

Когерентный резонанс в управляемом шумом хаотическом спин-волновом автогенераторе

Д.В. Романенко, С.В. Гришин

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в работе исследуется влияние шумового сигнала на хаотическую динамику спин-волнового генератора, работающего в условиях трехволнового нелинейного спин-волнового взаимодействия. На основе измеренных временных рядов установлено, что при определенной полосе шумового сигнала зависимость времени автокорреляции генерируемого хаотического сигнала от интенсивности шума имеет ярко выраженный резонансный характер. Данный результат подтверждают результаты моделирования, проведенные с использованием модифицированной модели Вышкинд-Рабиновича.

Ключевые слова: когерентный резонанс, спиновые волны, генератор хаоса

1. Введение

Явление когерентного резонанса было открыто в возбудимых шумом модельных системах и проявлялось в существовании у шумового сигнала оптимального уровня, при котором индуцированные шумом колебания динамической системы становились более когерентными [1, 2]. В спектре мощности флуктуационный пик обладал оптимальными характеристиками, т.е. был наиболее выражен на фоне шумового пьедестала при некотором оптимальном уровне шума. Фактически, шум играл конструктивную роль для усиления когерентности колебаний без использования внешних периодических сигналов. Впоследствии, когерентный резонанс был обнаружен в автогенераторах с бифуркацией Андронова–Хопфа [3]. При этом «настоящий» когерентный резонанс, обусловленный абсолютным уменьшением ширины спектральной линии и увеличением времени корреляции, наблюдался в автогенераторах с субкритической бифуркацией Андронова–Хопфа, в то время как в окрестности суперкритической бифуркации оказывалось возможным получить только относительное уменьшение ширины спектра [3]. Исследования, проводимые на радиофизических автогенераторах [4] и их моделях [3], затрагивали ситуацию, когда автоколебательная система находилась в предгенерационном режиме, а колебания в системе возбуждались шумом. Исследования когерентного резонанса при воздействии шума на автоколебательную систему, в которой в отсутствие шума уже генерировались бы собственные колебания, не проводились. В таких системах изучалось другое явление – синхронизация автоколебаний в присутствии шума [5].

В настоящей работе предлагается исследовать явление когерентного резонанса в твердотельных хаотических распределенных автогенераторах микроволнового диапазона, способных формировать в отсутствие внешнего шумового воздействия хаотические последовательности диссипативных солитонов огибающей. Научная новизна подобного рода исследований обусловлена тем, что до настоящего времени когерентный резонанс исследовался, в основном, на модельных системах, к которым относятся возбудимые шумом системы и автогенераторы с бифуркацией Андронова–Хопфа. В распределенных динамических системах, демонстрирующих хаотическую динамику в автономном режиме, явление когерентного резонанса не наблюдалось.

2. Экспериментальный макет

Экспериментальный макет (см. рисунок 1) неавтономной автоколебательной системы представляет собой последовательно соединенные в кольцо широкополосный твердотельный СВЧ усилитель мощности на GaAs полевых транзисторах 1, объемный резонатор 2, переменный аттенюатор 3 и перестраиваемую магнитным полем широкополосную нелинейную линию задержки на поверхностных магнитостатических волнах (ПМСВ) 4. Внешний сигнал заводился в кольцо посредством направленного ответвителя, включенного в цепь обратной связи перед СВЧ услителем мощности.

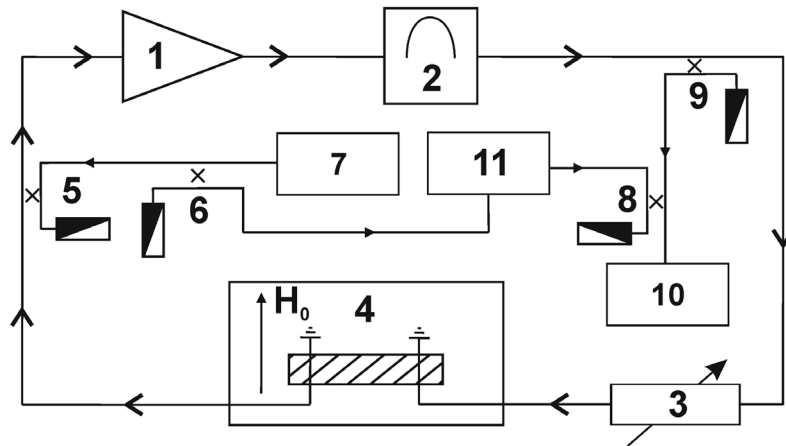


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 – транзисторный усилитель мощности; 2 – объемный резонатор; 3 – переменный аттенюатор; 4-нелинейная линия задержки на ПМСВ; 5, 6, 8, 9 – направленные ответвители для подключения внешнего генератора 7, анализатора спектра 10 и осциллографа реального времени 11.

В эксперименте внешний шумовой сигнал подавался с векторного генератора сигналов на вход твердотельного усилителя мощности на частоте 2.06 ГГц. Спектр возбуждения МСВ при этом находился выше по частоте в диапазоне 2.35-2.4 ГГц. Как следствие, внешний шумовой СВЧ сигнал оказывал воздействие только на коэффициент усиления твердотельного усилителя мощности, не воздействуя непосредственно на сигнал, генерируемый в кольцевой системе. При этом в отсутствие внешнего шумового сигнала в кольцевой системе генерировалась последовательность хаотических релаксационных импульсов (см., например, [6]).

3. Результаты экспериментального исследования

На рисунке 2 приведены временные реализации генерируемого в кольце хаотического СВЧ сигнала и внешнего шумового СВЧ сигнала, измеренные с помощью детекторной головки, находящейся на выходе направленного ответвителя 8 (см. рисунок 1). Из представленных результатов следует, что хаотическая динамика системы подавляется на тех временных интервалах, на которых мгновенные значения амплитуды шумового сигнала соответствуют нелинейному режиму работы усилителя. Это приводит к тому, что из хаотической последовательности релаксационных импульсов формируются цуги, состоящие из таких импульсов. Период следования хаотических цугов зависит от ширины полосы внешнего шумового сигнала и его амплитуды. С ростом мощности внешнего шумового сигнала до +3 дБмВт на осциллограмме заметно увеличение среднего периода между генерируемыми импульсами. Дальнейшее увеличение амплитуды внешнего воздействия до $P_{ext} = +6$ дБмВт приводит к полному подавлению хаотической динамики системы.

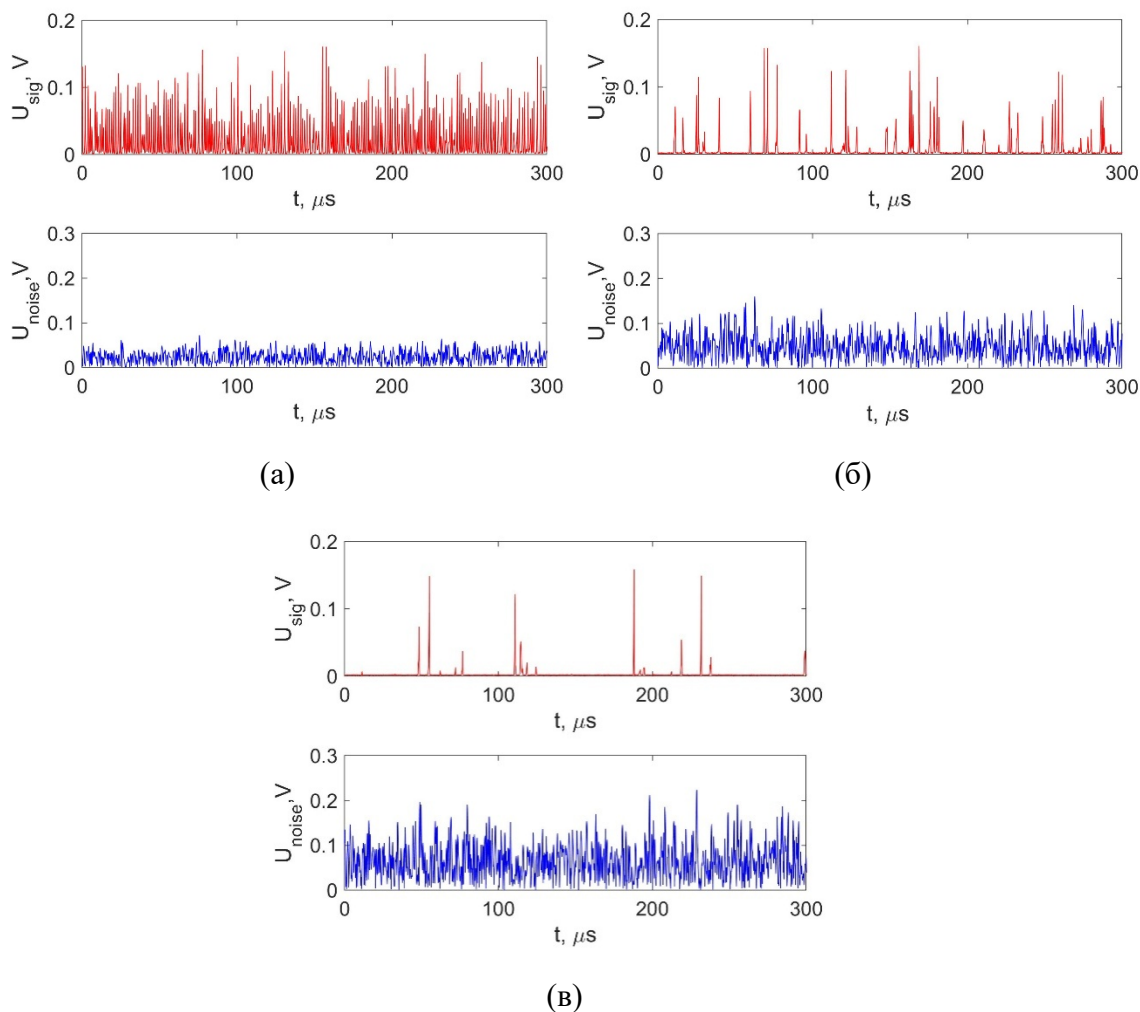


Рисунок 2. Временные реализации огибающей хаотического СВЧ сигнала (верхний рисунок) и внешнего шумового СВЧ сигнала (нижний рисунок), измеренные при ширине спектра шумового сигнала 1.5 МГц и нескольких значениях его интенсивности: а) $P_{\text{ext}}=-3$ дБмВт, б) $P_{\text{ext}}=0$ дБмВт и в) $P_{\text{ext}}=+3$ дБмВт

На рисунке 3 приведены зависимости времени автокорреляции хаотического СВЧ сигнала от интенсивности шума, которые были рассчитаны для трех значений ширины полосы частот шумового сигнала. Из представленных результатов следует, что при ширине полосы шума 0.5 МГц время автокорреляции монотонно спадает с увеличением интенсивности шума. Увеличение полосы частот до 1.5 МГц приводит к тому, что при некотором значении интенсивности шума время автокорреляции начинает возрастать и достигает максимального значения при $P_{\text{ext}}=0$ дБмВт. Дальнейшее увеличение интенсивности шума приводит к уменьшению времени автокорреляции. Аналогичная резонансная зависимость наблюдается при большей полосе шумового сигнала (5 МГц). Однако в этом случае максимальное значение времени автокорреляции наблюдается уже при меньшей интенсивности шума. Полученные результаты указывают на то, что в хаотическом спин-волновом генераторе, находящемся под внешним шумовым воздействием, наблюдается явление когерентного резонанса.

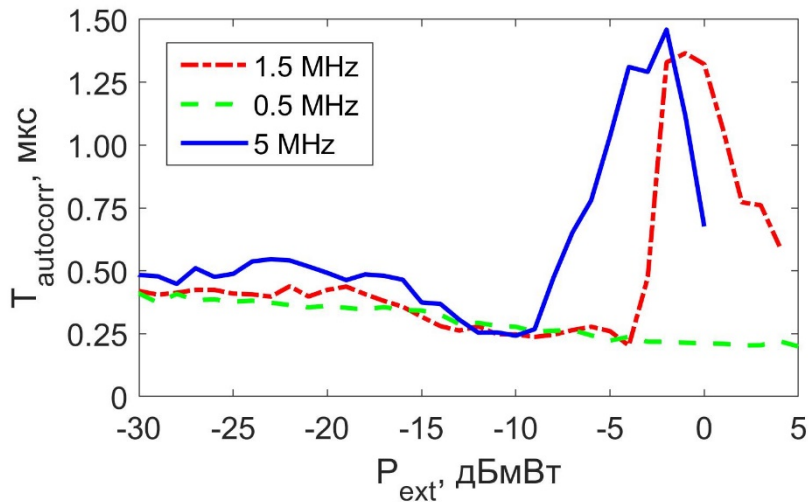


Рисунок 3. Зависимости времени автокорреляции хаотического сигнала от мощности шумового сигнала, измеренные при различной ширине спектра внешнего шумового сигнала.

3. Теоретическая модель и результаты численного моделирования

Для теоретического описания наблюдаемого в эксперименте эффекта была модифицирована модель Вышкинд-Рабиновича (см. [6]), описывающая параметрический распад длинноволновой магнитостатической волны на коротковолновые спиновые волны (СВ) с учетом нелинейности усилителя и наличия внешнего сигнала:

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= -c_0 b_1(t) b_2(t) \exp(-i\delta t) - \eta m(t) + \gamma \left(1 - \alpha |m(t-\tau) + A_{ext}(t) \exp(i\chi t)|^2 \right) m(t-\tau) \\ \frac{db_1(t)}{dt} &= c_1 m(t) b_2^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_1(t) \\ \frac{db_2(t)}{dt} &= c_2 m(t) b_1^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_2(t) \end{aligned}$$

где m , b_1 , b_2 – амплитуды МСВ и СВ соответственно, δ – расстройка между частотой СВ и половинной частотой МСВ, η , ν – коэффициенты потерь, γ – коэффициент линейного усиления, α – коэффициент нелинейности усилителя, τ – время задержки в цепи обратной связи, A_{ext} – амплитуда внешнего сигнала.

Было проведено численное моделирование системы при подаче на нее узкополосного белого шума с шириной полосы 0.5-5 МГц. На рисунке 4 представлены результаты расчета времени автокорреляции сигнала $m(t)$, полученные при различных интенсивностях и полосах шумового сигнала. Из представленных на рисунке 4 результата видно, что зависимость времени автокорреляции хаотического сигнала от интенсивности шума здесь также имеет ярко выраженный резонансный характер, начиная с определенного значения ширины полосы частот шумового сигнала. Максимальное значение времени автокорреляции с увеличением полосы частот шумового сигнала здесь также наблюдается при меньшей интенсивности шума.

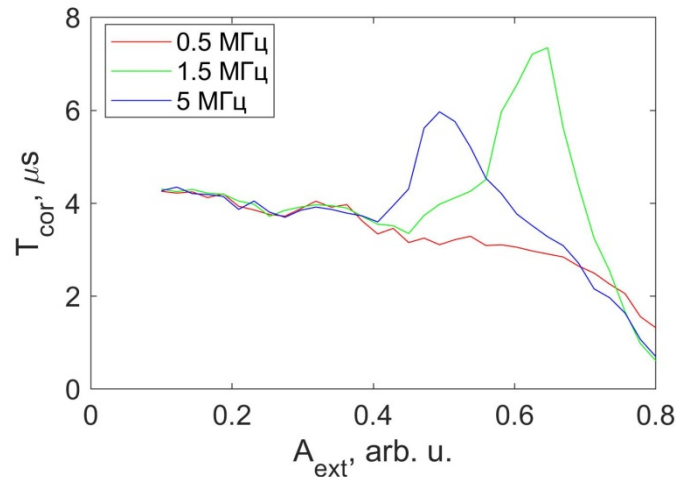


Рисунок 4. Зависимости времени автокорреляции хаотического сигнала от амплитуды шумового сигнала, рассчитанные по модели при различной ширине спектра внешнего шумового сигнала.

4. Заключение

Разработан и создан экспериментальный макет твердотельного спин-волнового генератора хаотических релаксационных импульсов огибающей, находящегося под внешним шумовым воздействием. Генератор состоит из широкополосного транзисторного усилителя и нелинейной спин-волновой линии передачи в конфигурации линии задержки, в которой реализуются параметрические трехволновые нелинейные спин-волновые взаимодействия. Установлено, что в таком генераторе возможно осуществить управление степенью когерентности хаотической импульсной последовательности, начиная с определенной полосы частот и интенсивности шумового сигнала. Разработана модифицированная модель Вышкинд-Рабиновича, позволяющая воспроизвести наблюдаемый в эксперименте эффект когерентного резонанса.

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

Список литературы

1. Hu G., Ditzinger T., Ning C. Z., Haken H. Stochastic resonance without external periodic force // Phys. Rev. Lett. - 1993. - Vol. 71. - P. 807–810.
2. Pikovsky A., Kurths J. Coherence resonance in a noise-driven excitable system // Phys. Rev. Lett. - 1997. - Vol. 78. - P. 775–778.
3. Ushakov O. V., Wünsche H. J., Henneberger F., Khovanov I. A., Schimansky-Geier L., Zaks M. A. Coherence resonance near a Hopf bifurcation // Phys. Rev. Lett. - 2005. - Vol. 95. – P. 123903.
4. Feoktistov A., Anishchenko V. Coherence resonance and synchronization of stochastic self-sustained oscillations in hard excitation oscillator // Rus. J. Nonlin. Dyn. 2012. - Vol.8. - P. 897–911.
5. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект». 2009. – 312 с.
6. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. Механизм возникновения и стохастизации автомодуляции интенсивных спиновых волн // ЖТФ. 1999. - Т. 69. - № 8. - С. 100.