

09

## **Генерация широкополосного хаотического СВЧ-сигнала в кольцевой системе с нелинейной линией задержки на связанных ферромагнитных пленках**

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

Саратовский государственный университет

E-mail: grishfam@sgu.ru

*Поступило в Редакцию 7 апреля 2009 г.*

Приведены результаты экспериментального исследования различных режимов хаотической генерации сигнала в кольцевой автоколебательной системе с нелинейной линией задержки на связанных ферромагнитных пленках при возбуждении в них обратных объемных магнитоэлектрических волн (ОМЭВ). Показано, что одновременное возбуждение двух волн в связанных пленках приводит к возникновению падающего участка на динамической характеристике линии задержки на ОМЭВ и к генерации в системе широкополосного хаотического сигнала со сплошным спектром. Отмечено, что при определенных значениях усиления в кольце наблюдается возникновение режима перемежаемости при генерации широкополосного хаотического сигнала как с непрерывным, так и с дискретным спектром.

PACS: 05.45.Gg, 75.30.Ds, 85.70.Ge

В последние годы активно проводятся исследования по передаче информации с помощью хаотических сигналов, источниками которых являются широкополосные генераторы хаоса [1,2]. В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) генерация таких сигналов может осуществляться на основе кольцевых систем с запаздыванием, в которых широкополосный активный нелинейный элемент обладает падающим участком на динамической характеристике (например, ЛБВ — усилитель мощности [3,4]). В настоящее время для генерации хаотических сигналов рассматривается также возможность использования в кольцевых системах пассивных нелинейных устройств с ферромагнитными пленками [5–7]. Интерес к таким системам обусловлен возможностью электрической перестройки полосы генерации хаотического сигнала и существованием

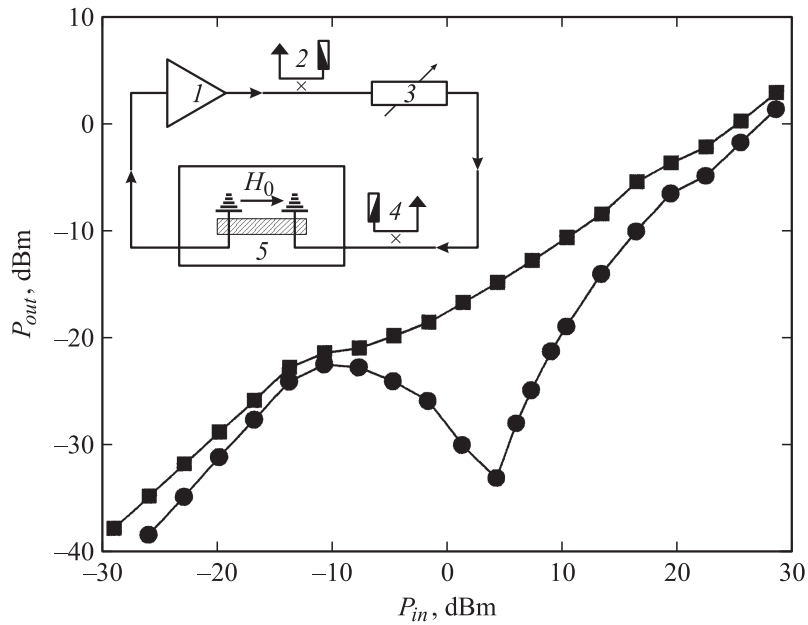
двух механизмов хаотизации сигнала (узкополосного и широкополосного), связанных с параметрическим возбуждением тепловых спиновых волн [5,7]. Первый механизм обусловлен стохастической автомодуляцией сигнала параметрически возбуждаемыми спиновыми волнами и наблюдается в достаточно узком интервале частот ( $\sim 10$  MHz) [5]. Второй механизм хаотизации сигнала, являющийся широкополосным, обусловлен возникновением падающего участка на динамической характеристике линии задержки с ферромагнитной пленкой за счет нелинейных потерь магнитостатической волны (МСВ) [7]. Возможность генерации широкополосного хаотического сигнала со сплошным спектром продемонстрирована в [6,7]. В работе [7] было показано, что ярко выраженный падающий участок на динамической характеристике линии задержки с ферромагнитной пленкой наблюдается лишь при возбуждении поверхностной МСВ (ПМСВ), так как в этом случае существует дополнительный механизм нелинейных потерь, связанный с трехмагنونными процессами распада ПМСВ на обратные объемные МСВ (ООМСВ) [8]. Установлено, что одним из преимуществ таких автоколебательных систем, содержащих нелинейный пассивный элемент, является получение высокого уровня интегральной мощности хаотического сигнала, которая составляет величину 50–60% от мощности насыщения усилителя. Это связано с тем, что при генерации в кольце широкополосного хаотического сигнала усилитель работает в режиме максимальной выходной мощности [7].

Новые возможности по формированию нелинейных характеристик линий передачи на МСВ появляются при использовании многослойных ферромагнитных структур, например в виде двух связанных ферромагнитных пленок, разделенных диэлектрическим промежутком. В таких структурах связь между пленками приводит к возбуждению двух мод МСВ — быстрой и медленной, распространяющихся с разными групповыми скоростями, что обуславливает возникновение новых нелинейных эффектов, которые не наблюдаются в одиночной ферромагнитной пленке [9]. В частности, в связанных структурах при трехмагنونных процессах распада наблюдается дополнительное увеличение уровня нелинейных потерь МСВ за счет возникновения двух волновых каналов (схема „шумоподавителя“ [9]). Кроме того, использование связанных структур в кольцевых системах должно приводить к формированию двух спектров собственных мод кольца с разными межмодовыми расстояниями по частоте.

В настоящем сообщении приведены результаты экспериментального исследования различных режимов хаотической генерации сигнала в кольцевой автоколебательной системе с нелинейной линией задержки на связанных ферромагнитных пленках при возбуждении в них ООМСВ. Впервые показано, что одновременное возбуждение двух волн в связанной структуре приводит к возникновению ярко выраженного падающего участка на динамической характеристике линии задержки на ООМСВ, который отсутствует в линии задержки с одиночной пленкой [7], и к генерации в кольцевой системе широкополосного хаотического сигнала со сплошным спектром.

Исследуемая автоколебательная система (см. вставку на рис. 1) 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 между которыми было  $s = 3$  mm. В качестве ферромагнитных пленок использовались пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), которые были прижаты к проводникам, имели практически одинаковые геометрические размеры  $6 \times 10 \times 0.04$  mm, намагниченность насыщения  $4\pi M_0 = 1680$  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 пленок 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.

Результаты измерения динамических характеристик (зависимость выходной мощности  $P_{out}$  от уровня входной мощности  $P_{in}$ ) линии задержки на ООМСВ с двумя и одной пленками ЖИГ вне кольца пред-



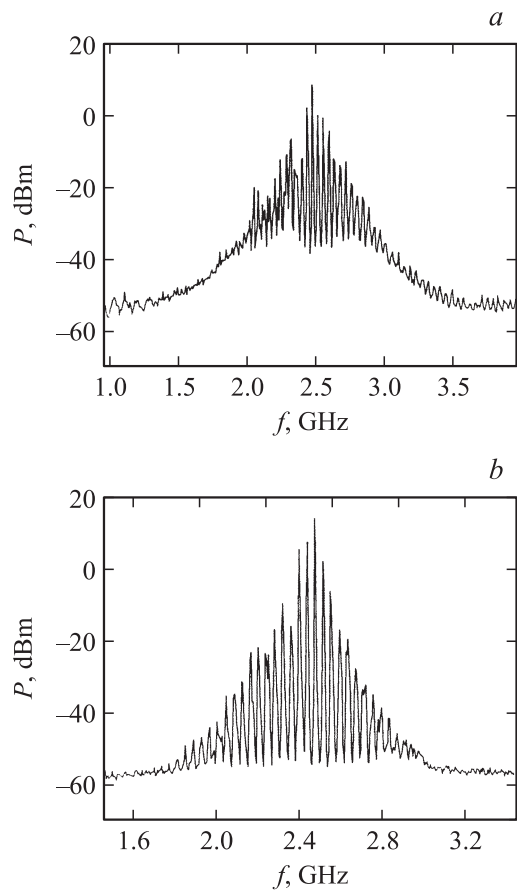
**Рис. 1.** Динамические характеристики линии задержки с одной (квадратики) и двумя связанными (кружки) ферромагнитными пленками при возбуждении в них ООМСВ, измеренные на частотах  $f = 2415$  МГц и  $f = 2280$  МГц соответственно. На вставке показана блок-схема исследуемой кольцевой автоколебательной системы.

ставлены на рис. 1. Необходимо отметить, что данные характеристики снимались на разных частотах, находящихся в полосе частот возбуждения ООМСВ, но при одном значении магнитного поля  $H_0 = 370$  Ое. Из представленных на рис. 1 результатов следует, что в случае возбуждения ООМСВ в одиночной пленке в определенном интервале изменения входной мощности ( $-10 \text{ dBm} < P_{in} < -5 \text{ dBm}$ ) на динамической характеристике линии наблюдается участок ограничения мощности, не имеющий отрицательного наклона. В случае двух связанных пленок ЖИГ на динамической характеристике линии ( $-10 \text{ dBm} < P_{in} < 5 \text{ dBm}$ ) наблюдается ярко выраженный падающий участок, динамический диапазон существования которого составляет 15 дВ. При этом уровень  $P_{out}$  в

указанном выше диапазоне изменяется на 11 dB. Наличие падающего участка на динамической характеристике линии задержки со связанными пленками обусловлено увеличением общего уровня нелинейных потерь ООМСВ за счет параметрического возбуждения коротковолновых спиновых волн как быстрой, так и медленной модами ООМСВ. Таким образом, использование пассивного нелинейного элемента с падающим участком на динамической характеристике в кольцевой системе должно приводить к генерации хаотического сигнала со сплошным спектром в широкой полосе [7].

Далее приведены измеренные спектральные характеристики, а также статистические характеристики, полученные в результате обработки измеренных временных реализаций, хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого в кольцевой системе с линией задержки на основе связанных ферромагнитных пленок при различных уровнях усиления кольца  $G$ <sup>1</sup>. Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные характеристики, полученные для кольца с линией задержки на основе одиночной пленки ЖИГ. Установлено, что в обоих случаях при малых  $G$  ( $G \sim 2-3$  dB) на частоте одной из кольцевых мод наблюдается генерация узкополосного хаотического сигнала, обусловленная стохастической автомодуляцией магнитоэлектрических волн параметрически возбуждаемыми спиновыми волнами и нелинейностью генератора, приводящей к нелинейному преобразованию циркулирующего в кольце многочастотного сигнала с близко расположенными по частоте спектральными компонентами [7]. С увеличением  $G$  ( $G > 3$  dB) в кольце формируется широкополосный многочастотный сигнал, частотные составляющие которого соответствуют собственным модам системы, но являются „зашумленными“ в узкой полосе частот  $\sim 10-20$  MHz за счет указанного выше механизма. Дальнейшее увеличение  $G$  ( $G > 9$  dB) в случае использования линии задержки с двумя связанными пленками приводит к перекрытию спектров мод и к генерации широкополосного хаотического сигнала с непрерывным спектром (рис. 2, а). Данный эффект возникает, когда интегральная мощность сигнала в кольце на входе линии задержки соответствует уровню  $P_{in}$ , при котором на динамической характеристике линии с двумя связанными пленками наблюдается падающий участок (рис. 1). В случае одиночной пленки при увеличении  $G$  не наблюдается

<sup>1</sup> По аналогии с работой [7] будем считать, что уровень  $G = 0$  соответствует условию возникновения в кольце монохроматической генерации СВЧ-сигнала.



**Рис. 2.** Спектры мощности широкополосного хаотического сигнала, генерируемого в кольцевой системе: *a* — с двумя связанными ферромагнитными пленками при  $G = 18.4$  dB; *b* — с одной ферромагнитной пленкой при  $G = 10.5$  dB. В обоих случаях уровень интегральной мощности генерируемого в кольце сигнала на входе линии задержки составляет величину +20 dBm.

перекрытия спектров собственных мод системы. Спектр такого многочастотного сигнала является дискретным в широкой полосе частот (рис. 2, *b*), однако сам СВЧ-сигнал является при этом хаотическим

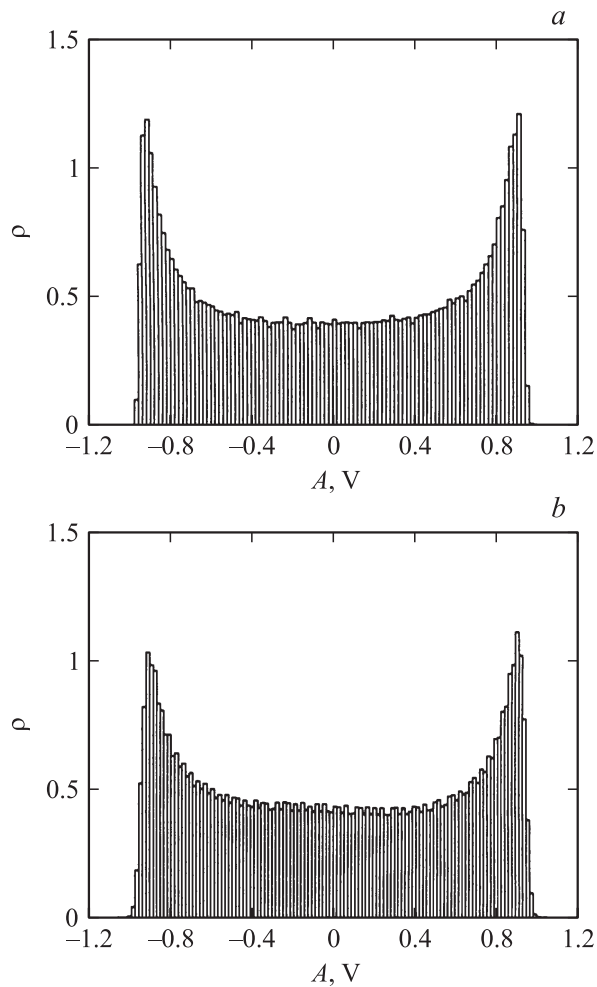
в связи с „зашумленностью“ в узкой полосе частот каждой из его частотных составляющих<sup>2</sup>.

Из сравнения спектров мощности двух хаотических сигналов (сплошного и дискретного) видно, что за полосой возбуждения ООМСВ ( $f > 2440$  МГц) выделенные частоты, соответствующие собственным модам кольцевой системы, в обоих случаях практически совпадают между собой, а величина межмодового расстояния составляет величину  $\Delta f \sim 40$  МГц. Однако в полосе возбуждения ООМСВ ( $f < 2400$  МГц) у хаотического сигнала со сплошным спектром величина межмодового расстояния уменьшается до  $\Delta f \sim 20$  МГц. Данный факт обусловлен тем, что в автоколебательной системе со связанной структурой генерируются два различных спектра кольцевых мод, один из которых формируется за счет быстрой, а другой за счет медленной ООМСВ. Перекрывание этих спектров и приводит к уменьшению межмодового расстояния в полосе возбуждения ООМСВ, что в свою очередь способствует формированию непрерывного спектра у хаотического сигнала.

На рис. 3 приведены распределения плотности вероятности амплитуд широкополосных хаотических СВЧ-сигналов с непрерывным (рис. 3, *a*) и дискретным (рис. 3, *b*) спектрами. Из представленных результатов следует, что в обоих случаях распределения плотности вероятности амплитуд качественно соответствуют распределению, которое наблюдается у сигнала, представляющего собой гармонический сигнал с мультипликативным шумом слабой интенсивности. При этом на временной реализации генерируемого в кольце СВЧ-сигнала наблюдается чередование областей с ламинарной и турбулентной фазами. Полученный результат позволяет говорить о наличии в исследуемой кольцевой автоколебательной системе перемежаемости, возникновение которой в диапазоне СВЧ впервые наблюдалось в распределенном автогенераторе с запаздыванием, выполненным на основе ЛБВ-усилителя и акустической линии задержки [10]. Необходимо подчеркнуть, что широкополосный хаотический СВЧ-сигнал с непрерывным или дискретным спектром генерируется в определенном интервале значений  $G$ , при которых плотность вероятностей амплитуд может иметь различные законы распределения.

---

<sup>2</sup> 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 было управлять внешним гармоническим сигналом [7].



**Рис. 3.** Распределения плотности вероятности амплитуд широкополосного хаотического сигнала, генерируемого в кольцевой системе: *a* — с двумя связанными ферромагнитными пленками при  $G = 18.4$  dB; *b* — с одной ферромагнитной пленкой при  $G = 10.5$  dB. В обоих случаях уровень интегральной мощности генерируемого в кольце сигнала на входе линии задержки составляет величину +20 dBm.



В заключение отметим, что использование линий передачи на основе связанных ферромагнитных пленок в кольцевых автоколебательных системах существенно расширяет функциональные возможности таких схем, так как связь позволяет эффективно управлять волновыми процессами в пленках, в том числе и нелинейными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 07-02-00639), в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-355.2008.2).

## Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
- [2] *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
- [3] *Анисимова Ю.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н.* и др. // Радиотехника. 2000. № 2. С. 19–25.
- [4] *Marchewka C., Larsen P., Bhattacharjee S.* et al. // Phys. of Plasma. 2006. V. 13. P. 013104.
- [5] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 7. С. 66–72.
- [6] *Mingzhong W., Kalinikos V.A., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 237202.
- [7] *Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 89–98.
- [8] *Мелков Г.А., Шолом С.В.* // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. В. 2(8). С. 712–719.
- [9] *Шараевский Ю.П., Гришин С.В., Малюгина М.А.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14. № 3. С. 34–50.
- [10] *Кац В.А., Трубецков Д.И.* // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. В. 3. С. 116–119.