

09

Влияние амплитудной и фазовой нелинейности спин-волновой линии задержки на генерацию широкополосного хаотического СВЧ-сигнала

© *Е.Н. Бегинин, С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский*

Саратовский государственный университет
E-mail: grishfam@sgu.ru

Поступило в Редакцию 3 ноября 2009 г.

Приведены результаты экспериментального исследования режимов широкополосной хаотической генерации в кольцевой автоколебательной системе с нелинейной линией задержки на обратных объемных магнитостатических волнах (ОМСВ). Показано, что изменение длины линии задержки на ОМСВ влияет на амплитудную и фазовую нелинейность линии и позволяет управлять характеристиками генерируемого в кольце хаотического СВЧ-сигнала. Впервые продемонстрирована возможность генерации широкополосного хаотического СВЧ-сигнала с непрерывным спектром и с законом распределения плотности вероятности, близким к нормальному гауссовскому при возбуждении в одиночной ферромагнитной пленке ОМСВ.

На сегодняшний день одним из актуальных направлений в области создания источников динамического хаоса сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона является использование в автоколебательных системах с внешней положительной обратной связью нелинейного пассивного устройства в виде спин-волновой линии задержки, характеристиками которой можно управлять с помощью внешнего постоянного магнитного поля [1–5]. В указанных системах нелинейность линии задержки приводит к возникновению механизма стохастической автомодуляции СВЧ-сигнала, связанного с параметрическим возбуждением магнитостатическими волнами (МСВ) тепловых спиновых волн. Однако этот механизм стохастизации сигнала наблюдается в интервале частот ~ 10 МГц и является узкополосным [5].

Одним из возможных путей генерации широкополосного хаотического СВЧ-сигнала в кольцевых автоколебательных системах с запаздыванием является использование нелинейного элемента, амплитудная характеристика которого имеет ярко выраженный падающий участок (амплитудный механизм перехода к динамическому хаосу [6,7]). В традиционном кольцевом автогенераторе хаоса (схема шумотрона) таким нелинейным элементом является усилитель мощности на основе лампы бегущей волны (ЛБВ-усилитель) [6]. Однако возможна ситуация, когда в роли нелинейного элемента с падающим участком на амплитудной характеристике выступает пассивный элемент, а именно спин-волновая линия задержки [2,3]. Наличие падающего участка на амплитудной характеристике линии задержки обусловлено нелинейными потерями МСВ, которые возникают за счет трехволновых процессов распада либо поверхностной МСВ [2], либо двух связанных обратных объемных МСВ (ООМСВ) [3]. В отличие от шумотрона, где режим динамического хаоса развивается на участке уменьшения выходной мощности усилителя, в рассматриваемой нами автоколебательной системе усилитель работает в режиме максимальной выходной мощности, что приводит к увеличению КПД такого генератора хаоса по сравнению с шумотроном.

Помимо амплитудного механизма в шумотроне существует и так называемый фазовый механизм, приводящий к широкополосной хаотической генерации и обусловленный фазовой нелинейностью ЛБВ-усилителя мощности [6]. Необходимо отметить, что зависимость набега фазы спин-волновой линии задержки от уровня мощности входного сигнала использовалась для создания нелинейного спин-волнового СВЧ-интерферометра [8]. Однако влияние фазовой нелинейности линии задержки на генерацию широкополосного хаотического СВЧ-сигнала не рассматривалось.

Одним из возможных путей управления амплитудными и фазовыми характеристиками спин-волновой линии задержки является изменение ее длины, увеличение которой приводит к росту не только линейных потерь в линии, но и ее нелинейных потерь, связанных с трехволновыми процессами МСВ. Кроме того, увеличение длины линии задержки обуславливает увеличение фазового набега СВЧ-сигнала, что при больших уровнях входной мощности приводит к увеличению нелинейного фазового сдвига в линии и, как следствие этого, к сильной фазовой нелинейности [8].

В настоящем сообщении впервые продемонстрирована возможность генерации широкополосного хаотического СВЧ-сигнала с непрерывным спектром в кольцевой автоколебательной системе за счет амплитудной и фазовой нелинейности линии задержки на основе ферромагнитной пленки при возбуждении в ней ООМСВ.

Исследуемая автоколебательная система (см. вставку на рис. 1, *a*) представляла собой последовательно соединенные в кольцо СВЧ-усилитель мощности на GaAs полевых транзисторах 1, переменный аттенюатор 3 и линию задержки на ООМСВ 5. Усилитель мощности имел в полосе частот 2–4 GHz значение коэффициента усиления в линейном режиме $K \cong 34$ dB и уровень мощности насыщения $P_{sat} \cong 33$ dBm. Линия задержки состояла из двух закороченных с одного конца проволочных проводников диаметром $d = 70 \mu\text{m}$, расстояние l между которыми варьировалось от 3 до 6 mm. В качестве ферромагнитной пленки использовалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), которая была прижата к проводникам, имела геометрические размеры $6 \times 10 \times 0.04$ mm, намагниченность насыщения $3\pi M_0 = 1680$ Gs и параметр потерь $2\Delta H = 0.69$ Oe. Для возбуждения ООМСВ постоянное магнитное поле H_0 было направлено перпендикулярно к проводникам, касательно к поверхности пленки ЖИГ и подбиралось таким образом, чтобы возбуждение ООМСВ происходило на частотах ниже 3.1 GHz, где разрешены трехволновые процессы распада. Уровень мощности сигнала в кольце регулировался с помощью переменного аттенюатора 3, расположенного на входе линии задержки, и измерялся с помощью измерителя мощности N1912A, который подключался к кольцу через направленный ответвитель 4. Основная часть мощности с выхода усилителя мощности возвращалась обратно в кольцо, а меньшая часть мощности через направленный ответвитель 2 поступала в нагрузку: анализатор спектра ESA-L E4408B и осциллограф реального времени Infiniium DSO81004B.

Амплитудные и фазовые характеристики линии задержки на ООМСВ, измеренные в зависимости от уровня мощности входного сигнала для двух значений длины линии задержки l , представлены на рис. 1. Из результатов измерения динамических характеристик (зависимость выходной мощности P_{out} от уровня входной мощности P_{in}) линии задержки на ООМСВ (рис. 1, *a*) следует: 1) при $l = 3$ mm в определенном интервале изменения входной мощности (-14 dBm $< P_{in} < +1$ dBm) на динамической характеристике линии наблюдается участок ограничения

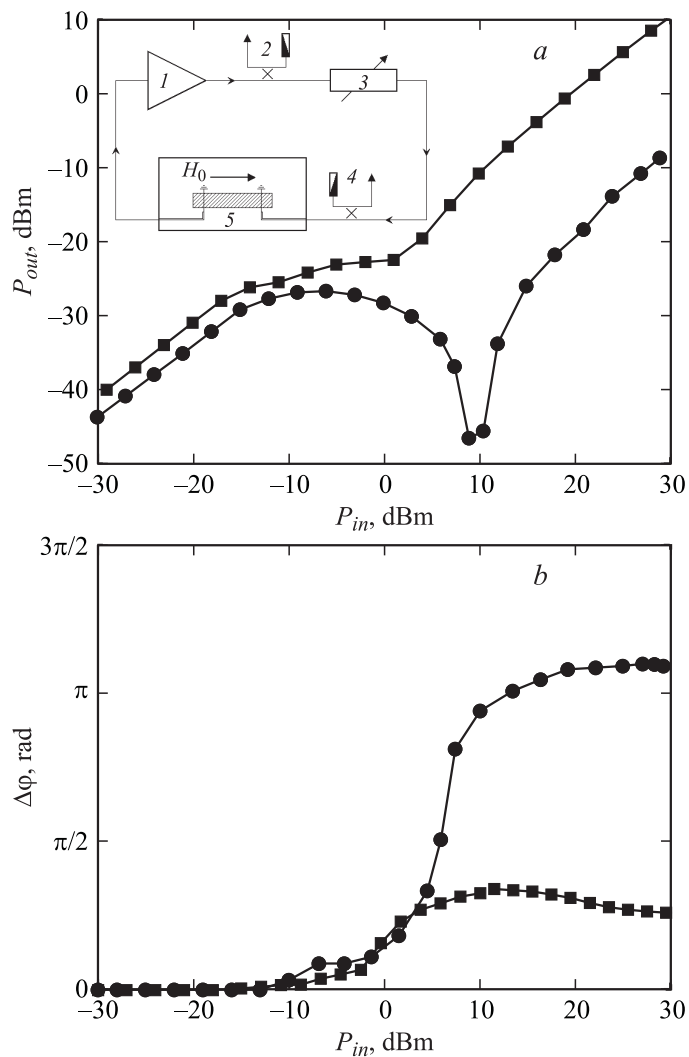


Рис. 1. Амплитудные (а) и фазовые (б) характеристики линии задержки на ООМСВ при $l = 3$ мм (квадраты) и $l = 6$ мм (кружки), измеренные на частоте $f = 2279$ МГц. На вставке показана блок-схема исследуемой кольцевой автоколебательной системы.

мощности; 2) при $l = 6$ mm на динамической характеристике линии в интервале изменения входной мощности -6 dBm $< P_{in} < +9$ dBm наблюдается ярко выраженный падающий участок, динамический диапазон существования которого составляет 15 dB. При этом уровень P_{out} в указанном выше диапазоне изменяется на 20 dB. Таким образом, как видно из результатов, представленных на рис. 1, *a*, увеличение расстояния между входным и выходным микрополосковыми преобразователями приводит к увеличению нелинейных активных потерь ООМСВ до уровня, необходимого для формирования падающего участка на амплитудной характеристике линии задержки. Кроме того, из результатов, представленных на рис. 1, *b*, следует, что зависимость набега фазы СВЧ-сигнала, прошедшего через линию задержки на ООМСВ, от его входной мощности в обоих случаях является нелинейной, обладает пороговым уровнем $P_{in} \sim -13$ dBm, определяющим начало нелинейной зависимости $\Delta\varphi(P_{in})$, и участком насыщения, который в случае $l = 3$ mm наблюдается при $P_{in} \geq +10$ dBm, а в случае $l = 6$ mm при $P_{in} \geq +20$ dBm. Однако максимальная величина нелинейного фазового сдвига в режиме насыщения при $l = 6$ mm примерно в 3 раза больше, чем при $l = 3$ mm. Таким образом, как следует из результатов, представленных на рис. 1, изменяя длину линии задержки на МСВ, можно управлять не только ее амплитудной, но и фазовой нелинейностью.

На рис. 2 приведены результаты измерения спектральных характеристик широкополосных хаотических СВЧ-сигналов, генерируемых при различных значениях длины линии задержки, а на рис. 3 — их статистические характеристики, полученные в результате математической обработки измеренных временных реализаций. При $l = 3$ mm (рис. 2, *a*) спектр мощности генерируемого в кольцевом автогенератора СВЧ-сигнала является дискретным в широкой полосе частот, однако сам СВЧ-сигнал является хаотическим в связи с „зашумленностью“ в узкой полосе частот каждой из его частотных составляющих¹. Данный эффект генерации широкополосного хаотического СВЧ-сигнала с дискретным спектром в автогенераторе с нелинейной линией задержки на ООМСВ впервые наблюдался в [2] для толстых пленок ЖИГ ($d = 40$ μm) и позднее в [3] для тонких пленок ЖИГ ($d = 5$ μm) в области частот суще-

¹ Необходимо подчеркнуть, что широкополосные хаотические сигналы, спектры которых показаны на рис. 2, имеют детерминированную природу. Данная особенность устанавливалась на основе того факта, что характеристиками таких сигналов в кольце можно управлять с помощью внешнего регулярного воздействия [2].

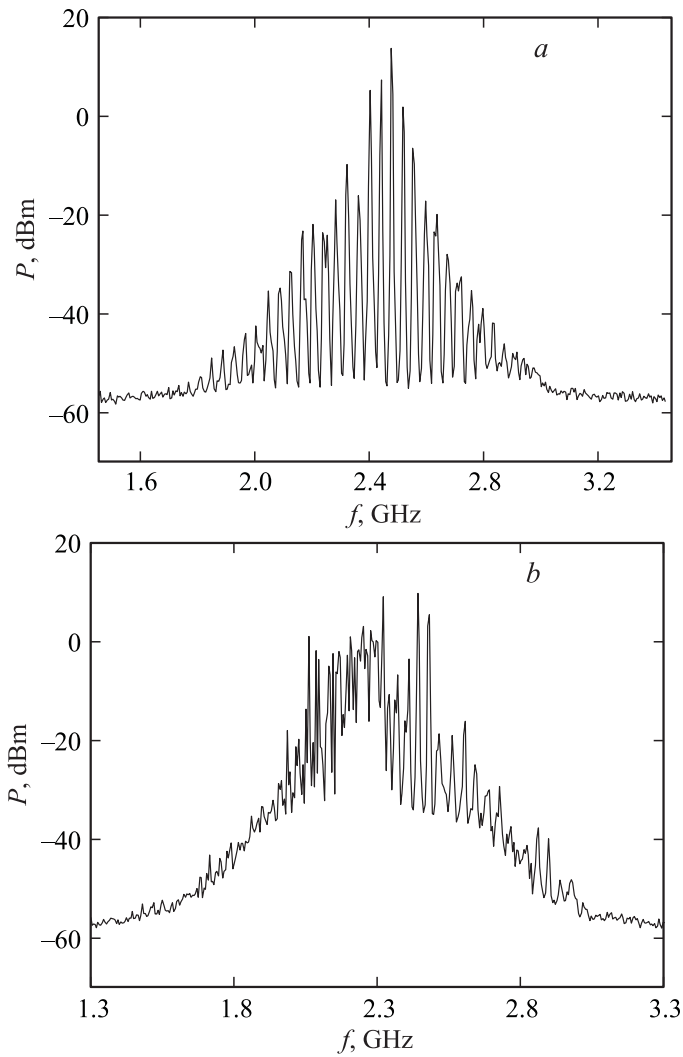


Рис. 2. Спектры мощности широкополосного хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого в кольцевой автоколебательной системе с линией задержки на ООМСВ при различных значениях l : a — 3 mm; b — 6 mm. В обоих случаях уровень интегральной мощности СВЧ-сигнала на входе линии задержки составляет величину +20 dBm.

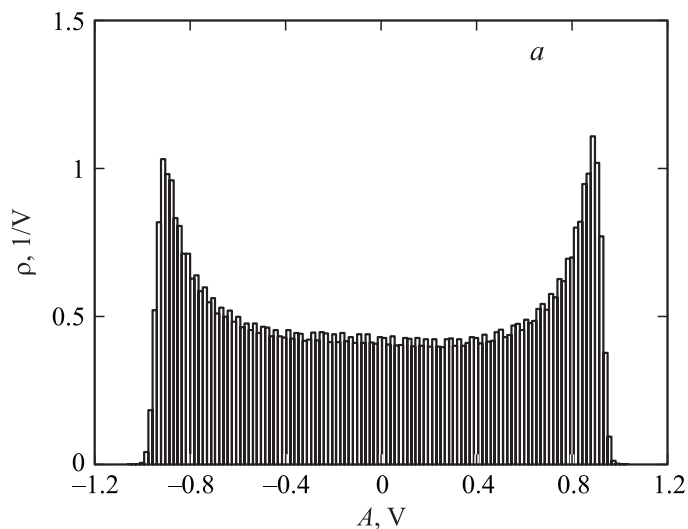


Рис. 3. Распределения плотности вероятности мгновенных значений широкополосного хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого в кольцевой автоколебательной системе с линией задержки на ООМСВ при различных значениях l : a — 3 мм; b — 6 мм. В обоих случаях уровень интегральной мощности СВЧ-сигнала на входе линии задержки составляет величину +20 dBm. Сплошной линией (b) показано распределение плотности вероятности с нормальным гауссовским законом.

ствования параметрических процессов первого порядка. Дискретность спектра широкополосного хаотического СВЧ-сигнала при $l = 3$ мм связана с отсутствием падающего участка на динамической характеристике линии задержки (рис. 1, a) и наличием у нее относительно небольшого нелинейного фазового сдвига $\Delta\varphi \sim 1.1 \text{ rad} < \pi/2$ (рис. 1, b), что не приводит к перекрытию шумоподобных спектров кольцевых мод в широкой полосе частот. В то же время увеличение расстояния между микрополосковыми преобразователями до $l = 6$ мм (рис. 2, b) приводит к перекрытию шумоподобных спектров кольцевых мод и к генерации в системе широкополосного хаотического СВЧ-сигнала с непрерывным спектром, что обусловлено присутствием падающего участка на ди-

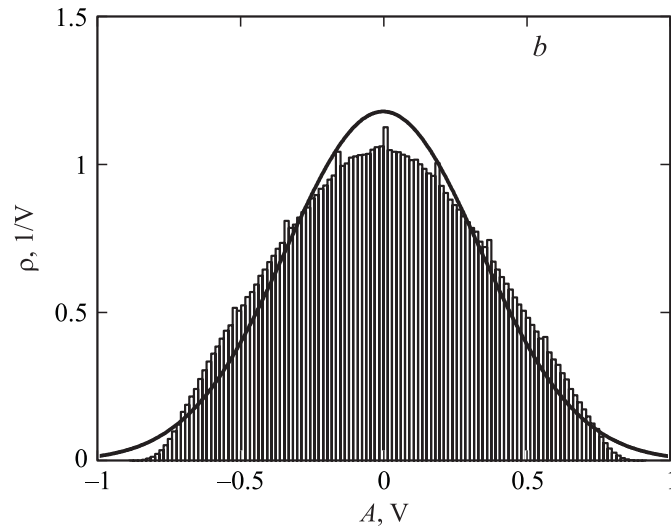


Рис. 3 (продолжение).

намической характеристике линии задержки на ООМСВ (рис. 1, *a*) и наличием у нее большего нелинейного фазового сдвига $\sim 3.5 \text{ rad} > \pi$ (рис. 1, *b*).

Особый интерес представляют результаты, представленные на рис. 3. При $l = 3 \text{ mm}$ (рис. 3, *a*) распределение плотности вероятности ρ мгновенных значений A генерируемого хаотического СВЧ-сигнала качественно соответствует распределению, которое наблюдается у сигнала, представляющего собой гармонический сигнал с мультипликативным шумом слабой интенсивности. При этом на временной реализации СВЧ-сигнала наблюдается чередование областей с ламинарной и турбулентной фазами, что свидетельствует о наличии перемежаемости в системе. С увеличением длины линии задержки (рис. 3, *b*) распределение плотности вероятности становится близким к нормальному гауссовскому распределению с коэффициентом эксцесса $\gamma = -0.6997^2$.

² На основе анализа измеренной временной зависимости помимо коэффициента эксцесса были определены значения дисперсии $\sigma^2 = 0.115 \text{ V}^2$ и среднего $m = -1.11206 \cdot 10^{-3} \text{ V}$, которые затем использовались для расчета распределения плотности вероятности с нормальным гауссовским законом.

Данный факт обусловлен тем, что при выбранном уровне интегральной мощности на входе линии задержки ее нелинейный фазовый сдвиг является практически максимальным по величине. Это приводит к тому, что свойства подобия у огибающей автокорреляционной функции такого сигнала проявляются на временных масштабах, гораздо меньших, чем при $l = 3$ mm. В этом случае рассчитанная безразмерная величина времени корреляции τ_{corr} , представляющая собой отношение времени корреляции хаотического сигнала τ_{ch} к времени корреляции прямоугольного радиоимпульса τ_p с длительностью, равной длительности временной реализации T измеренного сигнала, есть $\tau_{corr} = \tau_{ch}/\tau_p$ ($\tau_{ch} = \frac{1}{R(0)} \int_0^T |R_{ch}(\tau)| d\tau$, $R_{ch}(\tau) = \int_{-T}^T [A(t)A(t-\tau)dt - m^2]dt$ — автокорреляционная функция, $\tau_p = T/2$, τ — временной сдвиг) и равна $\tau_{corr} = 24.08 \cdot 10^{-2}$ при $l = 3$ mm и $\tau_{corr} = 5.12 \cdot 10^{-2}$ при $l = 6$ mm. Уменьшение величины τ_{corr} с увеличением расстояния между микрополосковыми преобразователями свидетельствует о том, что генерируемый широкополосный хаотический СВЧ-сигнал становится все более случайным.

Представленные в работе результаты указывают на возможность управления спектральными и статистическими характеристиками широкополосных хаотических СВЧ-сигналов с помощью амплитудной и фазовой нелинейности спин-волновой линии задержки. Данный факт может представлять интерес при разработке генераторов широкополосных шумоподобных СВЧ-сигналов с заданными характеристиками для систем связи и радиопротиводействия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 08-02-00102), Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1/235).

Список литературы

- [1] *Mingzhong W., Kalinikos B.A., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 237202.
- [2] *Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 89–98.
- [3] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Морозова М.А., Шараевский Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 18. С. 41–49.

- [4] *Hagerstrom A.M., Tong W., Wu M., Kalinikos B.A., Eykholt R.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. P. 207202.
- [5] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 7. С. 66–72.
- [6] *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
- [7] *Кузнецов С.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. XXV. В. 12. С. 1410–1427.
- [8] *Устинов А.Б., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 10. С. 20–25.