



ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ГЕНЕРАТОРА ХАОСА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ЛБВ

А. П. Жидков

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

В работе представлены результаты экспериментального исследования сверхширокополосного генератора хаоса сантиметрового диапазона на основе ЛБВ. Изучен эффект полного подавления широкополосного хаотического сигнала внешним гармоническим сигналом.

Ключевые слова: Прямохаотические системы связи, ЛБВ-автогенератор с задерживающей обратной связью, широкополосный хаотический сигнал, кольцевые моды автогенератора с ЗОС, подавление хаоса в ЛБВ-автогенераторе.

Введение

В настоящее время определенный интерес в современной радиофизике и электронике вызывает исследование динамических систем, демонстрирующих сложную динамику и хаос. Показано, что динамический хаос обладает большими потенциальными возможностями в области прикладных исследований, прежде всего, в радиофизике, электронике, в частности, в различных генераторах СВЧ, в системах передачи и защиты информации [1–2]. Основная причина интереса заключается в совокупности свойств динамического хаоса, таких как простота его генерации, широкая полоса частот, обеспечивающая высокую помехоустойчивость, потенциально высокие скорости передачи, лёгкая управляемость характеристиками [3].

Для указанных целей вакуумные СВЧ-приборы являются привлекательными из-за своей способности генерировать излучение высокой мощности и возможности работы в условиях электромагнитного и радиационного излучений [4–7].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований сверхширокополосного генератора хаотических колебаний на основе лампы с бегущей волной и управления этими колебаниями.

1. Экспериментальная установка

Исследуемый автогенератор создан на промышленной ЛБВ десятисантиметрового диапазона длин волн, среднего уровня мощности. Основные характеристики ЛБВ усилителя следующие: ток электронного пучка до 60 мА, ускоряющее

напряжение 2500 В при коэффициенте усиления до 30 дБ на частоте 3 ГГц, полоса частот – октава и более. Фокусировка пучка осуществляется периодическим магнитным полем.

Автогенератор хаотических колебаний с запаздывающей обратной связью (ЗОС) представляет собой кольцевую схему, когда вход и выход ЛБВ замкнуты цепью обратной связи. В отличие от классического шумотрона [2], состоящего из двух соединённых в кольцо ЛБВ с регулируемым аттенуатором, в исследуемом генераторе использовалась одна ЛБВ. В лампе возбуждение хаотических колебаний, как и в любых кольцевых схемах, связано с наличием падающего участка на амплитудной характеристике.

Принципиальная схема для исследования основных характеристик автогенератора хаотических колебаний на ЛБВ показана на рис. 1. На такой схеме возможно изучение как различных автономных режимов и характеристик автогенератора, включая и хаотические колебания, так и режимов управления хаосом внешним гармоническим воздействием.

В кольце обратной связи расположены: нелинейный ЛБВ усилитель 1; переменный поляризационный аттенуатор 6; через направленные ответвители 2, 4 подключены измерительные приборы: анализатор спектра Agilent E4408B 5 и осциллограф реального времени Agilent DSO3062A. Через тройник 7 и ферритовый вентиль в кольцо обратной связи подаётся внешний сигнал от генератора стандартных сигналов Agilent MXJN5181A 9, который усиливается транзисторным усилителем 8.

Можно отметить, что в настоящее время для применения хаотических колебаний в широкополосных средствах связи и радиолокации во многих странах введены стандарты IEEE по использованию соответствующих частот, в соответствии с которыми наибольшее внимание исследователями и разработчиками уделяется диапазону частот от 3 до 8 ГГц [8]. Именно в этом диапазоне и получены приведённые в данной работе результаты.

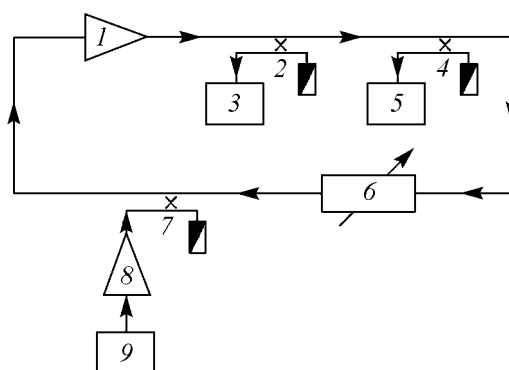


Рис. 1. Принципиальная схема для исследования основных характеристик автогенератора хаотических колебаний на ЛБВ: 1 – ЛБВ; 2, 4 – направленные ответвители; 3 – осциллограф реального времени; 5 – анализатор спектра; 6 – поляризационный аттенуатор; 7 – тройник; 8 – транзисторный усилитель; 9 – генератор стандартных сигналов

2. Основные характеристики ЛБВ-автогенератора

Для кольцевых автогенераторов хаоса одним из характерных параметров динамической системы является время запаздывания сигнала в кольце обратной связи. Что касается ЛБВ-автогенератора, запаздывание определяется временем задержки сигнала в самой ЛБВ и во внешнем кольце обратной связи. Для выбранных

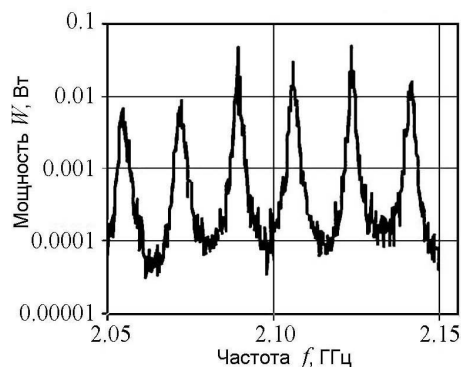


Рис. 2. Кольцевые резонансные моды ЛБВ-автогенератора при $I = 43$ мА, $U = 2690$ В

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 $2\pi N$. Частотный интервал между соседними модами ω_N и ω_{N+1} равен $\Delta\omega_N = 2\pi/t$, где t есть полное групповое время запаздывания вдоль замкнутого кольца обратной связи.

Таким образом, используя полное время задержки сигнала t , можно вычислить частотный интервал между двумя соседними модами и сопоставить его с экспериментальным значением. Согласно формуле $\Delta\omega_N = 2\pi/t$ для исследуемого ЛБВ-автогенератора частотный интервал между модами составляет в среднем 17.2 МГц. Определяя частотный интервал между кольцевыми резонансными модами (рис. 2) реальной автоколебательной системы по анализатору спектра, отмечаем практически полное совпадение экспериментального значения 17.4 МГц с рассчитанным по формуле.

Подбором управляющих параметров автогенератора I, U, L (L – затухание в цепи обратной связи) можно реализовать разнообразные регулярные и хаотические режимы генерации. Хаотическое поведение системы удаётся наблюдать в достаточно широком диапазоне управляющих параметров. Наиболее характерные режимы работы ЛБВ-автогенератора (периодические колебания, автомодуляция, развитой хаос), которые представлены на рис. 3, достигались настройкой затухания в цепи обратной связи при определённых значениях тока пучка $I = 50$ мА и напряжения $U = 2550$ В. Мощность устойчивого хаотического сигнала на рис. 4 составляет $W = 1.5$ Вт.

Генераторы на основе ЛБВ, как известно, из-за широкой полосы частот и нелинейных процессов модуляции скорости и группировки электронов могут генерировать вторую и даже третью гармонику вблизи точки насыщения. В спиральных ЛБВ в точке насыщения обычно появляются вторая гармоника, мощностью на 8–10 дБ ниже основной, и третья гармоника, мощностью обычно ниже основной на 16–18 дБ [9].

В исследуемом кольцевом ЛБВ-автогенераторе благодаря анализатору спектра, позволяющему наблюдать широкий диапазон частот до 10 ГГц, также можно

параметров ЛБВ и длины кольца обратной связи (кабель с внутренним диэлектрическим заполнением и поляризационный аттенюатор) на частоте 3 ГГц простой расчёт даёт величину 55 нс. Это время можно определить и экспериментально с помощью анализатора СВЧ-цепей Agilent E5062F, подбирая значение рабочего тока установки очень малым (6 мА), чтобы ЛБВ являлась пассивным элементом и не генерировала заметного сигнала. На частоте 3 ГГц это время составило 60 нс, что свидетельствует о достоверности расчётных параметров применяемой ЛБВ.

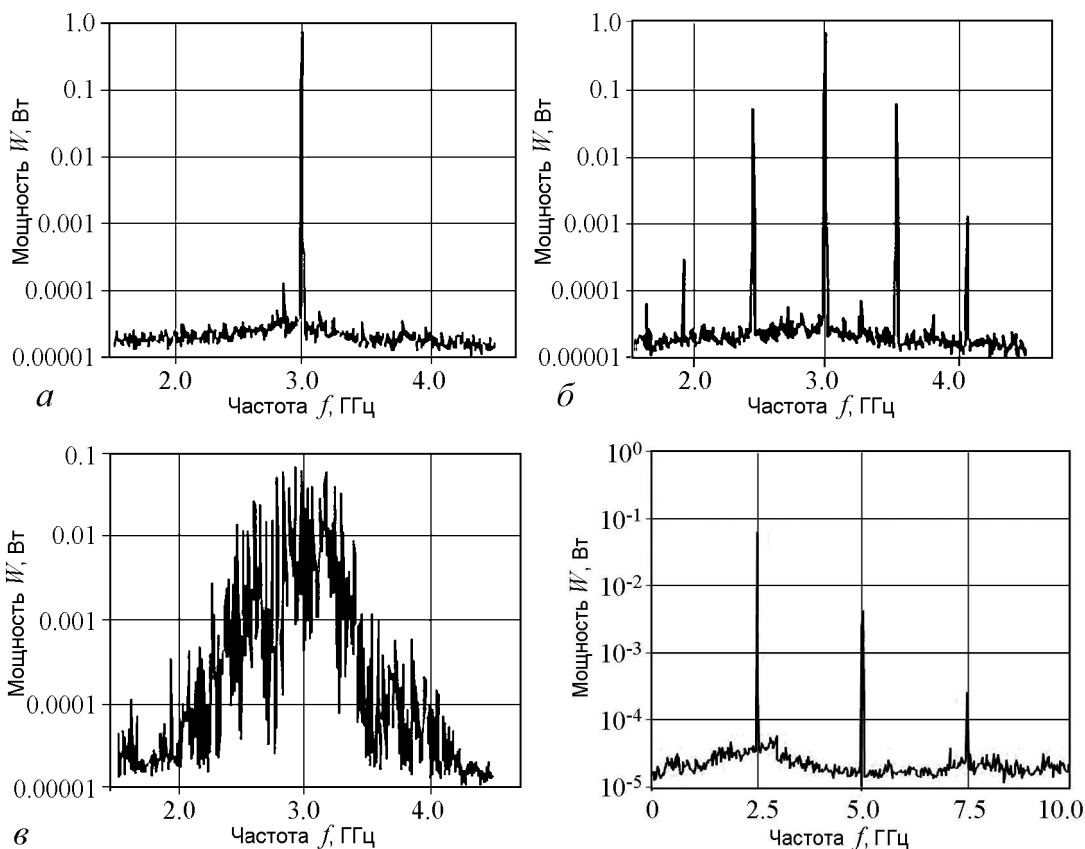


Рис. 3. Характерные режимы работы ЛБВ-автогенератора, достигаемые при определенных настройках затухания в цепи обратной связи L , дБ: a – 8.3, одночастотный режим; $б$ – 9.4, автомодуляция; $в$ – 11.0, хаотический режим

Рис. 4. Гармоники в ЛБВ-автогенераторе

удостовериться в наличии второй и третьей гармоник. Так, при токе $I = 12$ мА наблюдались три гармоники на частотах 2.5 ГГц, 5 ГГц и 7.5 ГГц (см. рис. 4). Причём вторая гармоника ниже основной на 11.4 дБ, а третья ниже на 23.8 дБ, что хорошо соответствует приведённым в [9] данным.

Для целей практического применения широкополосных хаотических сигналов в информационных системах возникает задача управления этими сигналами. Один из таких интересных режимов связан с эффектом подавления хаоса (известного в литературе как синхронизация) путём полного подавления хаоса внешним гармоническим сигналом [10]. Этот эффект заключается в том, что при воздействии внешнего гармонического сигнала, строго выбранного уровня и определенной частоты, на развитый хаос автогенератора наблюдается полное подавление собственных хаотических колебаний и установление генерации периодических колебаний, совпадающих по частоте с частотой вынуждающего сигнала. В частности, этот эффект экспериментально хорошо изучен для клистронных автогенераторов с ЗОС, характеризующихся довольно малой полосой частот хаотического сигнала [11]. Отметим, что для подавления сверхширокополосных хаотических сигналов этот эффект экспериментально не изучен.

3. Подавление хаотического сигнала

В ходе экспериментальных исследований был реализован хаотический режим ЛБВ-автогенератора со значением ускоряющего напряжения $U = 2740$ В и при токе $I = 56$ мА с интегральной мощностью сигнала 1.35 Вт в широкой полосе частот (1–8 ГГц). Подаем в кольцо обратной связи внешний гармонический сигнал мощностью 10 мВт на частоте 2.94 ГГц первой гармоники сгруппированного тока. Внешний сигнал усиливается примерно до 200 мВт с помощью транзисторного усилителя. В результате удаётся осуществить полное подавление хаотического сигнала.

Исследования подавления генерации хаоса на частоте первой гармоники доказывает возможность синхронизации путём подавления хаоса в ЛБВ-автогенераторе с ЗОС, что открывает перспективы для дальнейших исследований в области создания широкополосных хаотических импульсов по аналогии с клистронным автогенератором [12].

Был также поставлен специальный физический эксперимент по исследованию возможности управления хаотическим сигналом с помощью второй гармоники. Как выяснилось, для наблюдения полного подавления хаотического сигнала требуется заметный уровень мощности на этой гармонике, что было трудно выполнить при имеющейся аппаратуре, поэтому эксперимент носил качественный характер.

Для этого в ходе экспериментальных исследований при токе пучка ЛБВ-автогенератора 18 мА был получен «квазихаотический» сигнал с интегральной мощностью 0.26 Вт (рис. 5, а). Под «квазихаотическим» сигналом понимается режим сложной модуляции, предшествующий возникновению хаоса. Как видно из рис. 5, а, пики «квазихаотических» колебаний наблюдаются на частотах гармоник сгруппированного тока. В результате управления внешним сигналом на частоте второй гармоники (4.6 ГГц) мощностью всего 8.17 мВт «квазихаотический» сигнал был полностью подавлен (рис. 5, б).

Проведённый физический эксперимент показал, что при наличии источников с необходимой мощностью можно добиться полного подавления широкополосного хаотического сигнала и на частоте второй гармоники.

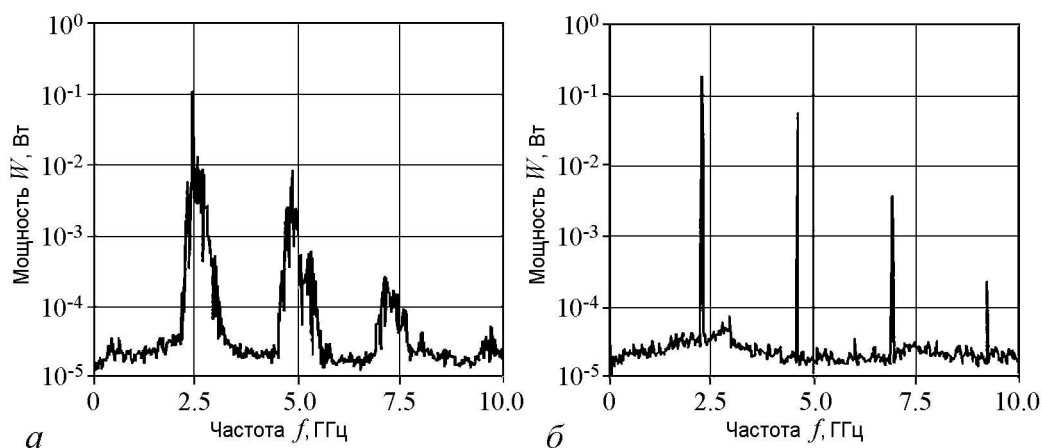


Рис. 5. а – «квазихаотический» сигнал $I = 18$ мА, $U = 2530$ В, интегральная мощность 0.26 Вт; б – подавление «квазихаотического» сигнала с помощью ГСС мощностью 8.17 мВт на частоте второй гармоники 4.6 ГГц

Заключение

В данной работе подробно исследован сверхширокополосный генератор хаотических колебаний на основе лампы с бегущей волной с запаздывающей обратной связью. Основное внимание в работе уделено исследованию эффекта полного подавления широкополосного хаоса внешним гармоническим сигналом. Именно этот эффект перспективен для использования в прямохаотических системах связи.

Выражаю благодарность за постоянную помощь в проведении исследований и обсуждении полученных результатов профессору Дмитриеву Б.С., а также заведующему лабораторией Скороходову В.Н. и инженеру Садовникову С.А. за помощь в организации и проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 14-02-00329 и 14-02-00577) и Программы по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (НШ – 828.2014.2).

Библиографический список

1. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса. Москва: Техносфера, 2012.
2. *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. Москва: Радиотехника, 2006.
3. *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О.* Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2.
4. *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.
5. *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 Transaction on electron devices. 2005. Vol. 52, № 5.
6. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Семеновых П.Ю., Бирюков А.А.* Каскадный клистронный автогенератор с запаздыванием // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 12.
7. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Жидков А.П.* Генерация широкополосных хаотических СВЧ-сигналов и управление ими в ЛБВ-автогенераторе // Материалы Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014»: Т. 1. Саратов, 25–26 сентября 2014. Саратов, 2014. С. 29.
8. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.Ф., Румянцев Н.В.* Генератор микроволнового хаоса с плоской огибающей спектра мощности в диапазоне 3–8 ГГц // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 2. С. 1.
9. *Гилмор А.С.-мл.* Лампы с бегущей волной. Москва: Техносфера, 2013

10. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. Москва: Техносфера, 2003.
11. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Геншафт А.М.* Синхронизация хаотических колебаний путём подавления хаоса в клистронном автогенераторе внешним гармоническим сигналом // ПНД. 2007. Т. 15, № 3.
12. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Бирюков А.А.* Генерация хаотических радиоимпульсов с помощью клистронного автогенератора с запаздыванием// Известия вузов. ПНД. 2006. Т. 14, № 4.

Поступила в редакцию 26.11.2014

RESEARCH OF ULTRA-WIDE RANGE S-BAND CHAOS GENERATOR BASED ON TWT

A. P. Zhidkov

Saratov State University

The paper presents the results of the experimental research ultra-wide range s-band chaos generator based on TWT. The effect of absolute suppression mode chaotic signal by external harmonic signal has been investigated.

Keywords: Chaotic communications systems, TWT-generator with delaying feedback, ultra wide range chaotic signal, cyclic resonant mode of generator with delaying feedback, absolute suppression mode chaos of the TWT-generator.



Жидков Артём Павлович – родился в Саратове (1993). Получил степень бакалавра по направлению «Прикладные математика и физика» (2014) в Саратовском государственном университете. В настоящее время является магистрантом первого курса. Имеет одну публикацию в области радиофизики и электроники в качестве соавтора. Научные интересы – генерация хаотических сигналов сантиметрового диапазона. Принимал участие в конференции АПЭП-2014, Саратов как докладчик.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail:art.prod.mc@gmail.com