



Когерентный резонанс в микроволновых генераторах хаоса

П. С. Комков^{1,2}, Д. С. Пыхтунов^{1,2}, Д. В. Романенко¹, В. Н. Скороходов¹, С. В. Гришин¹✉

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

²АО «НПП «Алмаз», Россия
E-mail: ✉sergrsh@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.10.2024, принята к публикации 29.11.2024,
опубликована онлайн 6.12.2024, опубликована 30.05.2025

Аннотация. Цель настоящего исследования — экспериментальное наблюдение явления когерентного резонанса в двух микроволновых одномодовых генераторах хаоса с запаздывающей обратной связью, находящихся под внешним шумовым воздействием. Первым генератором является вакуумный генератор хаоса на основе лампы бегущей волны и многорезонаторного пролетного клистрона. В роли второго генератора выступает твердотельный генератор хаоса на основе транзисторного усилителя и спин-волновой линии передачи на поверхностной магнитостатической спиновой волне (ПМСВ). Хаотическая динамика вакуумного генератора обусловлена наличием падающего участка на амплитудной характеристике пролетного клистрона. У твердотельного генератора развитие хаотической динамики связано с нелинейным параметрическим трехволновым распадом ПМСВ на коротковолновые спиновые волны. **Методы.** Для наблюдения явления когерентного резонанса в одиночных хаотических осцилляторах (микроволновых генераторах хаоса) используется метод временной фильтрации хаоса под воздействием шума с ограниченной полосой частот. Метод базируется на эффекте вынужденной синхронизации хаоса (через его подавление) внешним шумовым воздействием. Предложенный метод обладает наибольшей эффективностью при частотном разделении спектров мощности хаотического и шумового сигналов (спектры мощности обоих сигналов не должны перекрываться). **Результаты.** В исследуемых микроволновых генераторах хаоса различной физической природы экспериментально установлено существование режима «on-off» перемежаемости, в котором наблюдается явление когерентного резонанса. Показано, что время автокорреляции огибающей хаотического сигнала имеет максимальное значение при определенном уровне мощности внешнего шумового сигнала, и это максимальное значение зависит от ширины полосы частот шумового сигнала. **Заключение.** Разработанный метод наблюдения когерентного резонанса может быть применим и к микроволновым многомодовым (широкополосным) генераторам хаоса с запаздывающей обратной связью.

Ключевые слова: генераторы хаоса, лампа бегущей волны, многорезонаторный пролетный клистрон, спиновые волны, когерентный резонанс, перемежаемость типа «on-off».

Благодарности. Авторы выражают благодарность профессору О.И. Москаленко за консультации по диагностике «on-off» перемежаемости. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00274, <https://rscf.ru/project/23-22-00274/>.

Для цитирования: Комков П. С., Пыхтунов Д. С., Романенко Д. В., Скороходов В. Н., Гришин С. В. Когерентный резонанс в микроволновых генераторах хаоса // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 3. С. 322–340. DOI: 10.18500/0869-6632-003150. EDN: DPHWFG

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Coherent resonance in the microwave chaos generators

P. S. Komkov^{1,2}, D. S. Pykhtunov^{1,2}, D. V. Romanenko¹,
V. N. Skorokhodov¹, S. V. Grishin¹✉

¹Saratov State University, Russia

²JSC “SPE “Almaz”, Russia

E-mail: ✉sergrsh@yandex.ru

Received 15.10.2024, accepted 29.11.2024, available online 6.12.2024, published 30.05.2025

Abstract. The purpose of this study is the observation of coherent resonance phenomenon in two microwave single-mode chaos generators with a delayed feedback under external noise influence. The first generator is a vacuum chaos generator based on a traveling wave tube and a multi-resonator drift klystron. The second generator is a solid-state chaos generator based on a transistor amplifier and a spin-wave transmission line supporting a magnetostatic surface wave (MSSW) propagation. The chaotic dynamics of the vacuum generator is caused by the presence of a falling section on the amplitude characteristic of the drift klystron. In the solid-state generator, the development of chaotic dynamics is associated with a nonlinear parametric three-wave decay of the MSSW into short-wave spin waves. *Methods.* To observe the coherent resonance phenomenon in single chaotic oscillators (the microwave chaos generators), the time filtering method under the noise influence with a limited frequency band is used. The method is based on the effect of forced chaos synchronization (through its suppression) by external noise. The proposed method has the greatest efficiency in frequency separation of the power spectra of chaotic and noise signals (the power spectra of both signals should not overlap). *Results.* In the studied microwave chaos generators of various physical natures, the existence of the “on-off” intermittency mode, in that the coherent resonance phenomenon is observed, has been experimentally established. It has been shown that the autocorrelation time of the envelope of a chaotic MW signal has a maximum value at a certain power level of the noise MW signal, and this maximum value depends on the noise MW signal bandwidth. *Conclusion.* The developed method for the coherent resonance observation can also be applied to the multimode (broadband) ring chaos generators with the delayed feedback.

Keywords: chaos generators, traveling wave tube, multi-resonator drift klystron, spin waves, coherent resonance, “on-off” intermittency.

Acknowledgements. The authors thank Professor O.I. Moskalenko for consultations on the diagnostics of “on-off” intermittency. This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-22-00274, <https://rscf.ru/project/23-22-00274/>).

For citation: Komkov PS, Pykhtunov DS, Romanenko DV, Skorokhodov VN, Grishin SV. Coherent resonance in the microwave chaos generators. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(3):322–340. DOI: 10.18500/0869-6632-003150

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Известно, что в возбудимых шумом системах наблюдается фундаментальное нелинейное явление, получившее название когерентного резонанса [1–3]. Оно заключается в том, что у шумового воздействия есть некий оптимальный уровень, при котором индуцированные шумом колебания становятся наиболее близкими к регулярным. В этом случае зависимость времени автокорреляции от интенсивности шума имеет ярко выраженный максимум при определенной интенсивности шума [2]. Когерентный резонанс подтвержден экспериментально в возбудимых электронных схемах [4], в полупроводниковом лазере с оптической обратной связью [5] и в сверхвысокочастотном (СВЧ) кристаллоном автогенераторе, находящемся на пороге самовозбуждения [6].

В динамических хаотических системах когерентный резонанс был исследован как теоретически [7, 8], так и экспериментально [9, 10]. В работах [7, 9, 10] это явление было обнаружено в хаотической бистабильной цепи Чуа, а в [8] – в системе двух связанных идентичных хаотических осцилляторов Лоренца. В последнем случае эффект когерентного резонанса наблюдался в режиме «on-off» перемежаемости, который возникал под действием шума вблизи состояния синхронизации двух хаотических осцилляторов. В обоих случаях у динамической системы существовало

два устойчивых состояния, между которыми происходило переключение под воздействием шума, как и в возбудимых шумом системах.

Аналогичную ситуацию можно реализовать, используя эффект подавления хаоса внешним воздействием. Так, на основе эталонных моделей нелинейной динамики было показано, что внешний гармонический сигнал при достижении его амплитуды определенного уровня может полностью подавить собственную хаотическую динамику системы и тем самым установить режим синхронизации колебаний [11, 12]. Данный тип синхронизации через подавление хаоса внешним монохроматическим сигналом, известный в литературе как вынужденная синхронизация хаоса [11, 12], наблюдался экспериментально как в вакуумных [13, 14], так и в твердотельных (спин-волновых) [15] микроволновых генераторах хаоса с запаздывающей обратной связью (ЗОС). В вакуумных генераторах хаоса с ЗОС, собранных по схеме шумотрона [16, 17], хаотическая динамика обусловлена нелинейностью либо лампы бегущей волны (ЛБВ) [18], либо многорезонаторного пролетного клистрона [19]. В спин-волновых генераторах хаоса с ЗОС в качестве нелинейного элемента, обеспечивающего хаотизацию генерируемого СВЧ-сигнала, выступала линия задержки на магнитостатических спиновых волнах (МСВ) [20].

Периодическое установление / нарушение вынужденной синхронизации хаоса, приводящее к генерации периодической последовательности хаотических СВЧ-импульсов, было реализовано на практике в клистронном автогенераторе хаоса с ЗОС, находящемся под воздействием периодической последовательности прямоугольных СВЧ-импульсов большой амплитуды [21]. На временных интервалах, где внешние СВЧ-импульсы отсутствовали, генерировался хаотический СВЧ-сигнал (вынужденная синхронизация хаоса «выключена»), а на временных интервалах, где внешние СВЧ-импульсы присутствовали, наблюдалось полное подавление хаотической динамики системы (вынужденная синхронизация хаоса «включена»). В [22] предложенный способ управления хаотической динамикой системы был распространен на широкополосные микроволновые генераторы хаоса с ЗОС, в которых за счет большой частотной отстройки между несущими хаотического СВЧ-сигнала и внешнего импульсно-модулированного (ИМ) СВЧ-сигнала удавалось осуществить частотное разделение спектров мощности обоих сигналов (спектры мощности сигналов не перекрывались) и отфильтровывать монохроматический СВЧ-сигнал, находящийся в паузах между хаотическими СВЧ-импульсами. Это позволяло исследовать непосредственно сам хаотический СВЧ-сигнал, на который внешний ИМ СВЧ-сигнал уже оказал воздействие. Впоследствии данный метод временной фильтрации хаотического СВЧ-сигнала периодической последовательностью внешних прямоугольных СВЧ-импульсов был применен в установке бриллюэновской спектроскопии для изучения пространственно-временной динамики хаотических диссипативных солитонов огибающей [23].

В [24] для временной фильтрации широкополосного хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого спин-волновым генератором хаоса с ЗОС, было предложено использовать внешний шумовой СВЧ-сигнал, который представлял собой белый шум с ограниченной полосой частот в микроволновом диапазоне. Было показано, что метод временной фильтрации широкополосного хаотического сигнала внешним более узкополосным шумовым сигналом большой амплитуды эффективно работает только в том случае, когда спектры мощности обоих сигналов (хаотического и шумового) не пересекаются (частотно разделены). Использование внешнего шумового воздействия приводило к случайному установлению/нарушению вынужденной синхронизации хаоса. Таким образом, в подавляемой шумом хаотической системе реализовывался режим, напоминающий режим «on-off» перемежаемости в системе двух связанных хаотических осцилляторов, в котором диагностировался когерентный резонанс [8]. Если проводить аналогию с возбудимыми шумом системами (например, с моделью ФицХью–Нагумо, описывающей поведение нервных импульсов) [2], то в подавляемых шумом хаотических системах хаотический аттрактор соответствует аттрактору в виде неподвижной точки возбудимой шумом системы, а характерное время подавления хаоса соответствует времени активации нервного импульса. Время возврата

из подавленного состояния в состояние хаотической генерации соответствует времени возврата из возбужденного в невозбужденное состояние в модели нейрона. Таким образом, в подавляемых шумом хаотических системах наблюдается ситуация, которая прямо противоположна ситуации в возбудимых шумом системах. Здесь внешний шум является не возбудителем, а подавителем («синхронизатором») собственной хаотической динамики системы, что должно приводить к появлению «on-off» перемежаемости и когерентного резонанса. Однако в [24] оба этих явления не исследовались.

В настоящей работе на примере двух разных (вакуумном и твердотельном) микроволновых генераторов хаоса демонстрируется универсальность метода временной фильтрации хаоса ограниченным по частоте внешним шумом. Использование данного метода приводит к режиму «on-off» перемежаемости подавленных (синхронных) и неподавленных (несинхронных) состояний и, как следствие этого, к наблюдению эффекта когерентного резонанса в подавляемых шумом хаотических системах.

1. Экспериментальные макеты микроволновых генераторов хаоса

1.1. Вакуумный кольцевой генератор хаоса. Схематические изображения исследуемых в эксперименте микроволновых одномодовых генераторов хаоса с ЗОС представлены на рис. 1. Так, одномодовый вакуумный генератор хаоса, собранный по схеме шумотрона [16, 17] (см. рис. 1, a), состоит из ЛБВ-усилителя, переменного аттенюатора и пятирезонаторного пролетного клистрона средней мощности типа КУ-134Е, входы и выходы которых последовательно соединены друг с другом и охвачены цепью ЗОС. ЛБВ-усилитель, выполненный на основе односекционной спиральной замедляющей системы с переменным шагом, работает в диапазоне

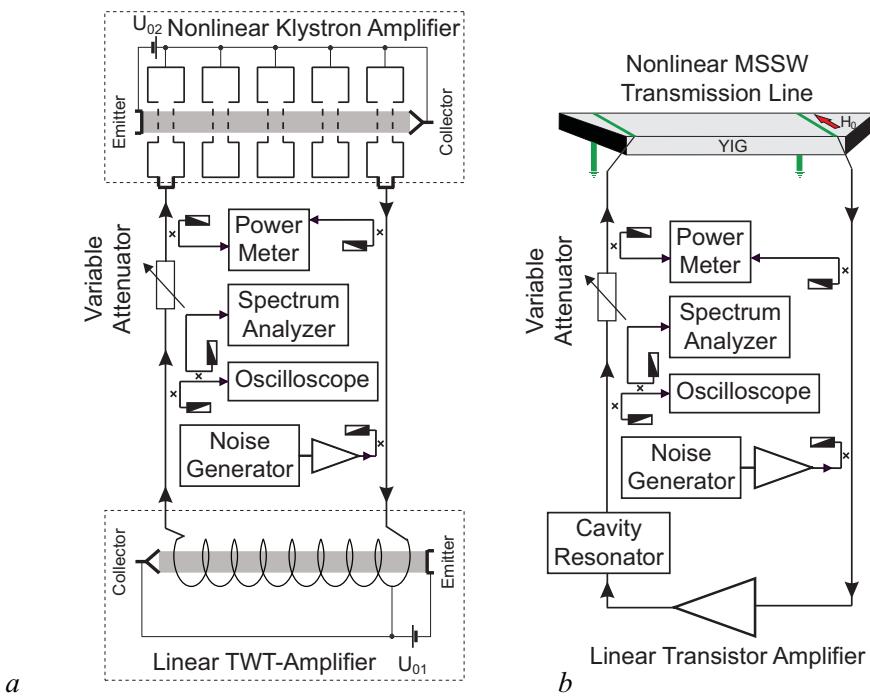


Рис. 1. Блок-схемы микроволновых кольцевых генераторов хаоса: a — вакуумный генератор хаоса (модифицированная схема шумотрона); b — спин-волновой генератор хаоса (цвет онлайн)

Fig. 1. Block diagrams of the microwave ring chaos generators: a — a vacuum chaos generator (the modified noisetron scheme); b — a spin-wave chaos generator (color online)

частот 2...4 ГГц, компенсирует потери СВЧ-сигнала, циркулирующего по кольцу. Пролетный клистрон с центральной частотой $f_0 = 2797$ МГц используется одновременно как частотно-избирательный и нелинейный элемент для выделения одной из собственных мод кольцевого резонатора и формирования на ней хаотического СВЧ-сигнала. Уровень мощности СВЧ-сигнала на входе пролетного клистрона регулируется с помощью переменного аттенюатора. Необходимо отметить, что в [25] аналогичная модифицированная схема шумотрона демонстрировала генерацию хаотических последовательностей темных импульсов огибающей короткой длительности при условии, что ЛБВ-усилитель работает в режиме сильной амплитудной и фазовой нелинейности, а пролетный клистрон — в слабо нелинейном режиме. Теперь ЛБВ-усилитель работает в слабо нелинейном режиме усиления генерируемого СВЧ-сигнала, а многорезонаторный пролетный клистрон — в режиме сильной амплитудной нелинейности.

Большая часть мощности СВЧ-сигнала с выхода ЛБВ-усилителя возвращается обратно в кольцевой генератор, а ее меньшая часть через микрополосковые направленные ответвители поступает на входы анализатора спектра E4408B и осциллографа реального времени Infiniium DSO81004B для анализа и последующей обработки. Осциллограф реального времени характеризуется полосой пропускания 10 ГГц. Для анализа временных рядов, содержащих СВЧ-сигнал, частота дискретизации сигнала выбирается равной 20 Гс/с. В этом случае глубина памяти составляет 2 млн. точек.

Внешний шумовой СВЧ-сигнал с нормальным (гауссовым) законом распределения вероятностей формируется генератором сигналов ESG E4438C и подается на вход ЛБВ-усилителя на частоте $f_n = 2.6$ ГГц через микрополосковый направленный ответвитель, когда ЛБВ-усилитель используется в схеме генератора хаоса. Фактически внешний шумовой СВЧ-сигнал генерируется источником белого шума, из которого полосно-пропускающими фильтрами выделяется требуемая полоса частот Δf_n , которая может меняться до 80 МГц. Такой ограниченный по частоте белый шум используется для осуществления временной фильтрации генерируемого хаотического сигнала. На рис. 2 приведены спектральные и статистические характеристики задаваемого в эксперименте шумового сигнала, имеющего одинаковую центральную частоту f_n , но разную полосу частот Δf_n . Видно, что увеличение Δf_n приводит к уменьшению спектральной плотности мощности при одинаковом уровне интегральной мощности шума P_n . При этом гистограммы распределения вероятностей в обоих случаях подчиняются нормальному закону, которому соответствует сплошная красная кривая. Для $\Delta f_n = 1$ МГц нормальный закон описывается средним $m = 0.0049$ и дисперсией $\sigma = 0.185$. Для $\Delta f_n = 30$ МГц — $m = 0.0033$ и $\sigma = 0.201$.

На рис. 3, *a* приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ЛБВ-усилителя и многорезонаторного пролетного клистрона. Видно, что АЧХ клистрона имеет резонансный вид. Максимальное значение коэффициента усиления ~ 40 дБ наблюдается на частоте f_0 . На этой же частоте для выбранных значений тока пучка и ускоряющего напряжения ($I_{01} = 44.3$ мА и $U_{01} = 2.5$ кВ) коэффициент усиления ЛБВ имеет величину ~ 28 дБ. Как будет показано далее, именно на частоте f_0 и будет происходить формирование хаотического СВЧ-сигнала вакуумным генератором хаоса. Необходимо отметить, что максимальное значение коэффициента усиления ЛБВ ~ 47 дБ достигается на частоте ~ 3.5 ГГц при токе пучка $I_{01} = 100$ мА и ускоряющем напряжении $U_{01} = 3$ кВ. Работа ЛБВ-усилителя не в номинальном режиме обусловлена тем, что при выбранных значениях тока пучка и ускоряющего напряжения явление когерентного резонанса наблюдается при меньшей мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала, подаваемого на вход ЛБВ, которую мы можем реализовать в эксперименте.

На рис. 3, *b* приведены амплитудные характеристики обоих вакуумных СВЧ-усилителей. Из представленных результатов следует, что на амплитудной характеристике многорезонаторного пролетного клистрона наблюдается ярко выраженный участок с отрицательным наклоном (так называемый «падающий» участок), возникновение которого обусловлено перегруппировкой электронов в пучке под действием СВЧ-поля большой амплитуды. Наличие падающего

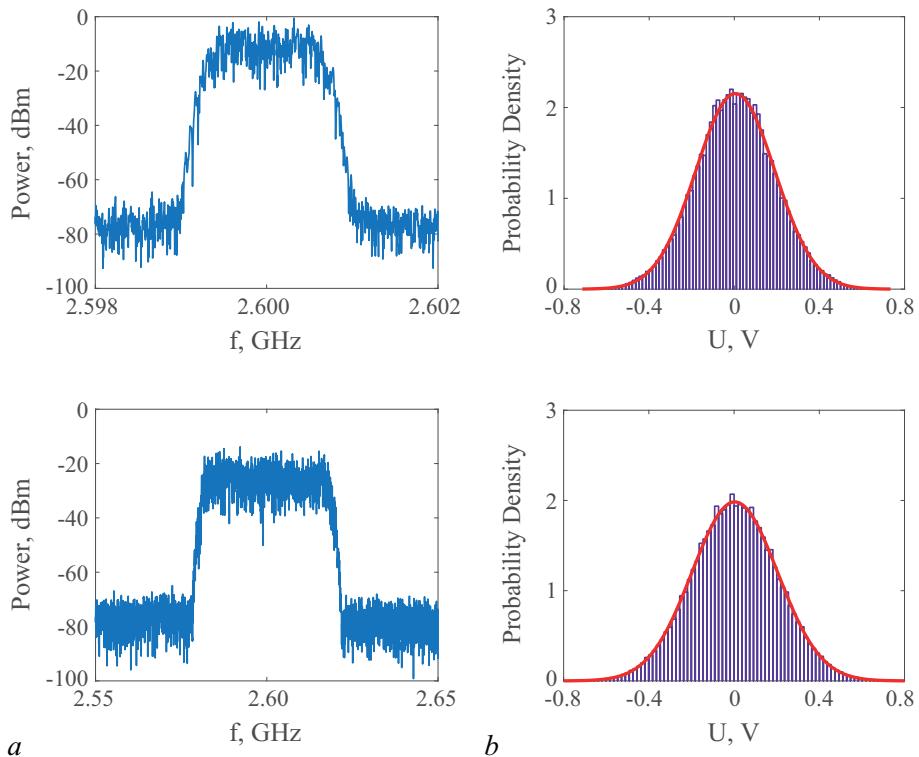


Рис. 2. Характеристики шумового СВЧ-сигнала: *a* — спектры мощности и *b* — гистограммы распределения вероятностей. Верхний ряд — ширина полосы шума $\Delta f_n = 1$ МГц, нижний ряд — $\Delta f_n = 30$ МГц. В обоих случаях центральная частота шумового СВЧ-сигнала $f_n = 2.6$ ГГц, а его интегральная мощность $P_n = 0$ дБм (цвет онлайн)

Fig. 2. Characteristics of MW noise signal: *a* — the power spectra and *b* — the probability distribution histograms. Top row — the noise bandwidth $\Delta f_n = 1$ MHz, bottom row — $\Delta f_n = 30$ MHz. In both cases, the central frequency of MW noise signal $f_n = 2.6$ GHz and its integral power $P_n = 0$ dBm (color online)

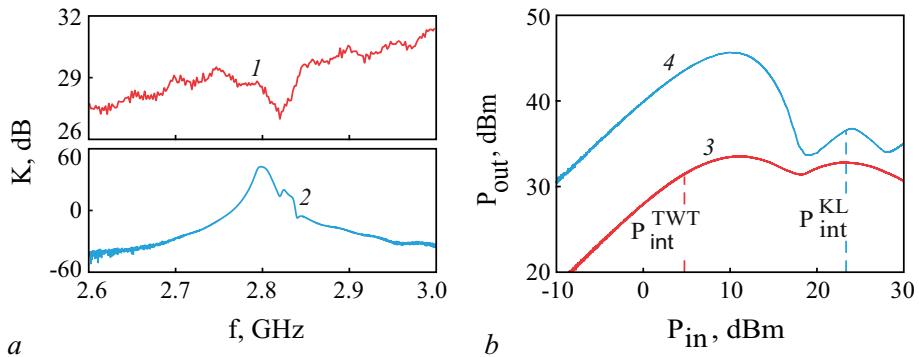


Рис. 3. *a* — Амплитудно-частотные характеристики ЛБВ-усилителя (кривая 1) и многорезонаторного пролетного кластрона (кривая 2), измеренные при входной мощности $P_{in} = -30$ дБм. *b* — Амплитудные характеристики ЛБВ-усилителя (кривая 3) и многорезонаторного пролетного кластрона (кривая 4), измеренные на частоте $f_0 = 2797$ МГц. Здесь же пунктирными линиями показаны уровни интегральной мощности на входе ЛБВ-усилителя и пролетного кластрона, при которых в кольцевом генераторе формируется хаотический СВЧ-сигнал. На фрагментах *a* и *b* результаты получены при $I_{01} = 44.3$ мА, $U_{01} = 2.5$ кВ, $I_{02} = 42$ мА и $U_{02} = 2.1$ кВ (цвет онлайн)

Fig. 3. *a* — Amplitude-frequency characteristics of the TWT-amplifier (curve 1) and the multi-resonator drift klystron (curve 2), measured for the input power $P_{in} = -30$ dBm. *b* — Amplitude characteristics of the TWT-amplifier (curve 3) and the multi-resonator drift klystron (curve 4) measured for the frequency $f_0 = 2797$ MHz. Here, the dotted lines show the integral power levels at the input of the TWT-amplifier and the drift klystron, at that the chaotic MW-signal is formed in the ring generator. In *a* and *b*, the results were obtained for $I_{01} = 44.3$ mA, $U_{01} = 2.5$ kV, $I_{02} = 42$ mA and $U_{02} = 2.1$ kV (color online)

участка на амплитудной характеристике пролетного клистрона приводит к амплитудному механизму автомодуляции генерируемого СВЧ-сигнала и к переходу к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода (сценарий Фейгенбаума) [19]. Здесь же показаны уровни интегральной мощности СВЧ-сигнала на входах ЛБВ-усилителя $P_{\text{int}}^{\text{TWT}} = +5$ дБм и пролетного клистрона $P_{\text{int}}^{\text{KL}} = +24$ дБм, при которых в исследуемой автоколебательной системе наблюдается генерация хаотического СВЧ-сигнала. При указанных уровнях мощности ЛБВ-усилитель работает в слабо нелинейном режиме, а пролетный клистрон — в сильно нелинейном режиме.

1.2. Спин-волновой кольцевой генератор хаоса. Одномодовый спин-волновой генератор хаоса представляет собой последовательно соединенные сверхширокополосный транзисторный усилитель, объемный резонатор, переменный аттенюатор и спин-волновую линию передачи, которые охвачены цепью ЗОС (см. рис. 1, *b*). В спин-волновом генераторе хаоса в отличие от рассмотренного выше вакуумного генератора хаоса частотно-избирательными и нелинейными свойствами обладают два разных элемента: объемный резонатор и спин-волновая линия передачи. Транзисторный усилитель, так же как и линейная ЛБВ, используется как для компенсации потерь генерируемого сигнала, так и для управления усилением с помощью внешнего шумового СВЧ-сигнала. Как следует из результатов, представленных на рис. 4, *a*, *b*, транзисторный усилитель обладает коэффициентом усиления 55 дБ в полосе частот 2...8 ГГц и выходной мощностью в режиме насыщения 12 Вт. Объемный резонатор характеризуется резонансной частотой $f_r = 3$ ГГц и нагруженной добротностью $Q_L = 668$. Спин-волновая линия передачи в конфигурации «линия задержки» состоит из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) с намагниченностью насыщения 1750 Гс, толщиной 65 мкм, шириной 4 мм и длиной 15 мм, которая размещается на поверхности несимметричной микрополосковой линии (НМПЛ). НМПЛ представляет собой два разомкнутых микрополосковых проводника шириной 30 мкм, расположенных на диэлектрической подложке. Один конец каждого проводника закорочен на землю, а другой подсоединен к нагрузке. Внешнее постоянное магнитное поле $H_0 = 450$ Э прикладывается касательно к поверхности пленки ЖИГ вдоль микрополосковых проводников. В этом случае, как следует из результатов, представленных на рис. 4, *a*, *b*, в пленке ЖИГ в полосе частот 2.5...3.5 ГГц эффективно возбуждается поверхностная МСВ (ПМСВ), которая при повышенных уровнях мощности обладает нелинейными потерями.

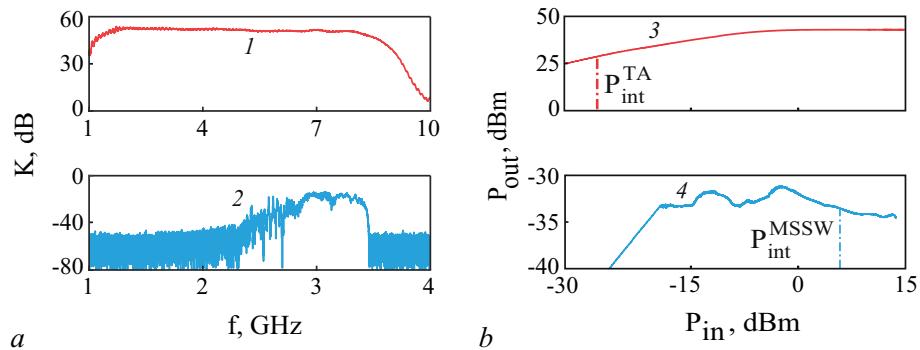


Рис. 4. *a* — Амплитудно-частотные характеристики транзисторного усилителя (кривая 1) и спин-волновой линии передачи (кривая 2), измеренные при входной мощности $P_{\text{in}} = -30$ дБм. *b* — Амплитудные характеристики транзисторного усилителя (кривая 3) и спин-волновой линии передачи (кривая 4), измеренные на частоте $f_r = 3$ ГГц. Здесь же пунктирумыми линиями показаны уровни интегральной мощности на входе транзисторного усилителя и спин-волновой линии передачи, при которых в кольцевом генераторе формируется хаотический СВЧ-сигнал (цвет онлайн)

Fig. 4. *a* — Amplitude-frequency characteristics of the transistor amplifier (curve 1) and the spin-wave transmission line (curve 2), measured for the input power $P_{\text{in}} = -30$ dBm. *b* — Amplitude characteristics of the transistor amplifier (curve 3) and the spin-wave transmission line (curve 4) measured for the frequency $f_r = 3$ GHz. Here, the dotted lines show the integral power levels at the input of the transistor amplifier and the spin-wave transmission line, at that the chaotic MW-signal is formed in the ring generator (color online)

Последние обусловлены развитием трехволновых параметрических процессов распада ПМСВ на коротковолновые спиновые волны, приводящих к хаотизации генерируемого СВЧ-сигнала. Уровень мощности СВЧ-сигнала на входе спин-волновой линии передачи регулируется с помощью переменного аттенюатора.

С выхода объемного резонатора генерируемый СВЧ-сигнал через микрополосковые направленные ответвители поступает на входы анализатора спектра E4408B и осциллографа реального времени Infiniium DSO81004B для анализа и последующей обработки. В эксперименте со спин-волновым кольцевым генератором измеряется огибающая хаотического СВЧ-сигнала с помощью детекторной головки, так как характерные временные масштабы здесь гораздо больше, чем в предыдущей генераторной схеме. В этом случае частота дискретизации сигнала выбирается равной 2 Гс/с, а глубина памяти остается равной 2 млн. точек. Внешний шумовой СВЧ-сигнал подается на вход транзисторного усилителя на частоте $f_n = 2.9$ ГГц через микрополосковый направленный ответвитель.

На рис. 4, *b* пунктирными линиями показаны уровни интегральной мощности на входе транзисторного усилителя $P_{\text{int}}^{\text{TA}} = -25.4$ дБм и спин-волновой линии передачи $P_{\text{int}}^{\text{MSSW}} = +7.1$ дБм, при которых в кольцевом генераторе формируется хаотический СВЧ-сигнал. Видно, что при данных уровнях входной мощности транзисторный усилитель работает в линейном режиме, а спин-волновая линия передачи — в нелинейном режиме, где превышение над нелинейным порогом составляет более 20 дБ.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Вакуумный кольцевой генератор хаоса. Генерация СВЧ-сигнала в исследуемом кольцевом автогенераторе зависит от выполнения амплитудных и фазовых условий. Амплитудные условия заключаются в том, что суммарное усиление (K_{total}) используемых в генераторной схеме активных элементов должно компенсировать общий уровень потерь сигнала на всех элементах схемы (A_{total}), то есть $G = K_{\text{total}} - A_{\text{total}} = 0$, где G — коэффициент усиления кольца. Фазовые условия состоят в том, что суммарный набег фазы на всех элементах кольцевого генератора (ψ_{total}) должен быть кратен 2π , то есть $\psi_{\text{total}} = 2\pi n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ — целое число, характеризующее количество проходов сигнала по кольцу. При $G = 0$ в автоколебательной системе генерируется монохроматический СВЧ-сигнал на частоте доминантной кольцевой моды, соответствующей частоте f_0 . По мере увеличения G (уменьшается уровень ослабления переменного аттенюатора и, как следствие этого, общий уровень потерь A_{total}) наблюдается появление частот автомодуляции и переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода [19].

Внешний шумовой СВЧ-сигнал начинает оказывать заметное влияние на хаотическую динамику автоколебательной системы при мощности $P_n > P_{\text{int}}^{\text{TWT}} = +5$ дБм. Однако режим вынужденной синхронизации хаоса под воздействием шума, приводящий к перемежаемости типа «on-off», наблюдается только при очень больших уровнях мощности шума. На рис. 5 приведены спектры мощности хаотического СВЧ-сигнала и фрагменты временных рядов его огибающей, измеренные в присутствии внешнего шумового СВЧ-сигнала с полосой частот $\Delta f_n = 1$ МГц и повышенных уровнях интегральной мощности P_n . Во всех случаях центральная частота шумового СВЧ-сигнала отстроена от центральной частоты хаотического СВЧ-сигнала на величину, равную 0.2 ГГц. При такой величине частотной отстройки внешний шумовой СВЧ-сигнал находится вне полосы частот хаотического СВЧ-сигнала (спектры мощности обоих сигналов не перекрываются), но в полосе частот ЛБВ-усилителя. Это дает возможность внешнему сигналу воздействовать на режим работы ЛБВ-усилителя, а пролетному клистрону затем отфильтровывать данный сигнал. Необходимо отметить, что частотное разделение хаотического и шумового СВЧ-сигналов оказывается возможным только при наличии в автогенераторе широкополосного усилителя и является необходимым условием для диагностирования явления когерентного резонанса в режиме динамического хаоса.

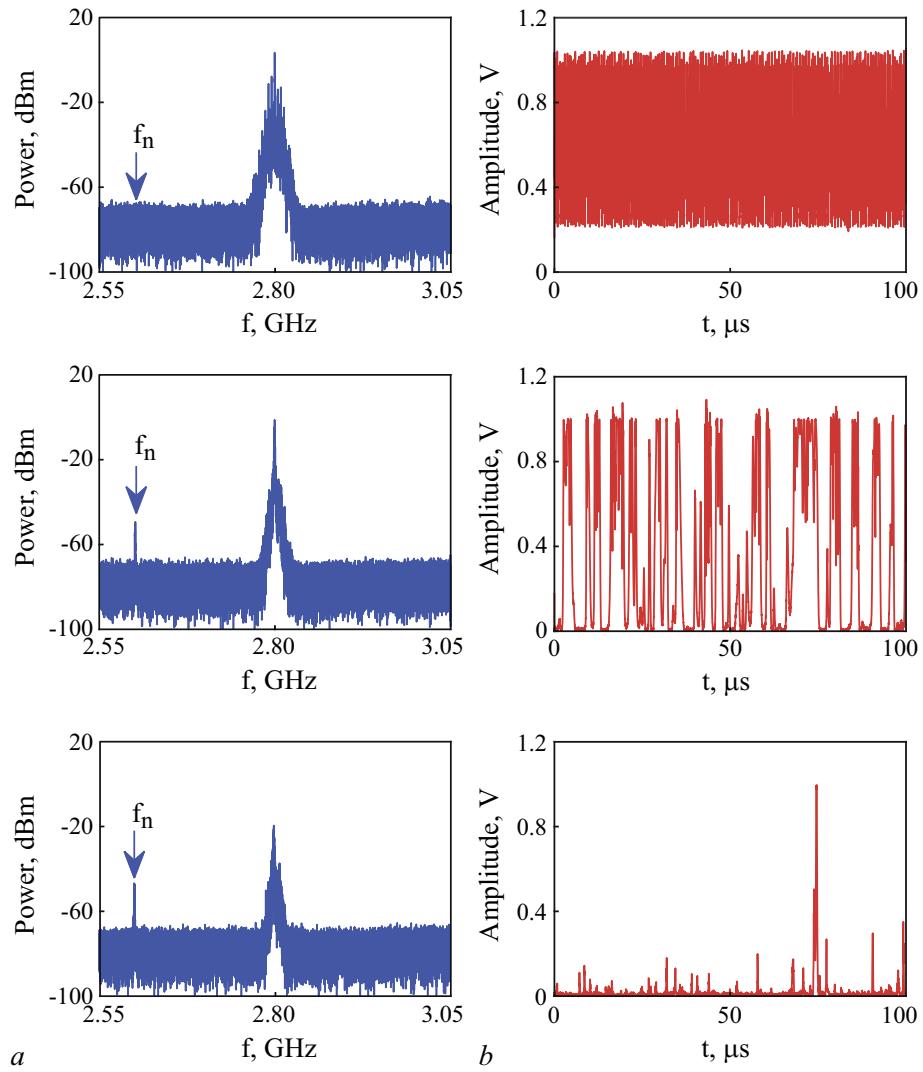


Рис. 5. *a* — Спектры мощности хаотического СВЧ-сигнала и *b* — временные ряды огибающей хаотического СВЧ-сигнала, измеренные в модифицированной схеме шумотрона под воздействием внешнего шумового СВЧ-сигнала с центральной частотой $f_n = 2.6$ ГГц, полосой частот $\Delta f_n = 1$ МГц и различным уровнем мощности P_n : +24.2 дБм (верхний ряд), +27.6 дБм (средний ряд) и +31.6 дБм (нижний ряд) (цвет онлайн)

Fig. 5. *a* — Power spectra of the chaotic MW signal and *b* — time series of the chaotic MW signal envelope measured in the modified noisetron scheme under the external noise MW signal influence with the central frequency $f_n = 2.6$ GHz, the frequency band $\Delta f_n = 1$ MHz and different power levels P_n : +24.2 dBm (upper row), +27.6 dBm (middle row) and +31.6 dBm (lower row) (color online)

Как следует из представленных на рис. 5 результатов, при уровне мощности $P_n = +24.2$ дБм (верхний ряд) шумовое воздействие не приводит еще к заметному подавлению хаотического СВЧ-сигнала. Спектр мощности хаотического СВЧ-сигнала характеризуется центральной частотой $f_{ch} = 2.8$ ГГц и шириной полосы частот $\Delta f_{ch} = 9.5$ МГц, измеренной по уровню -3 дБ относительно максимального значения спектральной мощности. С увеличением уровня мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала до $P_n = +27.6$ дБм (см. средний ряд на рис. 5) возникает случайное чередование двух состояний системы, в одном из которых наблюдается полное подавление хаотической динамики (режим вынужденной синхронизации хаоса), а в другом — генерация хаотического сигнала (режим отсутствия вынужденной синхронизации хаоса). При этом оба состояния имеют приблизительно одинаковые характерные длительности. С технической точки

зрения такое поведение системы обусловлено модуляцией коэффициента усиления ЛБВ шумом. На тех временных интервалах, где мгновенные значения амплитуды шума соответствуют режиму линейного усиления ЛБВ, хаотический СВЧ-сигнал не подавляется, а на временных интервалах, где мгновенные значения амплитуды шума уже не соответствуют режиму линейного усиления ЛБВ, хаотический СВЧ-сигнал испытывает подавление. При дальнейшем увеличении уровня мощности шумового СВЧ-сигнала до $P_n = +31.6$ дБм (см. нижний ряд на рис. 5) характерная длительность подавленных (синхронных) состояний возрастает, а характерная длительность состояний с хаотической динамикой (несинхронных состояний), наоборот, уменьшается.

Наличие состояний с развитой (несинхронной) и подавленной (синхронной) хаотической динамикой характерно для перемежаемости типа «on-off». В то же самое время зависимости характерных времен обоих состояний от интенсивности шума напоминают аналогичные зависимости характерных времен (времени активации и времени возвращения в невозбужденное состояние) от интенсивности шума в возбудимых шумом системах [2]. Тогда временные интервалы, соответствующие синхронным состояниям, мы будем условно трактовать как участки ламинарной фазы, а временные интервалы, соответствующие несинхронным состояниям, — как участки хаотической фазы. Наличие «on-off» перемежаемости в исследуемом нами вакуумном генераторе хаоса, находящемся под внешним шумовым воздействием, подтверждается результатами расчета ее статистических характеристик, приведенных на рис. 6.

На рис. 6 представлены результаты расчета распределений N длительностей ламинарных фаз τ и зависимостей средней длительности ламинарных фаз $\langle \tau \rangle$ от параметра надкритичности $P_{\text{crit}} - P_n$. Данные статистические характеристики рассчитаны как на основе экспериментальных временных рядов, так и на основе аналитических выражений, характерных для перемежаемости типа «on-off». Уровень мощности шумового СВЧ-сигнала, соответствующий значению P_{crit} , определялся по 10-процентному отклонению времени автокоррекции огибающей хаотического СВЧ-сигнала от ее значения, полученного в автономном режиме. Как следует из результатов, представленных на рис. 6, измеренные и аналитически рассчитанные статистические характеристики хорошо согласуются между собой. Это свидетельствует о том, что в модифицированной схеме

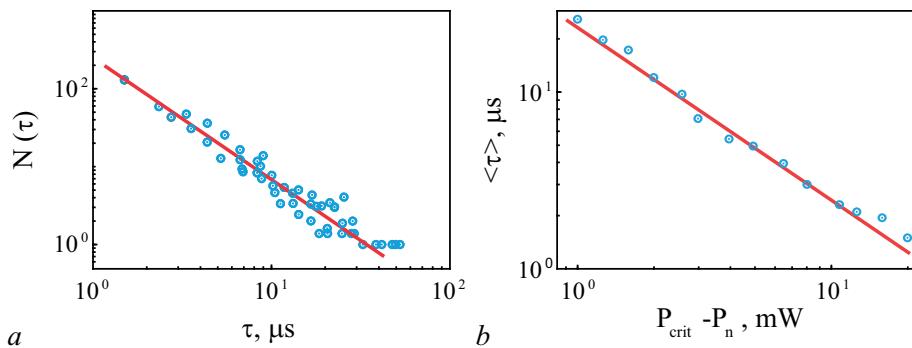


Рис. 6. Статистические характеристики «on-off» перемежаемости, полученные на модифицированной схеме шумотрона для $\Delta f_n = 1$ МГц: *a* — распределение длительностей ламинарных фаз и *b* — зависимость средней длительности ламинарных фаз от параметра надкритичности. Синие кружки соответствуют значениям длительностей ламинарных фаз, полученным по экспериментальным временным рядам. Сплошные линии соответствуют аналитическим результатам, полученным на основе следующих аналитических выражений: *a* — $N \sim \tau^{-3/2}$ и *b* — $\langle \tau \rangle \sim (P_{\text{crit}} - P_n)^{-1}$ (цвет онлайн)

Fig. 6. Statistical characteristics of the “on-off” intermittency obtained from the modified noisetron scheme for $\Delta f_n=1$ МГц: *a* — distribution of the laminar phase durations, *b* — dependence of the average duration of the laminar phases on the supercriticality parameter. Blue circles correspond to the values of laminar phase durations obtained from the experimental time series. Solid lines correspond to the analytical results obtained from the following analytical expressions: *a* — $N \sim \tau^{-3/2}$ and *b* — $\langle \tau \rangle \sim (P_{\text{crit}} - P_n)^{-1}$ (color online)

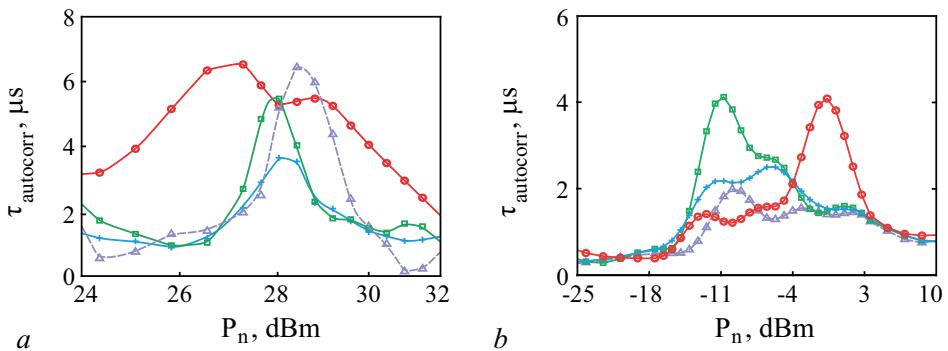


Рис. 7. Зависимости времени автокорреляции огибающей хаотического СВЧ-сигнала от мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала, полученные на двух схемах микроволновых одномодовых кольцевых генераторов хаоса: *a* — модифицированная схема шумотрона, *b* — спин-волновой генератор хаоса. Результаты получены для разных значений полосы частот шумового СВЧ-сигнала Δf_n : 1 МГц (красные кружки), 10 МГц (голубые крестики), 15 МГц (фиолетовые треугольники) и 30 МГц (зеленые квадратики) (цвет онлайн)

Fig. 7. Dependences of the autocorrelation time of the chaotic MW signal envelope on the external noise MW signal power obtained for two MW single-mode ring chaos generator schemes: *a* — modified noisotron scheme and *b* — spin-wave chaos generator. The results were obtained for different values of the noise MW signal bandwidth Δf_n : 1 MHz (red circles), 10 MHz (blue crosses), 15 MHz (purple triangles) and 30 MHz (green squares) (color online)

шумотрона наблюдается перемежаемость типа «on-off» под воздействием внешнего шумового СВЧ-сигнала.

На рис. 7, *a* приведены зависимости времени автокорреляции огибающей хаотического СВЧ-сигнала τ_{autocorr} от мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала P_n , построенные для нескольких значений полосы частот шума Δf_n . Видно, что все зависимости имеют ярко выраженный максимум времени автокорреляции $\tau_{\text{autocorr}}^{\max}$, который наблюдается при определенной мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала $P_{n,\text{opt}}$. Так, среди зависимостей, полученных на модифицированной схеме шумотрона, наибольшее значение $\tau_{\text{autocorr}}^{\max} = 6.53$ мкс регистрируется при наименьшей полосе шума $\Delta f_n = 1$ МГц. Значение $\tau_{\text{autocorr}}^{\max} = 3.61$ мкс является минимальным при $\Delta f_n = 10$ МГц (уменьшается практически в два раза по сравнению с предыдущим случаем) и вновь начинает возрастать при дальнейшем увеличении полосы Δf_n . При этом уровень $P_{n,\text{opt}}$ остается практически постоянным (меняется на величину ~ 1 дБ).

Наличие на всех зависимостях максимума времени автокорреляции при определенной интенсивности шума свидетельствует о том, что огибающая хаотического СВЧ-сигнала становится более регулярной при определенном уровне мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала, и в хаотической автоколебательной системе наблюдается когерентный резонанс. Однако в отличие от классического явления когерентного резонанса, наблюдаемого в возбудимых шумом системах [1–3], у огибающей генерируемого СВЧ-сигнала в нашем случае нет четкой периодичности при оптимальной мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала (см. рис. 5, *b*). Огибающая СВЧ-сигнала в модифицированной схеме шумотрона остается хаотической при всех интенсивностях внешнего шумового воздействия. Таким образом, в исследуемом нами одномодовом вакуумном СВЧ-генераторе хаоса явление когерентного резонанса диагностируется в режиме генерации только хаотического СВЧ-сигнала и обусловлено, по всей видимости, частичной синхронизацией его спектральных компонент.

2.2. Спин-волновой кольцевой генератор хаоса. В спин-волновом кольцевом генераторе хаоса с ЗОС для генерации СВЧ-сигнала также необходимо выполнение амплитудных и фазовых условий. При $G = 0$ генерация монохроматического СВЧ-сигнала возникает на частоте доминантной кольцевой моды, соответствующей частоте f_r . С увеличением G и при малом превышении

нелинейного порога здесь также появляются частоты автомодуляции, но не за счет падающего участка, а за счет параметрического возбуждения коротковолновых спиновых волн поверхности МСВ (параметрический трехволновый процесс распада). Параметрически возбуждаемые спиновые волны модулируют сигнал на частоте ПМСВ как по амплитуде, так и по фазе [26]. Частоты автомодуляции в этом случае имеют значения порядка нескольких сотен килогерц [15]. Переход к хаосу в одномодовом спин-волновом генераторе с ЗОС, работающем в условиях нелинейного трехволнового параметрического распада, тоже происходит через последовательность бифуркаций удвоения периода, по сценарию Фейгенбаума [27].

На рис. 8 представлены результаты, демонстрирующие влияние внешнего шумового СВЧ-сигнала с ограниченной полосой частот на хаотическую динамику одномодового спин-волнового

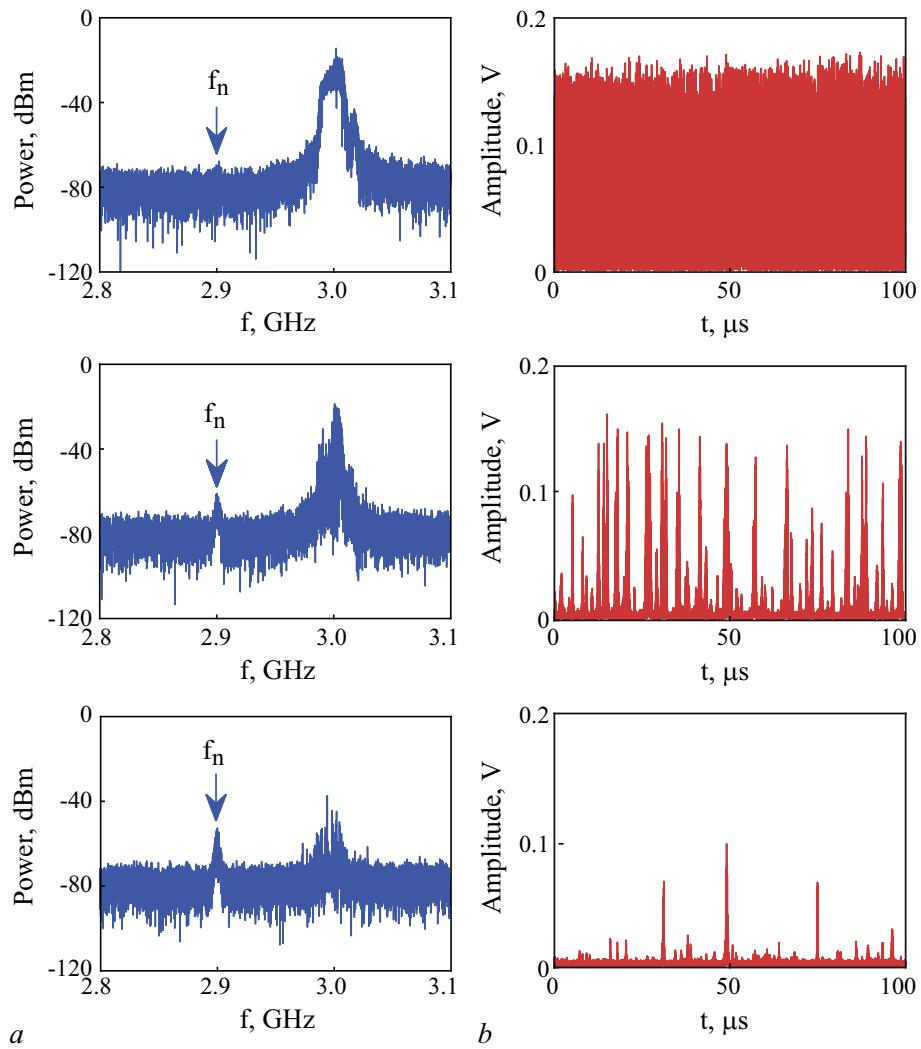


Рис. 8. *a* — Спектры мощности хаотического СВЧ-сигнала и *b* — временные ряды огибающей хаотического СВЧ-сигнала, измеренные в спин-волновом генераторе хаоса под воздействием внешнего шумового СВЧ-сигнала с центральной частотой $f_n = 2.9$ ГГц, полосой частот $\Delta f_n = 1$ МГц и различным уровнем мощности P_n : -25 дБм (верхний ряд), -1.4 дБм (средний ряд) и $+8.9$ дБм (нижний ряд) (цвет онлайн)

Fig. 8. *a* — Power spectra of the chaotic MW signal and *b* — time series of the chaotic MW signal envelope measured in the spin-wave chaos generator under the external noise MW signal influence with the central frequency $f_n = 2.9$ GHz, the frequency band $\Delta f_n = 1$ MHz and different power levels P_n : -25 dBm (upper row), -1.4 dBm (middle row) and $+8.9$ dBm (lower row) (color online)

генератора с ЗОС. В эксперименте центральная частота шумового СВЧ-сигнала отстроена от центральной частоты хаотического СВЧ-сигнала на величину, равную 0.1 ГГц. При такой отстройке внешний шумовой СВЧ-сигнал с полосой частот $\Delta f_n = 1$ МГц находится вне полосы частот хаотического СВЧ-сигнала ($\Delta f_{ch} = 11.3$ МГц по уровню -3 дБ), но в полосе частот транзисторного усилителя. Это дает возможность внешнему шуму воздействовать на режим работы транзисторного усилителя, а объемному резонатору затем отфильтровывать такой сигнал.

Из представленных на рис. 8 результатов следует, при уровне мощности $P_n = -25$ дБм (верхний ряд) внешний шумовой СВЧ-сигнал не оказывает заметного влияния на хаотический СВЧ-сигнал, спектральные и временные характеристики которого соответствуют аналогичным характеристикам, полученным в автономном режиме генерации. При $P_n = -1.4$ дБм (см. средний ряд на рис. 8) наблюдается случайное чередование состояний с подавленной (синхронной) и неподавленной (несинхронной) хаотической динамикой, имеющих приблизительно одинаковые характеристические длительности. В этом случае, как и в случае с вакуумным генератором хаоса, наблюдается вынужденная синхронизация хаоса под внешним шумовым воздействием, которая должна приводить к «on-off» перемежаемости. В техническом плане такое поведение автоколебательной системы можно объяснить тем, что внешний шумовой СВЧ-сигнал начинает модулировать коэффициент усиления транзисторного усилителя по случайному закону, заставляя его работать то в линейном, то в нелинейном режимах. Однако в отличие от ЛБВ-усилителя этот процесс наблюдается при гораздо меньших уровнях мощности. При дальнейшем увеличении уровня мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала до $P_n = +8.9$ дБм (см. нижний ряд на рис. 8) характеристическая длительность подавленных (синхронных) состояний здесь также возрастает, а характеристическая длительность состояний с хаотической динамикой (несинхронных состояний) здесь также уменьшается.

На рис. 9 представлены результаты расчета распределений N длительностей ламинарных фаз τ и зависимостей средней длительности ламинарных фаз $\langle \tau \rangle$ от параметра надкритичности $P_{crit} - P_n$. Данные статистические характеристики рассчитаны как на основе экспериментальных временных рядов, так и на основе аналитических выражений, характерных для «on-off»

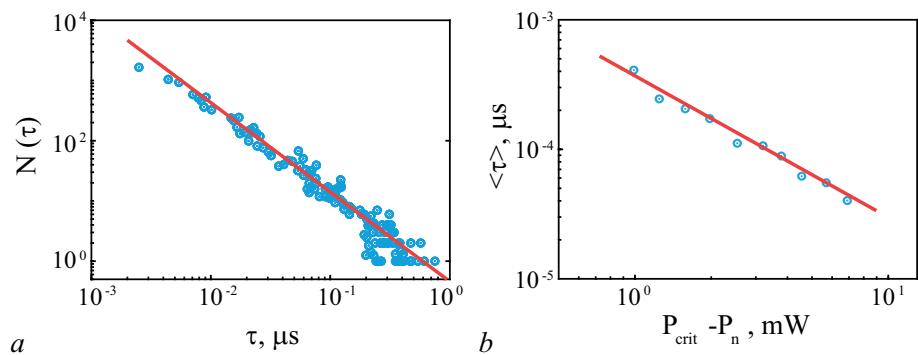


Рис. 9. Статистические характеристики «on-off» перемежаемости, полученные на схеме спин-волнового генератора хаоса для $\Delta f_n = 1$ МГц: *a* — распределение длительностей ламинарных фаз и *b* — зависимость средней длительности ламинарных фаз от параметра надкритичности. Синие кружки соответствуют значениям длительностей ламинарных фаз, полученным на основе экспериментальных временных рядов. Сплошные линии соответствуют аналитическим результатам, полученным на основе следующих аналитических выражений: *a* — $N \sim \tau^{-3/2}$ и *b* — $\langle \tau \rangle \sim (P_{crit} - P_n)^{-1}$ (цвет онлайн)

Fig. 9. Statistical characteristics of the “on-off” intermittency obtained from the spin-wave chaos generator scheme for $\Delta f_n = 1$ MHz: *a* — distribution of the laminar phase durations, *b* — dependence of the average duration of the laminar phases on the supercriticality parameter. Blue circles correspond to the values of laminar phase durations obtained from the experimental time series. Solid lines correspond to the analytical results obtained from the following analytical expressions: *a* — $N \sim \tau^{-3/2}$ and *b* — $\langle \tau \rangle \sim (P_{crit} - P_n)^{-1}$ (color online)

перемежаемости. Как следует из результатов, представленных на рис. 9, измеренные и аналитически рассчитанные статистические характеристики хорошо согласуются между собой. Это свидетельствует о том, что использование метода временной фильтрации хаотического СВЧ-сигнала внешним шумовым СВЧ-сигналов в спин-волновом генераторе также позволяет реализовать режим «on-off» перемежаемости. В связи с этим здесь следует ожидать и явления когерентного резонанса.

На рис. 7, b приведены зависимости времени автокорреляции огибающей хаотического СВЧ-сигнала τ_{autocorr} от мощности внешнего шумового СВЧ-сигнала P_n , полученные на схеме спин-волнового генератора хаоса для нескольких значений полосы частот шума Δf_n . Как и в случае модифицированной схемы шумотрона, все зависимости имеют ярко выраженный максимум времени автокорреляции $\tau_{\text{autocorr}}^{\max}$, который наблюдается при определенной мощности шумового СВЧ-сигнала $P_{n,\text{opt}}$. Здесь также наибольшее значение $\tau_{\text{autocorr}}^{\max} = 4.1$ мкс регистрируется при наименьшей полосе шума $\Delta f_n = 1$ МГц, а наименьшее значение у $\tau_{\text{autocorr}}^{\max} = 2$ мкс (оно уменьшается более чем в два раза) наблюдается при $\Delta f_n = 15$ МГц, что не сильно отличается от значения полосы шума $\Delta f_n = 10$ МГц, полученной на модифицированной схеме шумотрона. При дальнейшем увеличении полосы шума до $\Delta f_n = 30$ МГц значение $\tau_{\text{autocorr}}^{\max}$ сравнивается по величине с аналогичным значением, полученным при $\Delta f_n = 1$ МГц. В отличие от модифицированной схемы шумотрона, значение $P_{n,\text{opt}}$ в схеме спин-волнового генератора хаоса претерпевает существенные изменения с увеличением полосы частот внешнего шумового СВЧ-сигнала. Оно уменьшается на величину ~ 10 дБ с увеличением значения Δf_n в 30 раз. Таким образом, в спин-волновом генераторе хаоса, находящемся под воздействием внешнего шумового СВЧ-сигнала с ограниченной полосой частот, явление когерентного резонанса также диагностируется в режиме генерации хаотического СВЧ-сигнала.

Необходимо отметить, что в обеих генераторных схемах минимальное значение у $\tau_{\text{autocorr}}^{\max}$ наблюдается приблизительно при одинаковом значении ширины полосы частот внешнего шумового СВЧ-сигнала $\Delta f_n = 10\ldots15$ МГц. По всей видимости, это связано с тем, что данные значения полосы частот шумового СВЧ-сигнала становятся сравнимыми со значениями ширины полосы частот хаотического СВЧ-сигнала ($\Delta f_n \sim \Delta f_{ch}$), генерируемого в обеих генераторных схемах. Приблизительно одинаковые характерные временные масштабы («квазипериоды» огибающей) у обоих сигналов не позволяют получать более регулярные переключения между режимами полного подавления хаоса и его генерации, как в двух других случаях, когда $\Delta f_n < \Delta f_{ch}$ и $\Delta f_n > \Delta f_{ch}$.

Заключение

Полученные в работе экспериментальные результаты демонстрируют возможность наблюдения явления когерентного резонанса в подавляемых шумом микроволновых одномодовых генераторах хаоса с ЗОС, работающих в СВЧ-диапазоне. Это стало возможным благодаря использованию метода временной фильтрации хаотического СВЧ-сигнала внешним шумовым СВЧ-сигналом с ограниченной полосой частот. Метод базируется на эффекте вынужденной синхронизации хаоса под внешним шумовым воздействием и позволяет реализовать режим «on-off» перемежаемости, в котором по аналогии с двумя связанными хаотическими осцилляторами [8] диагностируется когерентный резонанс. Предложенный метод может быть использован для наблюдения когерентного резонанса и в многомодовых (широкополосных) генераторах хаоса [24]. Последнее может представлять определенный интерес для систем широкополосной связи и шумовой локации [28, 29]. Помимо этого, разработанный метод временной фильтрации хаотического сигнала может найти применение и в нейроморфных вычислительных системах, в основе работы которых лежит концепция «вычисления на краю хаоса» [30].

Список литературы

1. *Hu G., Ditzinger T., Ning C. Z., Haken H.* Stochastic resonance without external periodic force // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71, no. 6. P. 807–810. DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.807.
2. *Pikovsky A., Kurths J.* Coherence resonance in a noise-driven excitable system // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78, no. 5. P. 775–778. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.775.
3. *Lindner B., Garcia-Ojalvo J., Neiman A. B., Schimansky-Geier L.* Effects of noise in excitable systems // Phys. Rep. 2004. Vol. 392, iss. 6. P. 321–424. DOI: 10.1016/j.physrep.2003.10.015.
4. *Han S. K., Yim T. G., Postnov D. E., Sosnovtseva O. V.* Interacting coherence resonance oscillators // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83, no. 9. P. 1771–1774. DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.1771.
5. *Giacomelli G., Giudici M., Balle S., Tredicce J. R.* Experimental evidence of coherence resonance in an optical system // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84, no. 15. P. 3298–3301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.3298.
6. *Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Садовников С. А., Скороходов В. Н., Степанов А. О.* Когерентный резонанс в клистронном автогенераторе на пороге самовозбуждения // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 22. С. 86–94.
7. *Palenzuela C., Toral R., Mirasso C. R., Calvo O., Gunton J. D.* Coherence resonance in chaotic systems // Europhys. Lett. 2001. Vol. 56, no. 3. P. 347–353. DOI: 10.1209/epl/i2001-00526-5.
8. *Liu Z., Lai Y.-C.* Coherence resonance in coupled chaotic oscillators // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, no. 21. P. 4737–4740. DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.4737.
9. *Calvo O., Mirasso C. R., Toral R.* Coherence resonance in chaotic electronic circuits // Electron. Lett. 2001. Vol. 37, no. 17. P. 1062–1063. DOI: 10.1049/el:20010735.
10. *Calvo O., Gomes I., Mirasso C. R., Toral R.* Experimental observation of coherence and stochastic resonances in an electronic Chua circuit // AIP Conf. Proc. 2002. Vol. 622, no. 1. P. 427–432. DOI: 10.1063/1.1487561.
11. *Ланда П. С.* Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука, 1980. 359 с.
12. *Неймарк Ю. И., Ланда П. С.* Стохастические и хаотические колебания. Изд. 2-е, доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 424 с.
13. *Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S., Booske J., Sengelle S., Ryskin N., Titov V.* Generation of chaotic radiation in a driven traveling wave tube amplifier with time-delayed feedback // Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13, no. 1. P. 013104. DOI: 10.1063/1.2161170.
14. *Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Скороходов В. Н., Геншафт А. М.* Синхронизация хаотических колебаний путем подавления хаоса в клистронном автогенераторе внешним гармоническим сигналом // Известия вузов. ПНД. 2007. Т. 15, № 3. С. 52–57. DOI: 10.18500/0869-6632-2007-15-3-52-57.
15. *Гришин С. В., Гришин В. С., Храмов А. Е., Шараевский Ю. П.* Генерация широкополосного хаотического сигнала в автоколебательной системе с нелинейной линией передачи на магнитостатических волнах // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 5. С. 89–98.
16. *Кислов В. Я., Мясин Е. А., Богданов Е. В.* Способ генерации электромагнитных шумовых колебаний // А.с. № 1125735 (СССР). 1984. Бюл. № 43.
17. *Анисимова Ю. В., Воронцов Г. М., Залогин Н. Н., Кислов В. Я., Мясин Е. А.* Шумotron // Радиотехника. 2000. № 2. С. 19–25.
18. *Блиох Ю. П., Любарский М. Г., Подобинский В. О., Файнберг Я. Б.* Исследование механизмов стохастизации секционированных пучковых СВЧ-генераторов // Физика плазмы. 1994. Т. 20, № 7–8. С. 718–728.
19. *Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Клокотов Д. В., Рыскин Н. М.* Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2003. Т. 73, № 7. С. 105–110.

20. *Wu M.* Nonlinear spin waves in magnetic film feedback rings // Solid State Phys. 2010. Vol. 62. P. 163–224. DOI: 10.1016/B978-0-12-374293-3.00003-1.
21. *Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Скороходов В. Н.* Способ генерации хаотических радиоимпульсов большой мощности для прямохаотических систем связи // Патент на изобретение № 2349027 С1 РФ, МПК H03K 3/84: заявл. 25.07.2007: опубл. 10.03.2009. 7 с.
22. *Гришин С. В., Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Манышев Р. А., Скороходов В. Н.* Генерация хаотических СВЧ импульсов в широкополосных спин-волновых и вакуумных генераторах хаоса под внешним периодическим воздействием // Известия вузов. ПНД. 2012. Т. 20, № 5. С. 137–155. DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-5-137-155.
23. *Grishin S. V., Moskalenko O. I., Pavlov A. N., Romanenko D. V., Sadovnikov A. V., Sharaevskii Yu. P., Sysoev I. V., Medvedeva T. M., Seleznev E. P., Nikitov S. A.* Space-quasiperiodic and time-chaotic parametric patterns in a magnonic quasicrystal active ring resonator // Phys. Rev. Appl. 2021. Vol. 16, no. 5. P. 054029. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.054029.
24. *Гришин С. В., Никитов С. А., Романенко Д. В., Худоложкин В. О., Шараевский Ю. П.* Генерация одиночных хаотических импульсов в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой под внешним шумовым воздействием // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, № 7. С. 9–18.
25. *Гришин С. В., Скороходов В. Н.* Генерация темных импульсов огибающей в модифицированной схеме шумотрона // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49, № 18. С. 37–41. DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56176.19516.
26. *Демидов В. Е., Ковшиков Н. Г.* Стохастическая генерация при параметрическом возбуждении спиновых волн в пленках железоиттриевого граната // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, № 7. С. 66–72.
27. *Демидов В. Е., Ковшиков Н. Г.* Некоторые особенности перехода к хаосу при автомодуляции поверхностных спиновых волн // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66, № 4. С. 243–246.
28. *Дмитриев А. С., Панас А. И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
29. *Залогин Н. Н., Кислов В. В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. 205 с.
30. *Legenstein R., Maass W.* Edge of chaos and prediction of computational performance for neural circuit models // Neural Netw. 2007. Vol. 20, no. 3. P. 323–334. DOI: 10.1016/j.neunet.2007.04.017.

References

1. *Hu G, Ditzinger T, Ning CZ, Haken H.* Stochastic resonance without external periodic force. Phys. Rev. Lett. 1993;71(6):807–810. DOI: 10.1103/PhysRevLett.71.807.
2. *Pikovsky A, Kurths J.* Coherence resonance in a noise-driven excitable system. Phys. Rev. Lett. 1997;78(5):775–778. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.775.
3. *Lindner B, García-Ojalvo J, Neiman AB, Schimansky-Geier L.* Effects of noise in excitable systems. Phys. Rep. 2004;392:321–424. DOI: 10.1016/j.physrep.2003.10.015.
4. *Han SK, Yim TG, Postnov DE, Sosnovtseva OV.* Interacting coherence resonance oscillators. Phys. Rev. Lett. 1999;83(9):1771–1774. DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.1771.
5. *Giacomelli G, Giudici M, Balle S, Tredicce JR.* Experimental evidence of coherence resonance in an optical system. Phys. Rev. Lett. 2000;84(15):3298–3301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.3298.
6. *Dmitriev BS, Zharkov YD, Sadovnikov SA, Skorokhodov VN, Stepanov AO.* Coherent resonance in klystron oscillator at self-excitation threshold. Tech. Phys. Lett. 2011;37(11):1082–1085. DOI: 10.1134/S1063785011110216.

7. Palenzuela C, Toral R, Mirasso CR, Calvo O, Gunton JD. Coherence resonance in chaotic systems. *Europhys. Lett.* 2001;56(3):347–353. DOI: 10.1209/epl/i2001-00526-5.
8. Liu Z, Lai Y-C. Coherence resonance in coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.* 2001;86(21): 4737–4740. DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.4737.
9. Calvo O, Mirasso CR, Toral R. Coherence resonance in chaotic electronic circuits. *Electron. Lett.* 2001;37(17):1062–1063. DOI: 10.1049/el:20010735.
10. Calvo O, Gomes I, Mirasso CR, Toral R. Experimental observation of coherence and stochastic resonances in an electronic Chua circuit. *AIP Conf. Proc.* 2002;622(1):427–432. DOI: 10.1063/1.1487561.
11. Landa PS. Auto-Oscillations in the Systems with a Finite Number of Freedom Degrees. M.: Nauka; 1980. 359 p. (in Russian).
12. Neymark Yul., Landa PS. Stochastic and Chaotic Oscillations. 2nd Ed., suppl. M.: Book House “LIBROKOM”; 2009. 424 p. (in Russian).
13. Marchewka C, Larsen P, Bhattacharjee S, Booske J, Sengele S, Ryskin N, Titov V. Generation of chaotic radiation in a driven traveling wave tube amplifier with time-delayed feedback. *Phys. Plasmas.* 2006;13(1):013104. DOI: 10.1063/1.2161170.
14. Dmitriev BS, Zharkov YuD, Skorokhodov VN, Genshaft AM. Synchronization of chaotic oscillation by the way of chaos suppression in klystron active oscillator by external harmonic signal. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2007;15(3):52–57 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2007-15-3-52-57.
15. Grishin SV, Grishin VS, Hramov AE, Sharaevskii YuP. Wideband chaotic oscillation in a self-oscillatory system with a nonlinear transmission line on magnetostatic waves. *Tech. Phys.* 2008;53(5):620–628. DOI: 10.1134/S1063784208050150.
16. Kislov VYa, Myasin EA, Bogdanov EV. Method of generation of electromagnetic noise oscillations. A.s. No. 1125735 (USSR). 1984;43 (in Russian).
17. Anisimova YuV, Vorontsov GM, Zalogin NN, Kislov VYa, Myasin EA. Noisetron. *Radiotekhnika.* 2000;2:19–25 (in Russian).
18. Bliokh JP, Lubarsky MG, Podobinsky VO, Feinberg JB. Investigation of stochasticization mechanisms of sectionalized microwave beam generators. *Physics of Plasma.* 1994;20(7,8): 718–728 (in Russian).
19. Dmitriev BS, Zharkov YD, Klokofov DV, Ryskin NM. Experimental study of complex dynamics in a delayed-feedback multiple-cavity klystron self-oscillator. *Tech. Phys.* 2003;48(7):901–905. DOI: 10.1134/1.1593198.
20. Wu M. Nonlinear spin waves in magnetic film feedback rings. *Solid State Phys.* 2010;62:163–224. DOI: 10.1016/B978-0-12-374293-3.00003-1.
21. Dmitriev BS, Zharkov YuD, Skorokhodov VN. Method of chaotic radio-frequency pulses of major power generation for direct-random communication systems. Patent for invention No. 2349027 Russian Federation, IPC H03K 3/84: appl. 25.07.2007: publ. 10.03.2009. 7 p. (in Russian).
22. Grishin SV, Dmitriev BS, Zharkov YuD, Manyshev RA, Skorokhodov VN. Chaotic microwave pulse generation in wideband spin-wave and vacuum oscillators of chaos under external periodical influence. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2012;20(5):137–155. DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-5-137-155.
23. Grishin SV, Moskalenko OI, Pavlov AN, Romanenko DV, Sadovnikov AV, Sharaevskii YuP, Sysoev IV, Medvedeva TM, Seleznev EP, Nikitov SA. Space-quasiperiodic and time-chaotic parametric patterns in a magnonic quasicrystal active ring resonator. *Phys. Rev. Appl.* 2021;16(5): 054029. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.054029.
24. Grishin SV, Nikitov SA, Romanenko DV, Khudolozhkin VO, Sharaevskii YuP. Generation of single

- chaotic microwave pulses in a self-oscillating ring system with ferromagnetic film under the action of external noise. *Tech. Phys. Lett.* 2013;39(4):321–324. DOI: 10.1134/S1063785013040056.
25. Grishin SV, Skorokhodov VN. Generation of dark envelope pulses in a modified noisetron scheme. *Tech. Phys. Lett.* 2023;49(9):75–78. DOI: 10.61011/TPL.2023.09.56716.19516.
 26. Demidov VE, Kovshikov NG. Stochastic generation accompanying parametric excitation of spin waves in yttrium iron garnet films. *Tech. Phys. Lett.* 1998;24(4):274–276. DOI: 10.1134/1.1262081.
 27. Demidov VE, Kovshikov NG. Some special features of the transition to chaos in the self-modulation of surface spin waves. *JETP Lett.* 1997;66(4):261–265. DOI: 10.1134/1.567464.
 28. Dmitriev AS, Panas AI. *Dynamic Chaos: New Information Carriers for Communication Systems.* M.: Fizmatlit; 2002. 252 p. (in Russian).
 29. Zalomin NN, Kislov VV. *Broadband Chaotic Signals in Radio Engineering and Information systems.* M.: Radio Engineering; 2006. 205 p. (in Russian).
 30. Legenstein R, Maass W. Edge of chaos and prediction of computational performance for neural circuit models. *Neural Netw.* 2007;20(3):323–334. DOI: 10.1016/j.neunet.2007.04.017.



Комков Павел Сергеевич — родился в Саратовской области (2001). Окончил бакалавриат по направлению «Радиофизика» Института физики Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (2023). На данный момент обучается в магистратуре по направлению «Радиофизика» и работает в АО «НПП «Алмаз». Имеет одну научную публикацию.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский
 государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: k-pavlik-k@mail.ru
 ORCID: 0009-0002-5988-5352



Пыхтунов Дмитрий Сергеевич — родился в Энгельсе (1993). Обучался в бакалавриате по направлению «Радиофизика» факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (2013). Окончил магистратуру по направлению «Радиофизика» Института физики Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (2024). На данный момент работает в АО «НПП «Алмаз».

Россия, 410033 Саратов, ул. им. Панфилова И. В., зд. 1А, стр. 1
 АО «НПП «Алмаз»
 E-mail: dmitry.pyxtnunoff@yandex.ru



Романенко Дмитрий Владимирович — родился в Саратове (1988). Окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2010). В настоящее время является старшим преподавателем кафедры нелинейной физики Института физики СГУ. Автор более 30 статей в центральных реферируемых отечественных и зарубежных научных журналах, руководитель и исполнитель ряда научных проектов, выполнявшихся при поддержке ФЦП, РФФИ, РНФ. Основные области научных интересов: волновая динамика в ферромагнитных структурах, нелинейные явления в спин-волновой электронике.

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
 Саратовский национальный исследовательский
 государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
 E-mail: dmitrii.romanenk@mail.ru
 ORCID: 0000-0003-1872-6697
 AuthorID (eLibrary.Ru): 681088



Скороходов 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 20 статей в отечественных и зарубежных журналах.

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



Гришин Сергей Валерьевич — родился в 1974 году. Окончил физический факультет СГУ имени Н. Г. Чернышевского (1997). Кандидат физико-математических наук (СГУ, 2006). Заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн Института физики СГУ. Область научных интересов — нелинейные явления в автоколебательных системах вакуумной и магнито-электронике, генераторы ультракоротких импульсов, метаматериалы на основе гиротропных сред. Автор более 50 научных статей, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах, четырех патентов на изобретение и двух патентов на полезную модель. Один из авторов коллективной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот».

Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: sergrsh@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-3654-3299
AuthorID (eLibrary.Ru): 42293