

09; 10

О статистических свойствах сигналов микроволновых генераторов хаоса на основе виртуального катода

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов

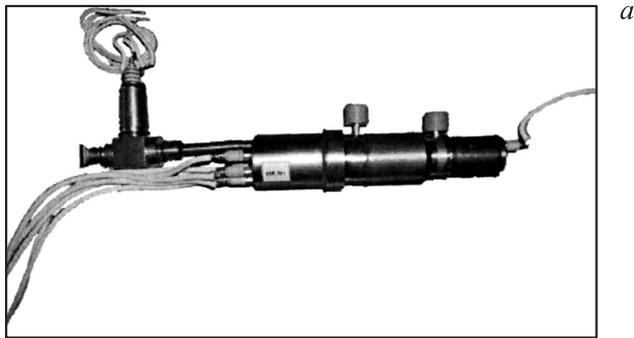
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: StarodubovAV@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 21 мая 2009 г.

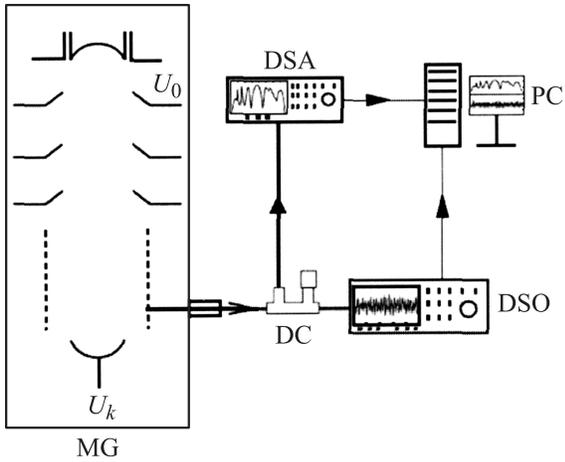
Проведено экспериментальное исследование сигналов микроволнового генератора хаотических колебаний на основе виртуального катода. Проиллюстрированы статистические свойства генерируемых сигналов. Показано, что изменение коэффициента торможения электронного пучка приводит к изменению не только спектральных характеристик, но и статистических свойств генерируемых сигналов.

PACS: 05.45.-a, 07.05.Kf, 41.75.Fr, 52.35.-g

В настоящее время одним из инновационных направлений развития информационно-телекоммуникационных систем является использование хаотических сигналов в качестве новых носителей информации [1,2] в системах связи, радиолокации, а также при решении задач радиопротиводействия [2]. Целый ряд технологических процессов [3] (например, обезвоживание, очистка и повышение качества нефти и нефтепродуктов, органический синтез с использованием поглощения СВЧ-энергии, медицинские задачи и т.п.) также представляется перспективной областью применения подобных сигналов. Для генерации таких сигналов необходимы разработка и создание широкополосных источников хаоса, работающих в диапазоне сверхвысоких частот. В настоящее время наиболее перспективным представляется использование источников широкополосных и сверхширокополосных хаотических сигналов малого и среднего радиуса мощности, основанных на новых способах генерации хаотических сигналов: использование электронных пучков с виртуальным катодом [4] в различных генераторных схемах низковольтных виркаторов, обладающих сверхширокой полосой частот (до двух октав) и слабой изрезанностью спектра мощности.



a



b

Рис. 1. *a* — фотография разработанного экспериментального образца микроволнового генератора сверхширокополосных хаотических колебаний, *b* — принципиальная схема экспериментальной установки по исследованию генерируемых экспериментальным образцом сигналов. На схеме: MG (microwave generator) — экспериментальный образец сверхвысокочастотного сверхширокополосного генератора хаоса на виртуальном катоде, DC (directional coupler) — направленный ответвитель, DSA (digital spectrum analyzer) — цифровой анализатор спектра, DSO (digital storage oscilloscope) — цифровой запоминающий осциллограф, PC — вычислительная станция.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования колебаний широкополосного генератора хаоса, принцип действия которого основан на использовании интенсивного электронного пучка с электронной обратной связью. Для формирования виртуального катода в подобных приборах используется дополнительное торможение электронного потока за счет подачи отрицательного потенциала на коллектор. Разработанный и экспериментально исследованный макет подобного устройства приведен на рис. 1, *a*. Он представляет собой электровакуумный прибор с выходной мощностью до 1 W в диапазоне генерируемых частот до 3 GHz. Для регистрации спектров мощности сигнала использовался цифровой анализатор спектра Agilent Technologies ESA-E Series Spectrum Analyzer E4402B (9.1 kHz–3.0 GHz). Регистрация временных реализаций осуществлялась с использованием цифрового запоминающего осциллографа реального времени Agilent Technologies Infiniium DSO 81004B Series oscilloscopes, а также Tektronix DPO 72004 Digital Phosphor Oscilloscope Series. Питание экспериментального образца генератора хаоса на виртуальном катоде с электронной обратной связью осуществлялось в импульсном режиме. Длительность импульса составила $\tau = 10 \mu\text{s}$, скважность $Q = 500$. Основные управляющие параметры задавались следующими: величина ускоряющего напряжения $U_0 = 2450 \text{ V}$, напряжение на коллекторе U_k изменялось в диапазоне от -250 до 2300 V , ток пучка $I = 190 \text{ mA}$. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, *b*.

Рассмотрим результаты экспериментального исследования сигналов, генерируемых экспериментальным образцом. Будем исследовать статистические свойства генерируемых сигналов в зависимости от коэффициента торможения электронного пучка K , который определяется отношением величины напряжения на коллекторе U_k к величине ускоряющего напряжения U_0 : $K = 1 - (U_k/U_0)$. Отметим, что проведенные ранее экспериментальные исследования, которые были подтверждены численными расчетами, позволили установить, что с изменением коэффициента торможения электронного пучка спектральный состав генерируемых разработанным экспериментальным образцом сигналов значительно изменяется: с ростом торможения электронного пучка происходит расширение спектра генерируемых колебаний от узкополосных (почти одночастотных) до сверхширокополосных [5–7]. Однако не было рассмотрено, как изменяются при этом не только спект-

ральные, но и статистические характеристики генерируемых сигналов. Это обусловлено тем, что проведение подобных исследований требует наличия достаточно редкой высокоточной контрольно-измерительной аппаратуры, относящейся к классу сверхширокополосных цифровых запоминающих осциллографов реального времени, которая несколько лет назад была практически недоступна.

Итак, методика проведения экспериментальных исследований была следующей. Производилось изменение величины коэффициента торможения электронного пучка. При каждом значении величины K регистрировался спектральный состав генерируемого сигнала, а также проводилось аналого-цифровое преобразование с записью временной реализации захваченного выходного сигнала. Далее на компьютере проводилась обработка временной реализации оцифрованного сигнала, которая заключается в следующем. По захваченным временным реализациям были построены распределения плотности вероятности попаданий мгновенных значений амплитуд выходного сигнала в заданный диапазон значений. Построение распределения производилось следующим образом: в захваченной временной реализации определялся максимально возможный размах амплитуды захваченного сигнала L . По результатам проведенных экспериментов было выбрано значение $L = 0.04$ V. Далее величина L разбивалась на 200 одинаковых интервалов $\Delta L = 0.0002$ V. Для каждого интервала ΔL вычислялось количество попаданий в этот интервал мгновенного значения амплитуды сигнала, и полученное значение нормировалось на общее количество точек во временной реализации захваченного сигнала. Было установлено, что изменение распределения плотности вероятности мгновенных значений амплитуд выходного сигнала экспериментального образца при увеличении торможения электронного пучка происходит следующим определенным образом. Сначала распределение плотности вероятности мгновенных значений амплитуд сигнала имеет вид, близкий к гауссовому или нормальному распределению [8]. Этот результат представлен на рис. 2, *a*. С увеличением торможения, как показано на рис. 2, *b*, на распределении вероятности появляются два четких пика. С дальнейшим увеличением коэффициента торможения расстояние между пиками на распределении увеличивается (рис. 2, *c*). Больше увеличение торможения электронного пучка приводит к появлению третьего пика, как показано на рис. 2, *d*.

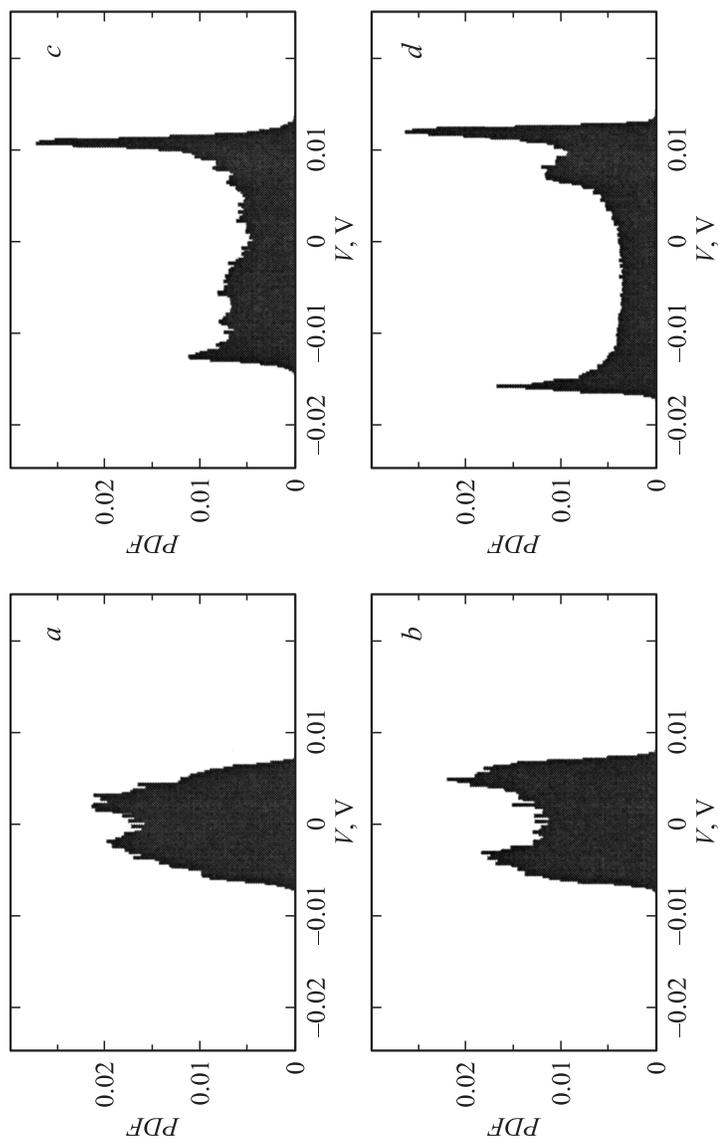


Рис. 2. Распределение плотности вероятности PDF попадания мгновенного значения амплитуды сигнала исследуемого экспериментального образца в заданный интервал значений при различных величинах коэффициента торможения электронного пучка: a — $K = 0.49$, b — $K = 0.63$, c — $K = 0.94$, d — $K = 1.1$.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов было показано, что с увеличением торможения электронного пучка происходит не только изменение спектрального состава генерируемых сигналов, как показано в [5–7], но и качественно меняются их статистические свойства. Вид полученных распределений плотности вероятности определяется видом генерируемых сигналов, который представлен на рис. 3. Как показано на рис. 3, генерируемые сигналы представляют собой сумму „медленных“ колебаний, которые имеют вид, близкий к синусоидальным, и „быстрых“. При малом коэффициенте торможения соотношение амплитуды „медленных“ колебаний и амплитуды „быстрых“ колебаний такое, что распределение плотности вероятности имеет вид, близкий к гауссовому распределению. Однако наличие „медленных“ колебаний все же отражается на виде распределения плотности вероятности присутствием двух близко расположенных горбов (рис. 3, *a*). При увеличении коэффициента торможения, как показано на рис. 3, *b*, „медленные“ колебания становятся более выраженными, их амплитуда растет. Это в свою очередь отражается и на распределении плотности вероятности амплитуд сигнала. „Медленные“ колебания внешне близки к синусоидальным колебаниям. Плотность вероятности амплитуд синусоидальных колебаний имеет двугорбое распределение [8]. Таким образом, и в нашем случае вследствие наличия выраженной синусоидальной составляющей в исследуемом сигнале на распределении плотности вероятности имеется два выраженных пика. При дальнейшем увеличении коэффициента торможения (рис. 3, *c* и *d*) амплитуда „медленных“ колебаний увеличивается, они становятся все более выраженными, что четко отражается на виде распределения плотности вероятности. Полученные результаты хорошо согласуются с [8], где было показано, что переход от почти гауссова распределения плотности вероятности к двугорбому распределению может быть обусловлен тем, что исследуемый сигнал представляет собой сумму гармонического сигнала („медленные“ колебания в нашем случае) и нормального шума („быстрые“ колебания). Наличие в исследуемом сигнале „медленных“ и „быстрых“ колебаний можно объяснить наличием в пространстве дрейфа сложного конгломерата частиц, которые грубо могут быть разделены на два типа по принципу присущей им скорости движения: быстрые и медленные частицы. К быстрым частицам относятся первичные электроны, вылетевшие с катода. К медленным частицам можно отнести, прежде всего, ионы, присутствующие в пространстве

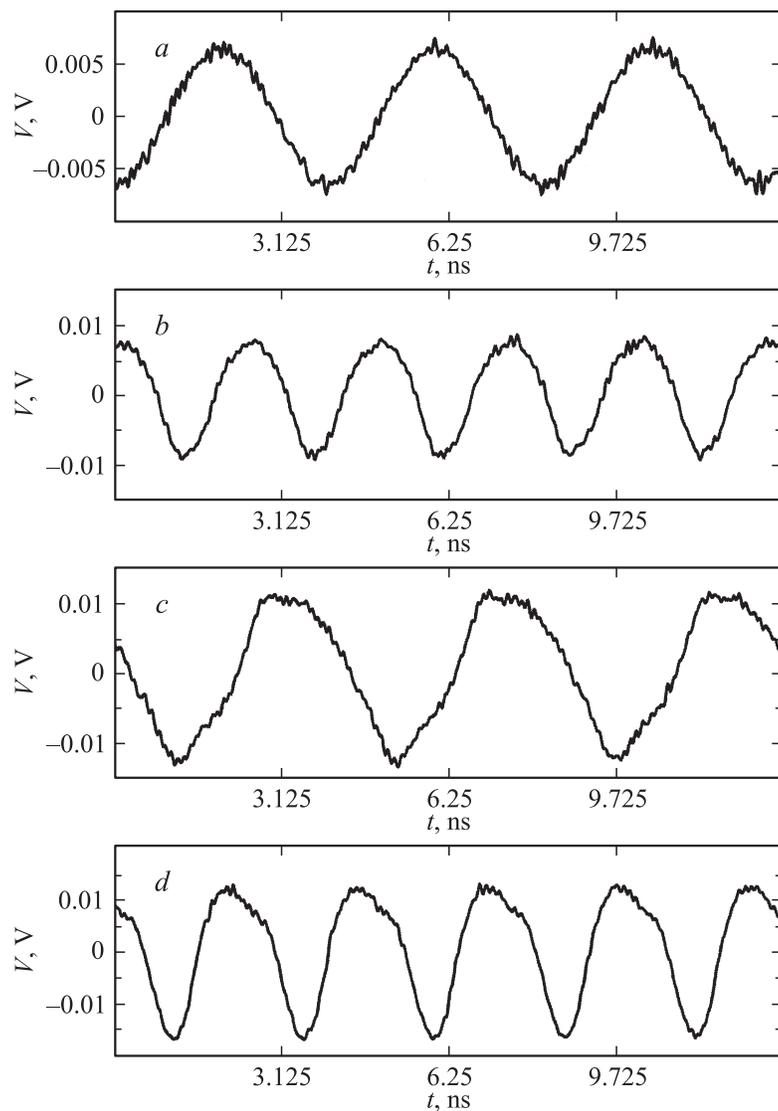


Рис. 3. Вид оцифрованных временных реализаций генерируемых сигналов при различных величинах коэффициента торможения электронного пучка: *a* — $K = 0.49$, *b* — $K = 0.63$, *c* — $K = 0.94$, *d* — $K = 1.1$.

дрейфа, и вторичные электроны, которые образуются при попадании первичных электронов на коллектор и на стенки камеры дрейфа.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что возможно создание микроволновых широкополосных (1–2 октавы) генераторов хаоса не только с перестраиваемой полосой частот генерации, но и с перестраиваемыми статистическими характеристиками генерируемых сигналов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 08-02-00102, № 09-02-00255, Президентской программы поддержки научных школ Российской Федерации (проект НШ-355.2008.2) и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“ (код проекта 235), а также CRDF (REC-006).

Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [2] *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
- [3] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003–2004, Т. 1–2.
- [4] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [5] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009–1025.
- [6] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Лёвин Ю.Н., Храмов А.Е.* // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51–64.
- [7] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. XLIX. № 10. С. 843–852.
- [8] *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982.