстрые осцилляции амплитуды.

когда процесс нелинейной диссипации обусловлен электрооптическим модулятором. Но для подтверждения такого предположения требуются дополнительные эксперименты.

Начиная со значения $G = 11.7$ dB колебания в кольце стохастизировались. Спектр выходного СВЧ-сигнала представлял собой сплошной шумовой пьедестал с отдельными ярко выраженными гармониками. Эти гармоники соответствовали гармоникам кольца. Огибающая генерируемого СВЧ-сигнала представляла собой последовательность хорошо различимых хаотических импульсов. Типичный фрагмент осциллограммы генерируемого сигнала, измеренный при $G = 15.1$ dB, показан на рис. 3, а.

Анализируя временные реализации, можно определить, является ли наблюдавшийся непериодический сигнал хаосом или случайным шумом [17]. Основным отличием динамического хаоса является строгая детерминированность протекающих в исследуемой системе динамических процессов, в то время как стохастический шум имеет случайный характер. Определение таких параметров автогенерируемых сигналов, как фрактальная размерность и старший показатель Ляпунова, позволяет определить, является ли наблюдаемый непериодический сигнал хаотическим или шумовым. Так, например, динамический хаос характеризуется конечной величиной фрактальной размерности. Фрактальная размерность шума стремится к бесконечности.

Анализ динамики системы, а также определение параметров автогенерируемого сигнала проводились на основе фазовых портретов, построенных на основе измеренных временных реализаций методом задержки [18]. Длительность выборок составляла $10 \mu s$, а шаг составлял 100 ps. По восстановленным странным аттракторам была проведена оценка параметров хаотического сигнала. Так, для $G = 15.1$ dB оказалось, что минимальная размерность вложения аттрактора равна 28, а соответствующая ей истинная фрактальная размерность равна 11.5. Старший Ляпуновский показатель имел значение $2.8 \mu s^{-1}$. Такие значения свидетельствуют о существовании в кольце динамического хаоса.

При достижении $G = 18.7$ dB происходила смена режима генерации, при которой отдельные гармоники пропадали. Спектр выходного СВЧ-сигнала становился сплошным, а сигнал во времени приобретал сложную аперидическую форму. Анализ фазовых портретов показал, что при увеличении размерности фазового пространства до 55 корреляционная размерность в насыщение не выходит. Такое поведение генерируемого сигнала свидетельствовало о шумовом характере колебаний.

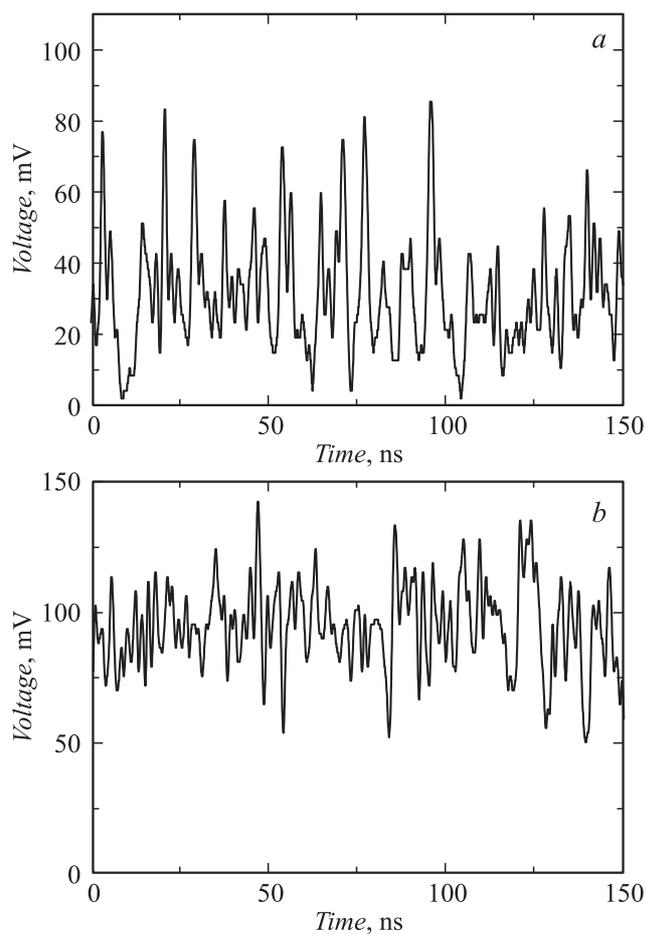


Рис. 3. Фрагменты осциллограмм, измеренные при хаотической генерации (*a*) и при шумовой генерации (*b*), а также спектр шумовой генерации (*c*).

Шумовая автогенерация при $G = 22.9$ dB характеризовалась для размерности вложения странного аттрактора, равной 28 (т.е. для того же значения, что и в случае хаотической генерации). В этом случае корреляционная размерность равнялась 15.5, а старший Ляпуновский

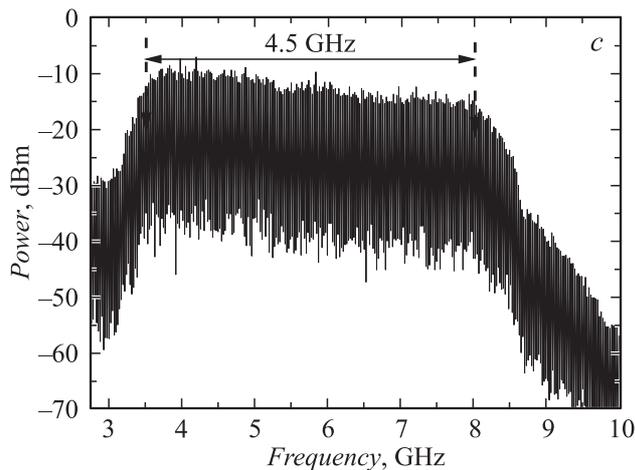


Рис. 3 (продолжение).

показатель имел значение $14.8 \mu\text{s}^{-1}$. Дальнейшее увеличение G вело к выравниванию спектра по мощности. Однако значение корреляционной размерности не изменялось и оставалось равным 15.5. На рис. 3, *b* и *c* приведены результаты, полученные при $G = 22.9$ dB. Таким образом, можно сделать заключение, что при $G = 18.7$ dB автогенерация хаоса сменялась автогенерацией шума.

Из проведенного исследования следует, что изученный радиофотонный генератор СВЧ динамического хаоса обладает конкурентоспособными характеристиками по сравнению с существующими аналогами. Выбирая ширину полосы пропускания СВЧ-тракта, легко контролировать частотный диапазон как хаотической, так и шумовой генерации. Кроме того, управляя коэффициентом усиления кольца, можно изменять характеристики генерации.

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 № 14-12-01296).

Список литературы

- [1] Гришин С.В., Гришин В.С., Романенко Д.В., Шараевский Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 19. С. 51–59.
- [2] Ustinov A.B., Kondrashov A.V., Nikitin A.A., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 234 101.
- [3] Hagerstrom A., Wu M., Eykholt R., Kalinikos B.A. // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. P. 104 402.
- [4] Мезин Н.И., Глуценко А.А., Кузовлев Ю.Е. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 19. С. 14–22.
- [5] Slavin A., Tiberkevich V. // IEEE Trans. Mag. 2009. V. 45. N 4. P. 1875–1918.
- [6] Urazhdin S., Demidov V.E., Ulrich H., Kendziorczyk T., Kuhn T., Leuthold J., Wilde G., Demokritov S.O. // Nat. Nanotechnol. 2014. V. 9. P. 509–513.
- [7] Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 13. С. 66–72.
- [8] Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Румянцев Н.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 2. С. 1–9.
- [9] Белкин М.Е., Сигов А.С. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. В. 8. С. 901–914.
- [10] Белкин М., Лопарев А. // Электроника НТБ. 2010. В. 6. С. 62–70.
- [11] Liang W., Eliyahu D., Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Seidel D., Maleki L. // Nat. Communications. 2015. V. 6. P. 7957.
- [12] Eliyahu D., Maleki L. // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2003. V. 3. P. 2185–2187.
- [13] Fortier T.M., Kirchner M.S., Quinlan F., Taylor J., Bergquist J.C., Rosenband T., Lemke N., Ludlow A., Jiang Y., Oates C.W., Diddams S.A. // Nat. Photonics. 2011. V. 5. P. 425–429.
- [14] Ustinov A.B., Nikitin A.A., Kalinikos B.A. // IEEE Magn. Lett. 2015. V. 6. P. 123 544.
- [15] Belkin M.E., Loparev A.V., Semenova Y., Farrel G., Sigov A.S. // Microw. Opt. Technol. Lett. 2011. V. 53. P. 2474–2477.
- [16] Callan K.E., Illing L., Gao Z., Gauthier D.J., Schöll E. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 113 901.
- [17] Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001. 528 с.
- [18] Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2006. 356 с.