

Когерентный резонанс в микроволновом вакуумном генераторе хаоса – «шумотроне»

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

¹СГУ им. Н.Г. Чернышевского

²АО «НПП «Алмаз»

Аннотация: в работе приводятся экспериментальные результаты, демонстрирующие явление когерентного резонанса в микроволновом вакуумном генераторе хаоса, находящемся под воздействием внешнего шумового сигнала с ограниченным спектром. Микроволновый вакуумный генератор хаоса собран по схеме «шумотрона» и состоит из двух ламп бегущей волны (ЛБВ), соединённых цепью обратной связи с запаздыванием. Одна из ЛБВ работает в линейном режиме, а другая - в режиме насыщения выходной мощности и фазовой нелинейности. Показано, что в шумотроне явление когерентного резонанса наблюдается в режиме «on-off» перемежаемости, для которого рассчитаны распределения длительностей условных ламинарных фаз и зависимости средних длительностей условных ламинарных фаз от параметра надкритичности. Установлено, что при увеличении мощности шумового сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала на зависимость времени автокорреляции хаотического СВЧ от интенсивности шумового воздействия появляется максимум и величина максимума уменьшается с увеличением ширины полосы частот шума.

Ключевые слова: шумотрон, динамический хаос, когерентный резонанс

1. Введение

Известно, что в возбудимых шумом системах наблюдается фундаментальное нелинейное явление, получившее название когерентного резонанса [1]. 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 степени когерентности (регулярности) колебаний от интенсивности шума является резонансной, а спектральная линия, отвечающая этим колебаниям, является наиболее узкой. К возбудимым шумом системам относятся осциллятор ФицХью-Нагумо [2], модель нейрона Ходжкина-Хаксли [3], химическая реакция Белоусова-Жаботинского [4], модель Ямады для полупроводникового лазера с насыщающимся поглотителем [5] и полупроводниковая сверхрешетка [6]. Явление когерентного резонанса было подтверждено экспериментально в возбудимых электронных схемах [7], в полупроводниковом лазере с оптической обратной связью [8] и в микроволновом клистроном автогенераторе, находящемся на пороге самовозбуждения [9].

Что касается хаотических динамических систем, то на сегодняшний день известны всего две теоретические работы [10, 11], в одной из которых явление когерентного резонанса было обнаружено в хаотической бистабильной цепи Чуа [10], а в другой – в системе двух связанных идентичных хаотических осцилляторов Лоренца [11]. Так, в хаотической бистабильной цепи Чуа резонансное поведение было обусловлено скачками между двумя независимыми, симметричными, хаотическими аттракторами за счет шумового воздействия. В системе двух связанных хаотических осцилляторов Лоренца, находящихся в стабильном синхронном состоянии в отсутствие шума, явление когерентного резонанса наблюдалось в режиме «on-off» перемежаемости, возникающем только под воздействием шума. В обоих случаях у динамической системы существовало два стационарных состояния, между которыми происходило переключение под воздействием шума, как и в возбудимых шумом системах.

Хаотическую динамическую систему с переключением между двумя устойчивыми состояниями можно реализовать за счет подавления хаоса внешним воздействием. Такая динамическая система была реализована экспериментально на основе микроволновых вакуумных и спин-волновых кольцевых генераторов, формирующих широкополосный хаотический сигнал, на который воздействовал внешний периодический сигнал в виде последовательности прямоугольных радиоимпульсов [12]. В обеих генераторных схемах использовался усилитель, на который подавалась сумма двух сигналов: хаотического, генерируемого в системе и последовательности внешних импульсов. При этом хаотический сигнал соответствовал линейному участку на динамической характеристике, а импульсный нелинейному, с меньшим коэффициентом усиления. На временных интервалах, где внешние радиоимпульсы отсутствовали, генерировался хаотический сигнал, а на временных интервалах, когда внешний сигнал присутствовал, наблюдалось полное подавление собственной динамики системы. При этом внешний сигнал был отстроен по частоте от хаотического сигнала так, что спектры сигналов не перекрывались. Это давало возможность отфильтровать внешний сигнал и исследовать характеристики только хаотического сигнала, на который внешний сигнал уже оказал воздействие.

В настоящей работе с использованием разработанного метода временной фильтрации хаотического сигнала внешним сигналом произвольной формы [13], экспериментально демонстрируется явления когерентного резонанса, наблюдаемое в широкополосном микроволновом вакуумном генераторе хаоса – «шумотроне» [14], находящемся под воздействием внешнего микроволнового шумового сигнала с ограниченным спектром.

2. Экспериментальный макет шумотрона под внешним шумовым воздействием

Схематическое изображение микроволнового кольцевого генератора хаоса, находящегося под внешним сверхвысокочастотным (СВЧ) шумовым воздействием, приведено на рисунке 1а. Исследуемый автогенератор собран по схеме шумотрона [14] и состоит из двух ламп бегущей волны (ЛБВ) последовательно соединенных в кольцо вместе с переменным аттенуатором и микрополосковым полосно-пропускающим фильтром (ППФ). Используемые ЛБВ представляют собой широкополосные усилители мощности. ЛБВ изготовлены на основе нерегулярной спиральной замедляющей системы (ЗС) с переменным шагом. ЛБВ работают в частотном интервале 3-4 ГГц (см. рисунок 1 b-i и рисунок 1 b-ii), при этом максимальное значение коэффициента усиления ЛБВ ~47 дБ достигается при токе пучка $I_{1,2}=100$ мА и ускоряющем напряжении $U_{1,2}=3$ кВ на частоте ~3.5 ГГц. Длина первого однородного участка спирали с шагом 1.5 мм – 170 мм, длина второго однородного участка спирали с шагом 1.3 мм – 128 мм. Длина всей ЗС – 323 мм. Диаметр витка спирали – 3.3 мм, диаметр провода спирали – 0.5 мм. Для генерируемого в кольцевой системе СВЧ сигнала, одна из ламп работает в режиме линейного усиления сигнала (линейная ЛБВ), а вторая - в режиме насыщения выходной мощности и сильной фазовой нелинейности (см. рисунок 1с). Наличие фазовой нелинейности обуславливает частотный механизм хаотизации СВЧ сигнала в шумотроне.

Полосно пропускающий фильтр имеет уровень минимального подавления в полосе пропускания $A_0=-4$ дБ и ширину полосы пропускания $\Delta f=1.03$ ГГц по уровню ослабления 3 дБ с центральной частотой $f_0=3$ ГГц. Регулировка мощности СВЧ сигнала на входе нелинейной ЛБВ осуществляется посредством перестройки переменного аттенуатора. Часть СВЧ мощности выводится широкополосными направленными ответвителями на осциллограф реального времени с шириной полосы 10 ГГц и анализатора спектра. Внешний шумовой микроволновый сигнал формируется генера-

тором сигналов произвольной формы и поступает в кольцевую систему на вход линейной ЛБВ через направленный ответвитель. На рисунке 1d приведена гистограмма шумового СВЧ сигнала, на который наложен нормальный закон распределения. Видно, что внешний шумовой СВЧ сигнала имеет Гауссово распределение вероятностей.

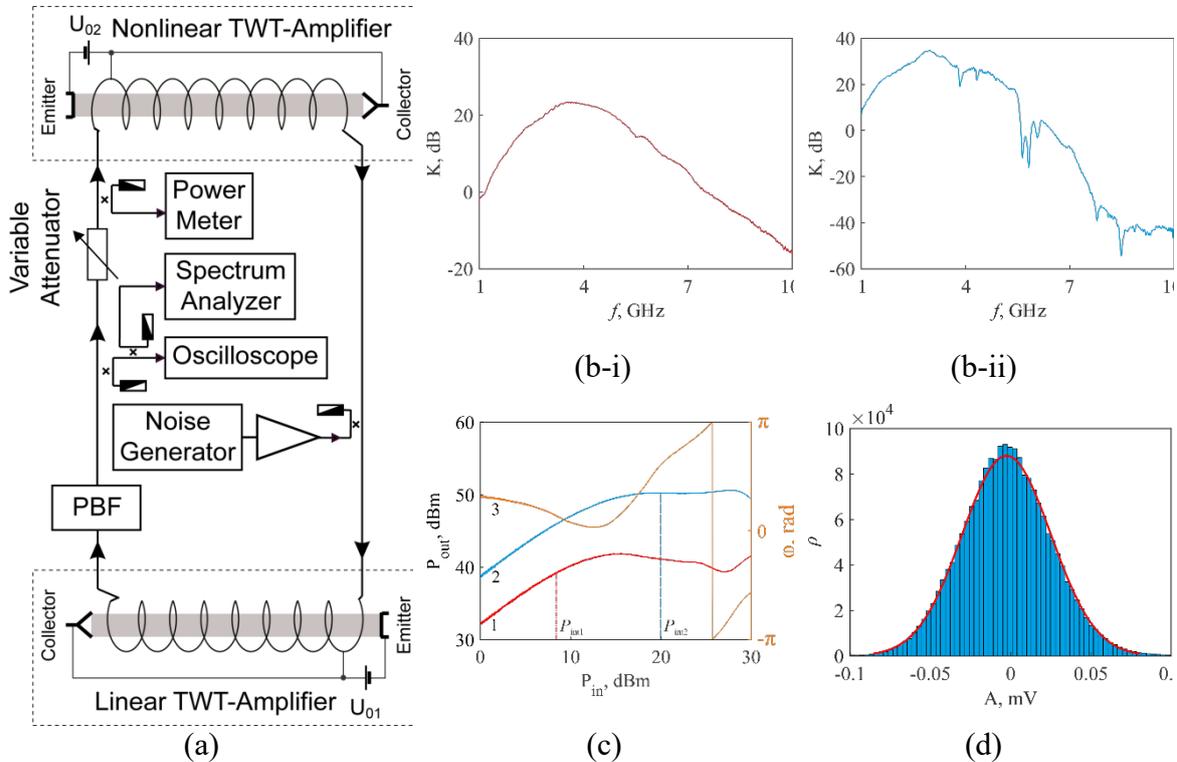


Рисунок 1. (а) Схематическое изображение микроволнового вакуумного генератора хаоса, находящегося под внешним СВЧ шумовым воздействием. (b-i, b-ii) АЧХ и (с) амплитудные характеристики линейного (b-i, с – кривая 1) и нелинейного (b-ii, с–кривая 2) ЛБВ-усилителей, измеренные при $I_{01}=40$ мА, $U_{01}=2880$ В, $I_{02}=70.9$ мА, $U_{02}=2550$ В. На (с) также показана зависимость набега фазы от входной мощности нелинейного ЛБВ-усилителя (кривая 3). Все измерения на (с) выполнены на частоте $f=3$ ГГц. На (d) представлена гистограмма шумового СВЧ сигнала с центральной частотой $f_n=2.1$ ГГц, шириной полосы частот $\Delta f_n=80$ МГц и мощностью $P_n=-20$ дБмВт. Здесь же приведена аппроксимация гистограммы нормальным законом распределения с дисперсией $\sigma=0.0027$ и средним $m=0.0037$.

3. Экспериментальные результаты, полученные с генераторной схемы

В отсутствие внешнего шумового СВЧ сигнала шумотрон генерирует хаотический СВЧ сигнал, который на входе линейной ЛБВ имеет уровень интегральной мощности $P_{int1}=+8.4$ дБмВт, а на входе нелинейной ЛБВ - $P_{int2}=+20$ дБмВт. Как следует из результатов, представленных на рисунке 1с, первая ЛБВ при таком уровне входной мощности работает в режиме практически линейного усиления, а вторая ЛБВ – в сильно нелинейном режиме. Спектр мощности генерируемого хаотического СВЧ сигнала характеризуется центральной частотой $f_{ch}=3$ ГГц и шириной полосы частот $\Delta f_{ch}=1.25$ МГц по уровню 54 дБ относительно максимального значения спектральной мощности. Как следует из результатов, представленных на рисунке 2, при подаче на вход линейной ЛБВ внешнего шумового СВЧ сигнала с центральной частотой $f_n=2.1$ ГГц и полосой частот $\Delta f_n=80$ МГц, последний не оказывает заметного влияния на хаотический СВЧ сигнал при уровнях интегральной мощности, не превышающих $P_n=0$ дБмВт на входе линейного ЛБВ-усилителя. В этом случае (см. рисунок 2а) огибающая хаотического

СВЧ сигнала имеет вид как в автономном режиме. При дальнейшем увеличении мощности шумового СВЧ сигнала (см. рисунок 2b), амплитуда огибающей хаотического СВЧ сигнала начинает подавляться на тех временных интервалах, где амплитуда огибающей шумового СВЧ сигнала превышает пороговое значение амплитуды на входе ЛБВ (выше этого порога ЛБВ работает в сильно нелинейном режиме). В этом случае на измеряемых временных реализациях наблюдаются временные интервалы, где амплитуда огибающей генерируемого в шумотроне СВЧ сигнала полностью подавлена. Как показано рисунке 2с, дальнейшее увеличение мощности внешнего СВЧ сигнала приводит к увеличению длительностей временных интервалов с подавленной собственной динамикой. Присутствие временных интервалов, соответствующих двум устойчивым состояниям системы, характерно для перемежаемости типа “on-off”, которая подтверждается расчетами распределения длительности ламинарных фаз и зависимостью средней длительностью ламинарной фазы от параметра надкритичности, удовлетворяющих законам, характерным для данного типа перемежаемости.

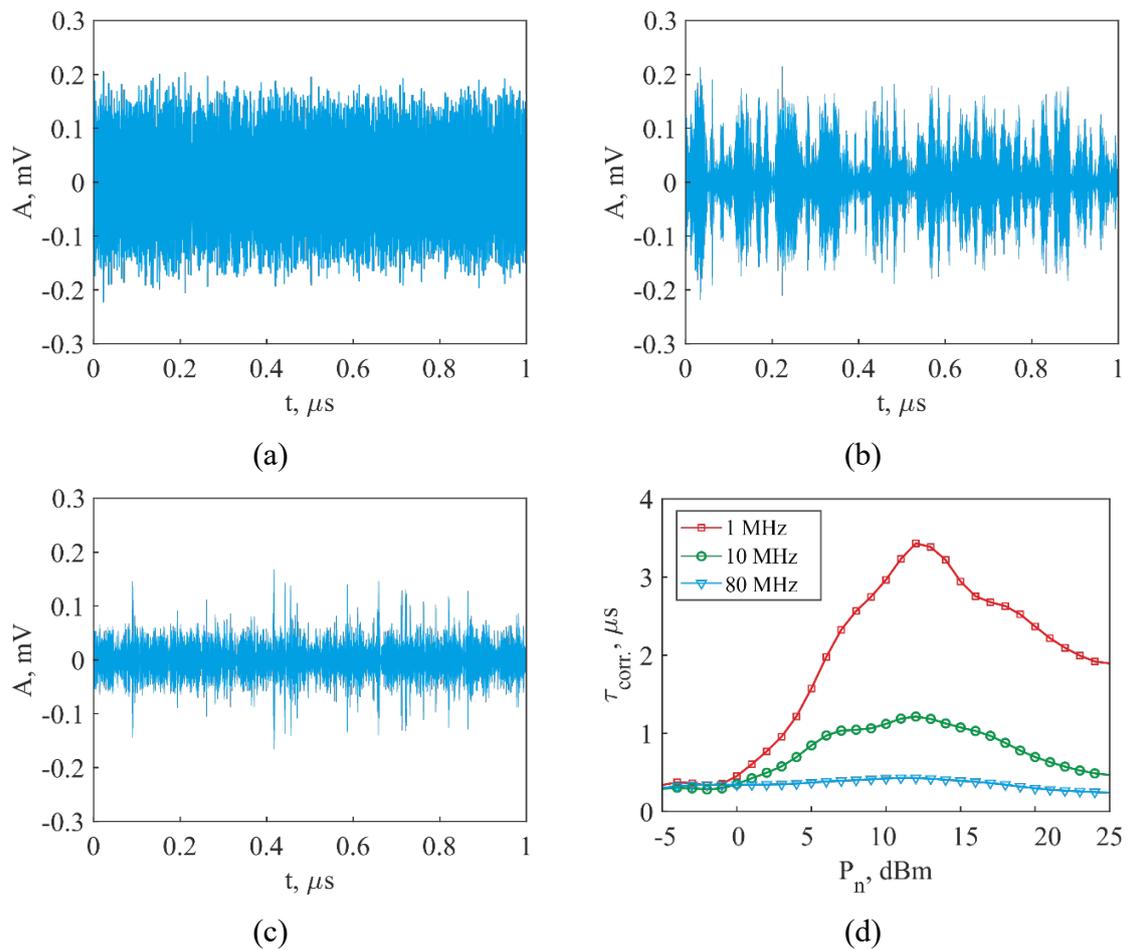


Рисунок 2. Временные ряды (а-с) хаотического СВЧ сигнала, генерируемого в схеме шумотрона под действием внешнего шумового СВЧ сигнала различного уровня мощности P_n : -5 дБмВт (а), +13 дБмВт (б) и +25 дБмВт (с). Результаты на (а-с) получены для $\Delta f_n=80$ МГц. На (d) приведено семейство кривых, демонстрирующих зависимость времени автокорреляции хаотического СВЧ сигнала τ_{corr} от мощности шумового СВЧ сигнала при изменении полосы частот шума Δf_n . В эксперименте токи пучка и ускоряющие напряжения обеих ЛБВ имели следующие значения: $I_{01}=40$ мА, $U_{01}=2880$ В, $I_{02}=70.9$ мА и $U_{02}=2550$ В.

На рисунке 2d представлены зависимости времени автокорреляции хаотического

СВЧ сигнала от мощности нормального шумового СВЧ сигнала, измеренные при полосах шума 1, 10 и 80 МГц. Из рисунка следует, что на каждой кривой имеется максимум τ_{corr} , который наблюдается при определенной интенсивности шума (в режиме пережимаемости типа “on-off”), т.е. исследуемый хаотический генератор демонстрирует явление когерентного резонанса. При этом максимальное значение времени автокорреляции уменьшается с увеличением полосы частот шумового СВЧ сигнала.

4. Заключение

Полученные в работе результаты могут быть полезны при разработке источников микроволнового хаоса, статистические характеристики которого управляются внешним сигналом произвольной формы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00274, <https://rscf.ru/project/23-22-00274/>

Список литературы

1. Pikovsky A., Kurths J. Coherence resonance in a noise driven excitable system// Phys. Rev. Lett. - 1997. - V. 78. – No 5. - P. 775–778.
2. Lindner B., Schimansky-Geier L. Analytical approach to the stochastic FitzHugh-Nagumo system and coherence resonance// Phys. Rev. E. - 1999. - V. 60. – No 6. - P. 7270–7276.
3. Lee S.G., Neiman A. and Kim S. Coherence resonance in a Hodgkin-Huxley neuron// Phys. Rev. E. – 1998. – V. 57. – No 3. P. 3292-3297.
4. Zhou L.Q., Jia X., and Ouyang Q. Experimental and numerical studies of noise-induced coherent patterns in a subexcitable system// Phys. Rev. Lett. – 2002.– V. 88. – No 13. – P. 138301.
5. Dubbeldam J.L.A., Krauskopf B., Lenstra D. Excitability and coherence resonance in lasers with saturable absorber// Phys.Rev. E. – 1999. – V. 60. No 6. – P. 6580-6588.
6. Hizanidis J., Balanov A.G., Amann A., Schöll E. Noise-induced front motion: signature of a global bifurcation// Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – No 24. - P. 244104.
7. Han S.K., Yim T.G., Postnov D.E., Sosnovtseva O.V. Interacting coherence resonance oscillators// Phys. Rev. Lett. - 1999. - V. 83. – No 9. – P. 1771-1774.
8. Giacomelli G., Giudici M., Balle S., Tredicce J.R. Experimental evidence of coherence resonance in an optical system// Phys.Rev. Lett. – 2000. – V. 84. – No 15. – P. 3298-3301.
9. 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.
10. Palenzuela C., Toral R., Mirasso C.R., Calvo O., Gunton J.D. Coherence resonance in chaotic systems// Europhys. Lett. - 2001. - V. 56. – No 3. - P. 347–353.
11. Liu Z. and Lai Y.-C. Coherence resonance in coupled chaotic oscillators// Phys. Rev. Lett. - 2001. - V. 86. – No 21. – P. 4737-4740.
12. 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// Изв. ВУЗов - Прикладная нелинейная динамика. - 2012. - Т. 20. - № 5. - С. 137-155.
13. 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.
14. Кислов В.Я., Мясин Е.А., Богданов Е.В. А.с. № 1125735 (СССР) 23.11.1984.Бюл. № 43.