

05.2:09

Генерация хаотических автосолитонов в активном кольцевом резонаторе с одномерной периодической ферромагнитной микроструктурой

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

Саратовский государственный университет
Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
E-mail: grishfam@sgu.ru

Поступило в Редакцию 9 июня 2011 г.

Наблюдалась генерация хаотических автосолитонов в активном кольцевом резонаторе с одномерной периодической ферромагнитной микроструктурой, состоящей из монокристаллической пленки железо-иттриевого граната, на поверхности которой была сформирована решетка канавок, расположенных перпендикулярно к направлению распространения поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ). Квазипериодическая последовательность хаотических автосолитонов генерировалась в условиях трехмагнотных процессов распада ПМСВ за счет пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн в полосе частот первой запрещенной зоны. Возникновение пассивной синхронизации было обусловлено наличием у линии задержки на ПМСВ насыщающегося поглощения сверхвысокочастотного сигнала в запрещенной зоне.

В настоящее время интенсивно проводятся исследования, направленные на изучение особенностей формирования в нелинейных системах с усилением и потерями локализованных в пространстве или во времени структур, получивших в литературе название диссипативных солитонов или автосолитонов [1]. Данные исследования представляют не только интерес с фундаментальной точки зрения, но и имеют практическую направленность, основанную на использовании таких структур для передачи и обработки информации в телекоммуникационных системах и в первую очередь в оптических линиях связи [2,3].

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) автосолитоны могут формироваться в активных кольцевых резонаторах на основе нелинейных линий передачи с ферромагнитными пленками [4–9]. Как показано в [6–9], в таких системах возможна автономная генерация квазипериодической последовательности солитоноподобных импульсов с хаотическим изменением набега фазы от импульса к импульсу. Данные автосолитоны можно называть хаотическими автосолитонами [8]. Хаотические автосолитоны формируются при выполнении трех необходимых условий: 1) возникновения в ферромагнитной пленке трехмагнанных (3М) процессов распада магнитостатических волн (МСВ), приводящих к хаотизации генерируемого СВЧ-сигнала [10]; 2) наличия частотно-избирательного элемента, осуществляющего частотную фильтрацию спектральных компонент хаотического СВЧ-сигнала; 3) синхронизации частот автомодуляции хаотического СВЧ-сигнала.

В работе [7] генерация хаотических автосолитонов осуществлялась за счет самосинхронизации частот автомодуляции спиновых волн на слабой нелинейности усилителя. В работах [8,9] была осуществлена пассивная синхронизация частот автомодуляции спиновых волн за счет использования в кольце дополнительной нелинейной линии передачи с насыщающимся поглощением, известной как шумоподавитель [11]. Пассивная синхронизация заключается в установлении определенных фазовых соотношений между частотами автомодуляции спиновых волн и в автоматическом выделении частотных составляющих определенной интенсивности за счет наличия в кольце элемента с насыщающимся поглощением [1].

В последние годы наблюдается повышенный интерес к исследованию структур на основе ферромагнитных пленок с периодическими неоднородностями микронных и субмикронных размеров — магнанных кристаллов [12–14]. Магнанные кристаллы, по аналогии с оптическими фотонными кристаллами [15], должны демонстрировать более широкий спектр нелинейных явлений по сравнению с однородными ферромагнитными пленками. Однако к настоящему времени нелинейные процессы в таких структурах исследованы недостаточно. Можно указать лишь отдельные работы в этом направлении, в которых исследовались пороги 3М-процессов распада МСВ (см., например, [16]) или особенности формирования солитонов огибающей в области частот, где 3М-процессы распада МСВ запрещены [17–20].

В данном сообщении приведены результаты генерации хаотических автосолитонов в кольцевом резонаторе с одномерной периодической ферромагнитной микроструктурой на частотах, где 3М-процессы распада МСВ разрешены. В данной работе, в отличие от [8,9], пассивная синхронизация частот автомодуляции спиновых волн осуществляется на частотах первой запрещенной зоны микроструктуры и не требует использования в кольце дополнительного нелинейного элемента с насыщающимся поглощением. Необходимо отметить, что для генерации ультракоротких оптических импульсов в кольцевых резонаторах широко используется пассивная синхронизация мод, возникающая за счет использования нелинейного элемента с насыщающимся поглощением [1]. Однако в отличие от оптических систем в данной работе осуществлена пассивная синхронизация частот автомодуляции хаотического СВЧ-сигнала.

В качестве одномерной периодической ферромагнитной микроструктуры использовалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) шириной 3.5 mm, длиной 10 mm, толщиной $d = 22 \mu\text{m}$ и с намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1680 \text{Gs}$, на поверхности которой вдоль ее короткой стороны методом скрайбирования были сформированы канавки длиной 3.5 mm, шириной $2.8 \mu\text{m}$ и глубиной $0.2 \mu\text{m}$ (см. вставку на рис. 1, *a*). В поперечном сечении канавки имели треугольный профиль с углом $\alpha = 130 \text{deg}$. Период структуры имел значение $T = 200 \mu\text{m}$, а длина всей периодической микроструктуры была 6.2 mm.

Экспериментальный макет линии задержки состоял из входного и выходного микрополосковых преобразователей шириной $30 \mu\text{m}$, закороченных с одного конца и расположенных на расстоянии 4 mm относительно друг друга, и одномерной периодической микроструктуры на основе пленки ЖИГ, которая накладывалась поверх микрополосковых преобразователей. Магнитное поле \mathbf{H}_0 было направлено касательно к поверхности пленки вдоль оси Z . В этом случае в пленке ЖИГ в направлении оси X возбуждалась поверхностная МСВ (ПМСВ). Значение \mathbf{H}_0 подбиралось таким образом, чтобы 3М-процессы распада ПМСВ были разрешены. На рис. 1, *a* приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) линии задержки, измеренная при $H_0 = 149 \text{Oe}$, из которой видно, что центральная частота первой запрещенной зоны f_1 имеет значение $f_1 = 2078 \text{MHz}$, коэффициент ослабления на данной частоте равен $K_1 = -38.9 \text{dB}$, а ширина полосы частот первой запрещенной зоны по уровню -35.9dB имеет значение $\Delta f = 11 \text{MHz}$.

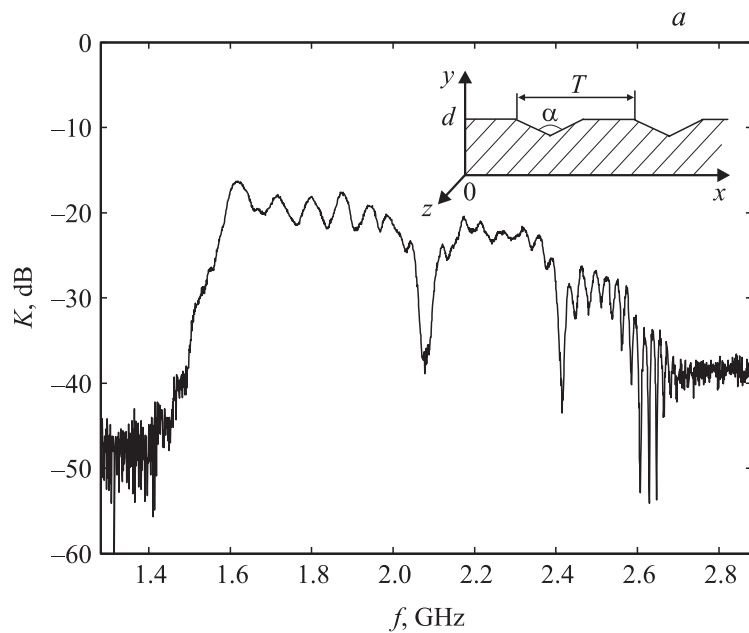


Рис. 1. Характеристики линии задержки с одномерной периодической микроструктурой: АЧХ, измеренная при $P_{in} = -30$ dBm (a); зависимость P_{out} от P_{in} , измеренная на частоте f_1 (b). На вставке (a) показано схематическое изображение одномерной периодической микроструктуры, на вставке (b) показана блок-схема активного кольцевого резонатора.

На рис. 1, b приведена зависимость выходной мощности P_{out} от входной P_{in} исследуемой линии задержки. Из представленных на рис. 1, b результатов следует, что на данной зависимости можно выделить четыре характерные области в зависимости от уровня P_{in} . Первая область наблюдается при $P_{in} < P_{th1} = -19.5$ dBm и соответствует линейному режиму работы линии задержки, а уровень ослабления сигнала в этой области соответствует величине K_1 . При $P_{in} \geq P_{th1}$ (область II) в линии возникают дополнительные нелинейные потери, обусловленные 3M-процессами распада ПМСВ и достигающие максимального значения при $P_{in} = P_{th2} = -2.5$ dBm. Это приводит к ограничению уровня выходной мощности и к появлению участка с

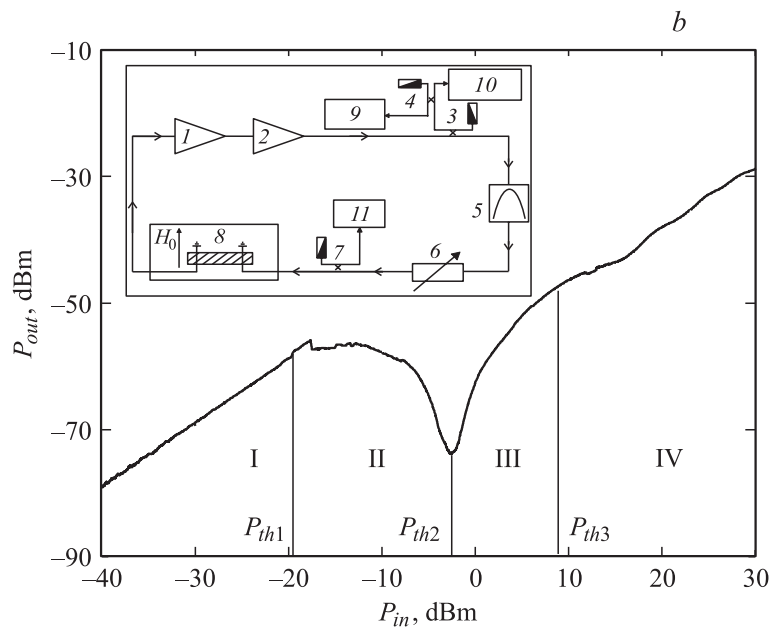


Рис. 1 (продолжение).

отрицательным наклоном. При $P_{in} > P_{th2}$ наблюдается третья область, соответствующая участку с положительным наклоном, на котором уровень ослабления СВЧ-сигнала с увеличением его входной мощности уменьшается (эффект насыщающегося поглощения СВЧ-сигнала) и при $P_{in} > P_{th3} = +9.1$ dBm (область IV) становится постоянным, но остается большим по величине, чем в линейном режиме.

Схема экспериментального макета исследуемой автоколебательной системы представлена на вставке на рис. 1, *b*. Данный макет состоял из последовательно соединенных в кольцо двух СВЧ-усилителей мощности на полевых транзисторах GaAs (1 и 2), объемного резонатора 5, переменного аттенюатора 6 и линии задержки на основе периодической ферромагнитной микроструктуры 8. Транзисторные усилители мощности имели в полосе частот 2–4 GHz значение коэффициента усиления в линейном режиме $K \sim 34$ dB. Использование в схеме двух усилителей

мощности было необходимо для получения суммарного коэффициента усиления более 40 dB на центральной частоте первой запрещенной зоны. Резонатор характеризовался резонансной частотой $f_0 = 2080$ MHz, коэффициентом ослабления на резонансной частоте $K_0 = -2.87$ dB и нагруженной добротностью $Q_L = 520$. При этом полоса частот объемного резонатора полностью попадала в полосу частот первой запрещенной зоны.

СВЧ-сигнал с выхода усилителя 2 через направленные ответвители 3,4 поступал на вход осциллографа реального времени 9 и анализатора спектра 10. Уровень мощности сигнала в кольце регулировался переменным аттенуатором 6 и определялся с помощью измерителя мощности 11, подключенного к системе через направленный ответвитель 7.

В результате проведения экспериментальных исследований было установлено, что при коэффициенте усиления кольца $G = 0$ в системе возникает генерация монохроматического СВЧ-сигнала на частоте одной из кольцевых мод, находящейся в полосе частот объемного резонатора. С ростом G ($G \sim 2-3$ dB) в системе наблюдается типичный сценарий перехода от одночастотной генерации к узкополосной хаотической генерации СВЧ-сигнала, обусловленный механизмом стохастизации автомодуляции спиновых волн [10]. Спектр генерируемого СВЧ-сигнала становится сплошным в полосе частот 10–15 MHz, а огибающая сигнала имеет хаотическое изменение во времени. В этом случае интегральная мощность генерируемого хаотического сигнала на входе линии задержки меньше, чем P_{th2} .

На рис. 2 приведены спектр мощности и временная реализация СВЧ-сигнала, измеренные при $P_{in} > P_{th2}$. При $P_{in} = +4.9$ dBm спектр хаотического СВЧ-сигнала расширяется и занимает полосу частот ~ 40 MHz, в нем жестко (скачком) появляется следующая высокочастотная кольцевая мода, на которой уровень спектральной мощности становится максимальным. Интервал частот между модами имеет величину ~ 10 MHz, что соответствует времени задержки сигнала в кольце $\tau \sim 100$ ns. Каждая из двух мод является „зашумленной“ за счет указанного выше механизма. В этом случае в спектре мощности сигнала на фоне шумоподобного пьедестала возникает сетка частот, а во временной области наблюдается формирование квазипериодической последовательности автосолиитонов с периодом следования $T_r = 1.4-1.5$ μ s, что соответствует значениям

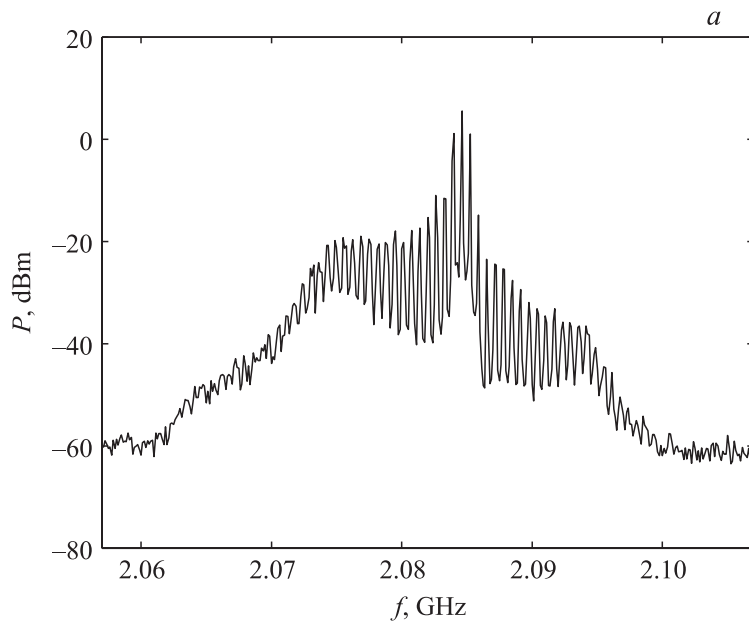


Рис. 2. Спектр мощности (а) и временная реализация (б) СВЧ-сигнала, генерируемого в активном кольцевом резонаторе с одномерной периодической ферромагнитной микроструктурой при $G = 14.2$ dB.

частоты автомодуляции спиновых волн $f_{am} = 650\text{--}700$ kHz, которые определяют интервал между частотами сетки. При этом длительность импульсов T_d , измеренная по половинному уровню от максимального значения СВЧ-сигнала, составляет величину $T_d \sim 0.7 \mu\text{s}$, а скважность $q = T_r/T_d \sim 2$. Поскольку $P_{th2} < P_{in} < P_{th3}$, что соответствует участку с насыщающимся поглощением (рис. 1, б), то это приводит к более сильному ослаблению спектральных компонент малого уровня мощности ($-5.6 \text{ dBm} < P_{in} < +4.9 \text{ dBm}$) относительно спектральных компонент большого уровня мощности ($P_{in} \cong +4.9 \text{ dBm}$). Таким образом, спектральные компоненты многочастотного сигнала будут эффективно ослабляться вблизи от выделенной частоты, где их спектральная мощность будет соответствовать указанному выше интервалу мощностей малого уровня. Данный эффект приводит к

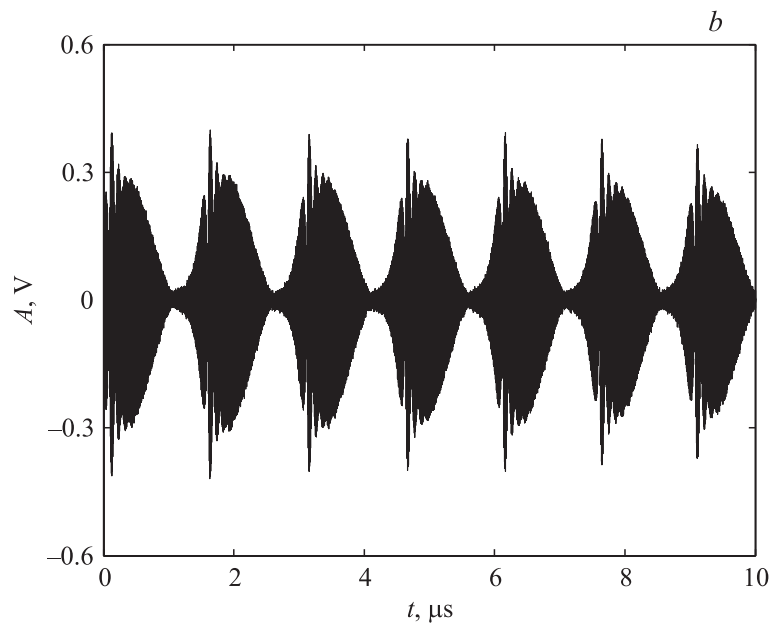


Рис. 2 (продолжение).

пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн двух соседних мод, спектры которых перекрываются.

О хаотической природе автосолитонов свидетельствует наличие у СВЧ-сигнала сплошного спектра и случайного изменения набега фазы огибающей от пика к пику. Для расчета фазы огибающей использовалось преобразование Гильберта, которое применялось к измеренной временной реализации СВЧ-сигнала. На рис. 3 показано изменение набега фазы между соседними пиками огибающей относительно усредненного значения набега фазы, рассчитанное для одной из временных реализаций при данном значении G . Из представленных результатов следует, что набег фазы между соседними пиками огибающей не является постоянным, а имеет случайное изменение от пика к пику. Однако эти флуктуации набега фазы наблюдаются в определенной области, в которой диапазон изменения значений набега фазы составляет

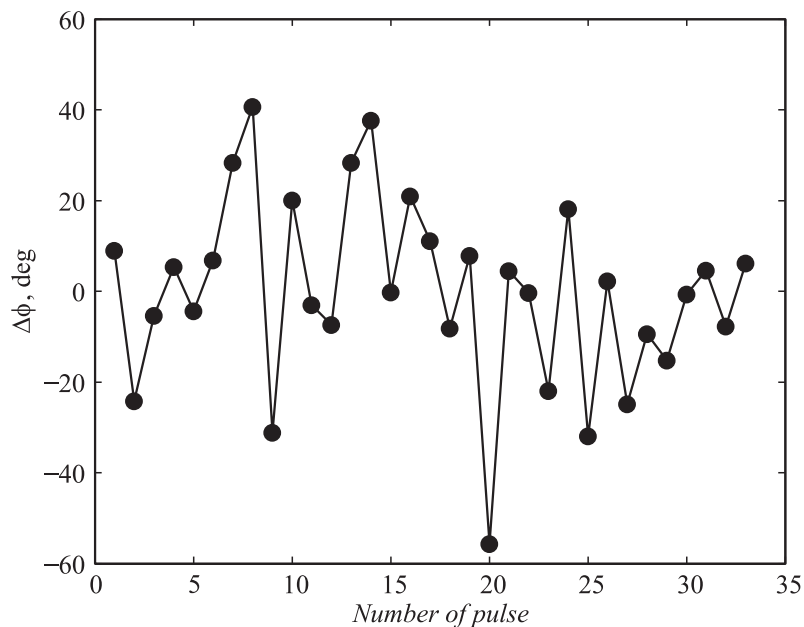


Рис. 3. Зависимость набега фазы между автосолитонами от номера автосолитона.

величину ~ 100 deg. Необходимо отметить, что в отличие от [8,9] механизм пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн наблюдается в более широкой полосе частот, а увеличение G приводит не к уменьшению, а к увеличению T_r и к генерации автосолитонов большой длительности с $T_d \sim 50 \mu s$. Анализ этого эффекта выходит за рамки данного сообщения и будет проведен в другой работе.

В заключение отметим, что у линии задержки на основе одномерной периодической ферромагнитной микроструктуры в полосе частот первой запрещенной зоны, где ЗМ-процессы распада МСВ разрешены, при определенных уровнях мощности входного сигнала наблюдается уменьшение нелинейных потерь, приводящее к эффекту насыщающегося поглощения СВЧ-сигнала. Использование в кольцевом резонаторе линии задержки на основе такой микроструктуры дает возможность одновременно генерировать хаотический СВЧ-сигнал и осуществлять

пассивную синхронизацию его спектральных компонент. Формируемые в этом устройстве хаотические автосолиитоны демонстрируют новые свойства, связанные с увеличением их длительности и периода следования при увеличении усиления кольца. Полученные результаты дают возможность расширить область использования периодических ферромагнитных микроструктур и создавать на их основе источники хаотических СВЧ-импульсов для информационно-телекоммуникационных систем [21].

Работа выполнена в рамках гранта правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (проект 11.G34.31.0030), ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (проект № 14.740.11.1078) и программы Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.1/9525).

Список литературы

- [1] Диссипативные солитоны / Под ред. Н.А. Ахмедиева и А.А. Анкевича. М.: Физматлит, 2008.
- [2] *Agrawal G.* Lightwave Technology. Telecommunication. New Jersey: John Wiley and Sons. Inc., 2005.
- [3] *Ахмедиев Н.Н., Анкевич А.* Солитоны. Нелинейные импульсы и пучки / Пер. с англ. Н.В. Островской. М.: Физматлит, 2003.
- [4] *Kalinikos V.A., Scott M.M., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 20. P. 4697–4700.
- [5] *Scott M.M., Kalinikos V.A., Patton C.E.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 7. P. 970–972.
- [6] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* // ПЖЭТФ. 2008. Т. 88. В. 10. С. 743–747.
- [7] *Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 2. С. 62–69.
- [8] *Grishin S.V., Sharaevskii Yu.P.* // 18th IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. Dresden, Germany. 2010. P. 218.
- [9] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 22. С. 37–44.
- [10] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 8. С. 100–103.
- [11] *Adam J.D., Stitzer S.N.* // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. N 6. P. 485–487.
- [12] *Гуляев Ю.В., Никитов С.А.* // ДАН. 2001. Т. 380. № 4. С. 469–471.

- [13] *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В.* и др. // ПЖЭТФ. 2003. Т. 77. В. 10. С. 670–674.
- [14] *Высоцкий С.Л., Никитов С.А., Филимонов Ю.А.* // ЖЭТФ. 2005. Т. 128. В. 3(9). С. 636–644.
- [15] *Кившарь Ю.С., Агравал Г.П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам / Пер. с англ. под ред. Розанова Н.Н. М.: Физматлит, 2005.
- [16] *Высоцкий С.Л., Кожеевников А.В., Казаков Г.Т.* и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 3. С. 58–73.
- [17] *Chen N.-N., Slavin A.N., Cottam M.G.* // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. N 14. P. 8667–8671.
- [18] *Устинов А.Б., Григорьева Н.Ю., Калиникос Б.А.* // ПЖЭТФ. 2008. Т. 88. В. 1. С. 34–39.
- [19] *Дроздовский А.В., Черкасский М.А., Устинов А.Б.* и др. // ПЖЭТФ. 2010. Т. 91. В. 1. С. 17–22.
- [20] *Ustinov A.B., Kalinikos B.A., Demidov V.E., Demokritov S.O.* // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. P. 180406.
- [21] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.