

ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ЛБВ АВТОГЕНЕРАТОРА*

Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков, С. А. Садовников, В. Н. Скороходов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Приводятся результаты экспериментального исследования сверхширокополосного генератора хаоса микроволнового диапазона на основе ЛБВ усилителя. Рассмотрены два метода получения последовательности хаотических радиоимпульсов.

Ключевые слова: ЛБВ автогенератор с запаздывающей обратной связью, широкополосный хаотический сигнал, подавление широкополосного хаоса в ЛБВ автогенераторе, хаотические радиоимпульсы.

Введение

В настоящее время существенное количество исследовательских работ в разных областях знаний посвящено изучению динамического хаоса, открытие которого в конце XX века породило многочисленные мировоззренческие концепции в построении научной картины мира. В прикладных науках весьма активно развиваются направления использования информационных технологий на основе динамического хаоса для передачи, обработки и защиты информации [1]. Сверхширокополосные средства связи в микроволновом диапазоне перспективны для целей радиолокации и радиоэлектронного противодействия, а также для передачи информации с помощью прямохаотических систем связи [2,3].

Среди известных в настоящее время генераторов хаоса микроволнового диапазона наибольшее распространение получили твердотельные генераторы, использующие в качестве активных элементов диоды и полевые транзисторы с применением микроволновой техники, а также нелинейные линии задержки на поверхностной магнитостатической волне [4–6].

Наряду с этими направлениями представляют практический интерес генераторы хаотических колебаний на основе классических электровакуумных приборов СВЧ – многорезонаторных клистронов и ламп с бегущей волной, включенных как

*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015.

активные элементы в кольцевые радиофизические системы с собственной сложной динамикой с запаздывающей обратной связью (ЗОС) [7–11]. Важным аспектом подобных устройств на основе электровакуумных приборов является высокий уровень выходной высокочастотной мощности и возможность работы в условиях электромагнитного и радиационного излучений.

В настоящее время особый интерес представляют сверхширокополосные генераторы хаотических колебаний [12], где перспективным представляется применение ЛБВ автогенераторов. Возможность генерации потока хаотических радиоимпульсов, являющихся носителями информации в системах связи, обеспечивается путем воздействия на динамическую систему выбранных внешних управляющих сигналов, которая в автономном режиме ЛБВ автогенератора генерирует широкополосные хаотические колебания.

1. Хаотическая динамика кольцевого ЛБВ автогенератора

Исследуемый автогенератор широкополосных хаотических колебаний был создан на основе промышленной ЛБВ среднего уровня мощности десятисантиметрового диапазона длин волн. Основные характеристики ЛБВ усилителя следующие: ток электронного пучка до 80 мА, ускоряющее напряжение 2500 В, коэффициент усиления до 30 дБ на частоте 3 ГГц, полоса частот – октава и более. Фокусировка пучка осуществляется периодическим магнитным полем.

В отличие от классического шумотрона, состоящего из двух соединенных в кольцо ЛБВ с регулируемым аттенуатором [7], в исследуемом генераторе использовалась одна ЛБВ, в которой возбуждение хаотических колебаний связано с наличием падающего участка на амплитудной характеристике. Принципиальная схема для исследования различных автономных режимов работы автогенератора, включая и хаотические колебания, показана на рис. 1.

В кольце обратной связи расположены нелинейный ЛБВ усилитель, переменный поляризационный аттенуатор ДЗ-30 для изменения глубины обратной связи в кольце, анализатор спектра Agilent E4408B и осциллограф реального времени DSO81000A для наблюдения временной реализации и гистограмм распределения вероятностей хаотического сигнала. Управляющими параметрами в таком автогенераторе являются ток I электронного пучка, ускоряющее напряжение U , затухание L в цепи обратной связи.

Для кольцевых автогенераторов хаоса одним из характерных параметров динамической системы является время запаздывания сигнала в кольце обратной связи. Что касается ЛБВ автогенератора, это время определяется временем задержки сигнала в замедляющей системе ЛБВ и во внешнем кольце обратной связи. Для выбранных параметров ЛБВ и длины кольца обратной связи (кабель с внутренним заполнением с известной диэлектрической проницаемостью и поляризационный аттенуатор) на частоте 3 ГГц простой расчет дает величину 55 нс. Это время можно также опреде-

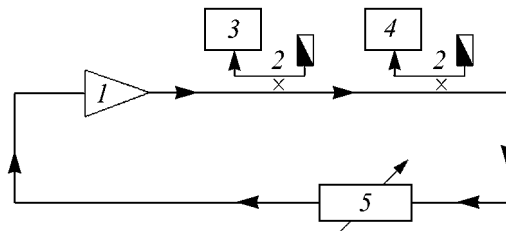


Рис. 1. Схема для исследования основных характеристик кольцевого ЛБВ автогенератора: 1 – ЛБВ, 2 – направленные ответвители, 3 – осциллограф реального времени, 4 – анализатор спектра, 5 – поляризационный аттенуатор

лить и экспериментально с помощью анализатора СВЧ цепей Agilent E5062T. На указанной частоте оно составило 60 нс, что свидетельствует о достоверности расчетных параметров применяемой ЛБВ.

Как известно, кольцевая система с запаздыванием обладает набором собственных мод – резонансов ω_n , на которых полный набег фазы гармонического сигнала по замкнутому кольцу обратной связи равен $2\pi n$ ($n = 1, 2, \dots$). Частотный интервал между соседними модами ω_n и ω_{n+1} равен $\Delta\omega = 2\pi/t$, где t – полное групповое время запаздывания сигнала вдоль замкнутого кольца обратной связи. Используя найденное время задержки сигнала, можно вычислить частотный интервал между двумя соседними модами, он составляет 17.2 МГц. Наблюдения кольцевых резонансных мод по анализатору спектра дали значение 17.4 МГц для заданного режима, что также свидетельствует о хорошем соответствии экспериментальных и расчетных значений этого параметра ЛБВ автогенератора.

Известно, что в ЛБВ, благодаря нелинейным процессам группировки электронов, возникают высшие гармоники сигнала. Такие гармоники можно наблюдать в кольцевом ЛБВ автогенераторе, применяя анализатор спектра с широким диапазоном частот (вплоть до 10 ГГц). На рис. 2. показаны спектральные амплитуды трех гармоник на частотах 3 ГГц, 6 ГГц и 9 ГГц, наблюдаемые в кольцевом автогенераторе для режима сравнительно малого тока $I = 12$ мА, $U = 2530$ В, $L = 1.5$ дБ. Следует отметить, что соотношение между уровнями гармоник довольно хорошо соответствуют результатам при непосредственном измерении гармоник в нелинейном ЛБВ усилителе [13].

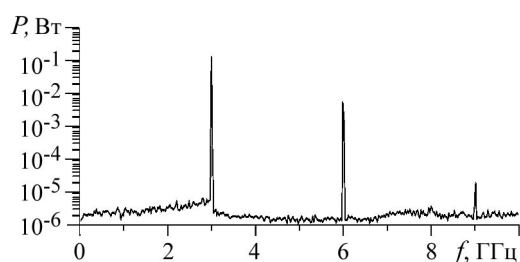


Рис. 2. Спектр трех гармоник ЛБВ автогенератора

Устойчивый широкополосный хаотический режим колебаний имел место при увеличении тока пучка ЛБВ. На рис. 3 представлен спектр мощности хаотического сигнала для одного из режимов: $I = 80$ мА, $U = 2740$ В, $L = 2.5$ дБ. Хаотический сигнал наблюдается в широком диапазоне частот 0.5–8.0 ГГц, интегральная мощность сигнала 3 Вт, спектральная плотность сигнала 0.6 мВт/МГц.

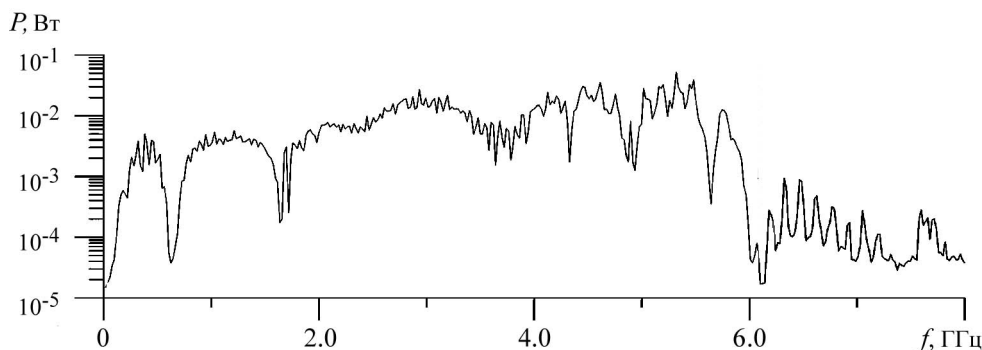


Рис. 3. Спектр мощности широкополосного хаотического сигнала ЛБВ автогенератора

2. Генерация широкополосных хаотических импульсов

В предыдущем разделе рассмотрено получение непрерывной генерации хаотического сигнала микроволнового диапазона с помощью кольцевой автоколебательной системы, содержащей активный элемент в виде нелинейного ЛБВ усилителя. Однако для целей практического применения широкополосных хаотических сигналов в информационных системах необходимо получить поток хаотических радиоимпульсов с управляемыми параметрами длительности импульсов и скважности [4].

В данном разделе рассматривается возможность генерации потока хаотических радиоимпульсов двумя способами, основанными на режиме внутренней модуляции параметров ЛБВ усилителя и внешней синхронизации, известной в литературе как *эффект полного подавления хаоса* [14].

В режиме внутренней модуляции последовательность хаотических радиоимпульсов в автогенераторе создавалась за счет подачи вместо постоянного напряжения импульсного напряжения на замедляющую систему и коллектор ЛБВ от высоковольтного импульсного модулятора. Подобная методика моделирования генерации хаотических импульсов применяется в автоколебательных системах с биполярными транзисторами при воздействии на систему последовательностью прямоугольных видеоимпульсов. В случае воздействия прямоугольными видеоимпульсами автоколебательная система скачкообразно переводится из режима отсутствия колебаний в режим хаотической генерации и обратно. Характерно, что амплитуда импульса в таких системах составляет всего несколько вольт. В отличие от полупроводниковых устройств в вакуумном ЛБВ автогенераторе необходимо применять, как уже отмечалось, высоковольтные импульсы от специальных модуляторов.

На рис. 4 приведены осциллограмма (а) СВЧ хаотического радиоимпульса длительностью 27 мкс и рассчитанная гистограмма (б) распределения вероятностей наблюдаемого хаотического сигнала. Здесь же показан нормальный (гауссов) закон распределения. Можно отметить, что отличие характера распределения вероятностей импульсного хаотического сигнала от гауссова распределения незначительно. Импульсный модулятор обеспечивал получение СВЧ хаотических радиоимпульсов с длительностью от 20 до 300 мкс со скважностью от 10 до 200. Примененные импульсного режима позволило увеличивать рабочие токи электронного пучка

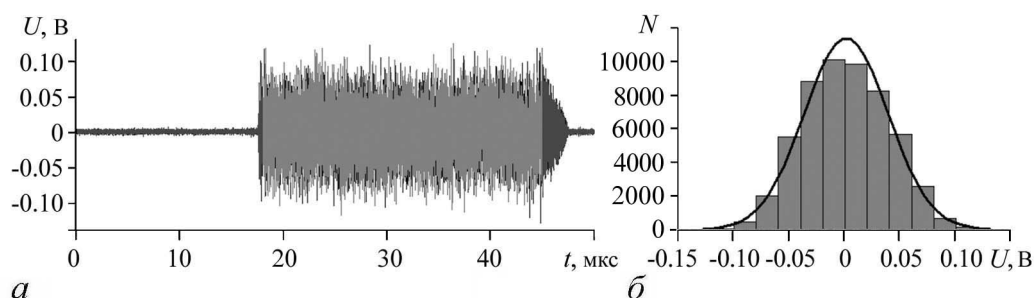


Рис. 4. Осциллограмма (а) и гистограмма (б) хаотического радиоимпульса для режима внутренней модуляции

до 120 мА, что обеспечивало величину выходной высокочастотной пиковой мощности в импульсе 15 Вт.

Как известно, одной из важных особенностей для применения хаотических радиоимпульсов в сверхширокополосных линиях связи является малая длительность импульсов [4]. Для реализации этого требования был предложен метод внешнего управления широкополосным хаотическим сигналом ЛБВ автогенератора, известный в литературе как синхронизация через полное подавление хаоса внешним гармоническим сигналом с определенными параметрами. Этот прием хорошо изучен экспериментально для клистронных автогенераторов с ЗОС, характеризующихся узкой полосой хаотического сигнала [15]. Отметим, что для подавления сверхширокополосных хаотических сигналов этот прием не применялся.

Схема предлагаемого автогенератора на ЛБВ с внешней модуляцией показана на рис. 5. В отличие от схемы на рис. 1 питание ЛБВ осуществляется от источников питания постоянного напряжения, а для управления хаотическим сигналом через направленный ответвитель и ферритовый вентиль в кольцо обратной связи подается внешний сигнал от генератора стандартных сигналов Agilent 5181А, который усиливается транзисторным усилителем. Применяемый генератор стандартных сигналов имеет внутреннюю модуляцию высокочастотного сигнала прямоугольными импульсами практически идеальной формы с изменением длительности импульса в широких пределах, начиная со значения в десятки наносекунд.

Выше отмечалось, что исследуемый нелинейный усилитель характеризуется тремя гармониками сигнала (см. рис. 2). Наиболее высокий уровень сигнала характерен для первой гармоники. Как показали проведенные экспериментальные исследования, для полного подавления широкополосного хаотического сигнала необходимо от генератора стандартных сигналов подать в цепь обратной связи гармонический сигнал именно на частоте первой гармоники с подобранной мощностью. Для подавления хаотического сигнала (см. рис. 3) необходима мощность первой гармоники порядка 100 мВт. В режиме подавления непрерывным гармоническим

сигналом наблюдается картина спектра, подобная приведенному на рис. 2. Если гармонический сигнал подобранной мощности промодулирован серией прямоугольных импульсов, то генерируется последовательность хаотических сверхширокополосных импульсов.

На рис. 6, а показана такая последовательность импульсов, наблюдаемая на высокочастотном осциллографе реального времени для коротких импульсов длительностью 1 мкс. Изучение параметров сигнала внутри такого короткого импульса подтвердило

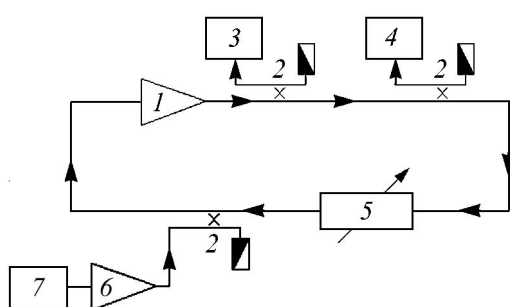


Рис. 5. Схема ЛБВ автогенератора широкополосных хаотических радиоимпульсов с внешним управлением: 1 – ЛБВ, 2 – направленные ответвители, 3 – осциллограф реального времени, 4 – анализатор спектра, 5 – поляризационный аттенюатор, 6 – транзисторный усилитель, 7 – генератор стандартных сигналов

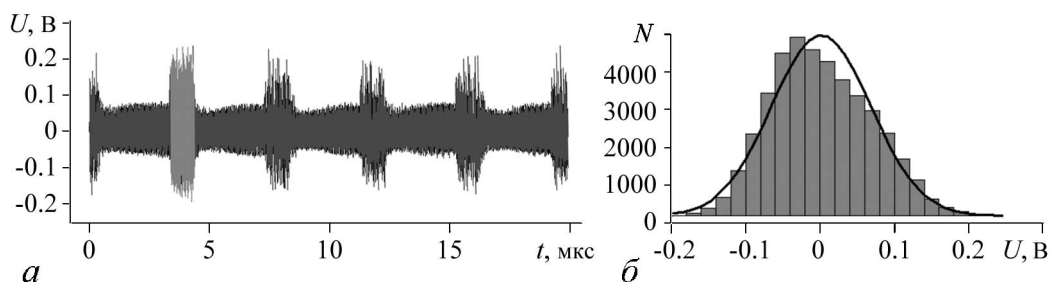


Рис. 6. Осциллограмма (а) и гистограмма (б) хаотического радиоимпульса для режима внешней модуляции

его хаотических характер. Гистограмма распределения приведена на рис. 6, б и свидетельствует о возможности применения исследуемого генератора в информационных технологиях.

Заключение

Проведено детальное экспериментальное исследование сверхширокополосного автогенератора хаоса с запаздывающей обратной связью, реализованного на промышленной ЛБВ микроволнового диапазона. Для генерации потока хаотических радиоимпульсов предложены методы внутренней модуляции ЛБВ усилителя и внешней синхронизации за счет эффекта полного подавления хаоса, который не был изучен для широкополосного хаоса. Получены хаотические радиоимпульсы длительностью 1 мксек с регулируемой скважностью и пиковой мощностью в импульсе 3 Вт, что перспективно для применения в информационных технологиях.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 14-02-00329 и 14-02-00577) и программы по государственной поддержке ведущих научных школ (НСИ – 828,2012,2).

Библиографический список

1. Гуляев Ю.В., Беляев Р.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н., Калинин В.И., Кальянов Э.В., Кислов В.В., Кислов В.Я., Колесов В.В., Мясин Е.А., Чигин Е.П. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 10. С. 1157.
2. Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах // Радиотехника. 2006. 208 с.
3. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Пузииков Д.Ю., Старков С.О. Сверхширокополосная прямохаотическая передача информации в СВЧ-диапазоне // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, Вып 2. С. 70.
4. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012. 424 с.

5. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Шараевский Ю.П. Генерация хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой системе на основе клистронного усилителя мощности и нелинейной линии задержки на магнитоэлектрических волнах // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, Вып 2. С. 62.
6. Гришин С.В., Гришин В.С., Романенко Д.В., Шараевский Ю.П. Сверхширокополосный спин-волновой генератор хаоса средней мощности на полевых транзисторах // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, Вып 19. С. 51.
7. Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н. О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25, № 10. С. 2160.
8. Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu. D., Ryskin N.M. Chaotic dynamics of delayed feedback klystron oscillator and its control by external signal // IEEE Transactions on Electron Devices. 2005. Vol. 52, № 5. P. 790.
9. Ryskin N.M., Titov V.N., Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S., Booske J. and Sengele S. Generation of chaotic radiation in a driven traveling wave tube amplifier with time-delayed feedback // Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13, № 1. P. 013104.
10. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Садовников С.А., Скороходов В.Н. Сверхвысокочастотные электронные генераторы хаотических радиоимпульсов // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 12. С. 1.
11. Кац В.А. Возникновения хаоса и его эволюция в распределенном генераторе с запаздыванием // Известия вузов. Радиофизика 1985. Т. 28, № 2. С. 161.
12. Дмитриев А.С., Ефремова Е.Ф., Румянцев Н.В. Генератор микроволнового хаоса с плоской огибающей спектра мощности в диапазоне 3–8 GHz // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 2. С. 1.
13. Гилмор-мл. А.С. Лампы с бегущей волной. М.: Техносфера, 2013. 616 с.
14. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2002. 489 с.
15. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Садовников С.А. Широкополосный каскадный клистронный генератор хаотических колебаний в СВЧ диапазоне // Патент на полезную модель №148722 от 13.11.2014 г.

References

1. Gulyaev Yu.V., Belyaev R.V., Vorontsov G.M., Zalogin N.N., Kalinin V.I., Kal'yanov E.V., Kislov V.V., Kislov V.Ya., Kolesov V.V., Myasin E.A. and Chigin E.P. Dynamic-chaos information technologies for data transmission, storage, and protection // Journal of Communications Technology and Electronics. 2003. Vol. 48, № 10. P. 1172.
2. Zalogin N.N. and Kislov V.V. Wideband Chaotic Signals in Radioengineering and Information Systems. Moscow: Radiotekhnika, 2006.
3. Dmitriev A.S., Kyarginskii B.E., Panas A.I., Puzikov D.Yu., Starkov S.O. Ultrawideband direct chaotic data transmission in the microwave range // Technical Physics Letters. January 2003. Vol. 29, Issue 1. P. 72.

4. *Dmitriev A.S., Efremova E.V., Maksimov N.A. and Panas A.I.* Chaos Generation. Moscow: Tekhnosfera, 2012.
5. *Grishin S.V., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Skorokhodov V.N., Sharaevskii Yu.P.* Generation of chaotic microwave pulses in a ring system based on a klystron power amplifier and a nonlinear delay line on magnetostatic waves // Technical Physics Letters. January 2010. Vol. 36, Issue 1. P. 76.
6. *Grishin S.V., Grishin V.S., Romanenko D.V., Sharaevskii Yu.P.* An ultrawideband spin-wave medium-power chaos generator based on field-effect transistors // Technical Physics Letters. October 2014. Vol. 40, Issue 10. P. 853.
7. *Kislov V.Ja., Mjasin E.A., Zalogin N.N.* // Radiotekhnika i jelektronika. 1980. T. 25, № 10. S. 2160. [in Russian].
8. *Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Ryskin N.M.* Chaotic dynamics of delayed feedback klystron oscillator and its control by external signal // IEEE Transactions on Electron Devices. 2005. Vol. 52, № 5. P. 790.
9. *Ryskin N.M., Titov V.N., Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S., Booske J. and Sengele S.* Generation of chaotic radiation in a driven traveling wave tube amplifier with time-delayed feedback // Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13, № 1. P.013104.
10. *Dmitriev B.C., Zharkov Ju.D., Sadovnikov S.A., Skorokhodov V.N.* // Zhurnal Radiojelektroniki. 2012. № 12. S. 1. (In Russian).
11. *Kats V.A.* // Radiofizika. 1985. T. 28, № 2. S. 161 (in Russian).
12. *Dmitriev A.S., Efremova E.V., Rumyantsev N.V.* A microwave chaos generator with a flat envelope of the power spectrum in the range of 3–8 GHz. // Technical Physics Letters. January 2014. Vol. 40, Issue 1. P. 48.
13. *Gilmour A.S.* Principles of traveling wave tubes. Boston; London, 1994.
14. *Pikovskij A., Rozenbljum M., Kurts Ju.* Sinhronizacija. Fundamental'noe nelinejnoe javlenie. M.: Tehnosfera, 2002. 489 s. (In Russian).
15. *Dmitriev B.S., Zharkov Ju.D., Skorokhodov V.N., Sadovnikov S.A.* Patent na poleznuju model' №148722 ot 13.11.2014. (In Russian).

Поступила в редакцию 23.06.2015

После доработки 28.07.2015

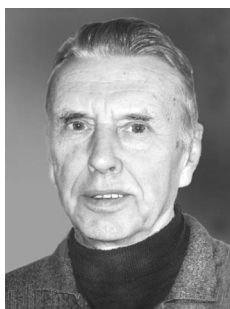
GENERATION OF CHAOTIC WIDE-BAND IMPULSES IN UHF RANGE BY TWT AUTOGENERATOR

B. S. Dmitriev, Yu. D. Zharkov, S. A. Sadovnikov, V. N. Skorokhodov

Saratov State University

This work presents results of experimental research of chaotic signal wide-band generator based on UHF band TWT amplifier. Two generation methods of chaotic pulses sequences were investigated.

Keywords: TWT autogenerator with delayed feedback, wide-band chaotic signal, chaotic suppression in TWT, chaotic pulses.



Дмитриев Борис Савельевич – родился в Саратове (1937), окончил физический факультет Саратовского университета (1959). В настоящее время – профессор кафедры нелинейной физики СГУ, доктор физ.-мат. наук. Читает лекции по общему курсу физики, радиофизике и электронике, концепциям современного естествознания. Область научных интересов – микроволновая электроника и радиофизика, нелинейная динамика распределённых систем. Опубликовал более 150 научных работ и учебных пособий, монографию «Относительность – время, пространство, поля» (с грифом учебного пособия для вузов), автор 16 изобретений и патентов.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail:dmitrievbs@info.sgu.ru



Жарков Юрий Дмитриевич – родился в селе Терса Еланского района Волгоградской области (1931). Окончил физический факультет СГУ (1953). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1961) и доктора (1987) в области радиофизики и электроники СВЧ. В настоящее время – профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – физическое моделирование процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с СВЧ-полями, исследование сложной динамики в СВЧ-генераторах с запаздывающей обратной связью. Опубликовал более 200 работ, среди них несколько учебных пособий, 20 изобретений.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail:dmitrievbs@info.sgu.ru



Садовников Сергей Александрович – родился в 1986 году. Окончил факультет нелинейных процессов СГУ (2008). В настоящее время – аспирант кафедры нелинейной физики СГУ. Область научных интересов – экспериментальные исследования нелинейной динамики в СВЧ автогенераторах. Имеет 6 публикаций.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail:zzfz@inbox.com



Скоруходов Валентин Николаевич – родился в 1959 году. Окончил физический факультет СГУ в 1982 году. В настоящее время является заведующим лабораторией кафедры электроники, колебаний и волн. Область научных интересов: нелинейная динамика в СВЧ-электронике. Автор более 15 статей в отечественных и зарубежных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail:skor@info.sgu.ru