

11

## **Генерация диссипативных структур в кольцевых автоколебательных системах при параметрическом взаимодействии спиновых волн**

© С.В. Гришин, В.Н. Скороходов, Ю.П. Шараевский

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

Поступило в Редакцию 14 ноября 2013 г.

Наблюдалась генерация квазипериодической последовательности импульсов в кольцевой автоколебательной системе с резонансным усилителем и ферромагнитной пленкой в условиях трехволнового параметрического взаимодействия спиновых волн. Установлено, что генерируемые импульсы являются аналогом диссипативных светлых солитонов, которые формируются в результате конкуренции между усилением и потерями, а также временной дисперсией и нелинейностью. Для описания механизма формирования таких структур предложена модель в виде трех параметрически связанных дифференциальных уравнений с усилением и дифференциального уравнения линейного осциллятора. При определенных предположениях модель имеет аналитические решения во времени в виде структур с профилем, аналогичным профилю светлых солитонов.

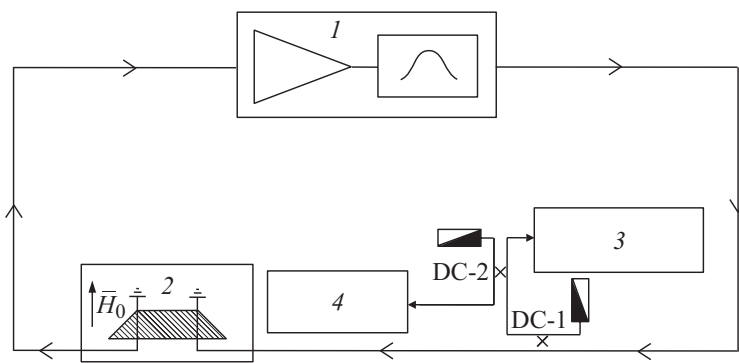
Диссипативные солитоны представляют собой новую парадигму, которая активно развивается в последние два десятилетия, благодаря новым представлениям в формировании структур за счет потоков энергии [1]. В диапазоне сверхвысоких частот диссипативные солитоны наблюдаются в кольцевых автоколебательных системах на основе ферромагнитных пленок [2–6]. Ферромагнитная пленка представляет собой нелинейную распределенную среду, в которой могут формироваться солитоны огибающей за счет конкуренции между пространственной дисперсией магнитоэлектрической волны (МЭВ) и нелинейностью пленки при наличии в ней четырехволновых процессов [7]. В кольцевых автоколебательных системах потери МЭВ компенсируются за счет усиления системы, что приводит к формированию стационарных после-

довательностей диссипативных солитонов, профиль которых аналогичен профилю светлых или темных солитонов [2,3].

Помимо четырехволновых процессов в ферромагнитной пленке могут развиваться и трехволновые параметрические процессы, которые являются причиной генерации в автоколебательной системе периодических структур в виде релаксационных колебаний [8]. Такие структуры формируются на частоте МСВ за счет конкуренции между усилением и нелинейными потерями МСВ, связанными с параметрическим возбуждением спиновых волн на частотах, вдвое меньших частоты МСВ. Длительность релаксационных колебаний как минимум на порядок превышает время обхода сигнала по кольцу, а их формирование наблюдается только при наличии в системе усиления. Как показано в [4,6], использование в автоколебательной системе пассивных резонансных элементов приводит к формированию из релаксационных колебаний стационарной последовательности солитоноподобных импульсов. Однако профиль фазы внутри таких диссипативных структур не является постоянным, поэтому генерируемые в [4,6] солитоноподобные импульсы не являются аналогами светлых солитонов.

В настоящем сообщении демонстрируется генерация импульсов, являющихся аналогом диссипативных светлых солитонов, в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой и активным резонансным элементом. Диссипативные структуры генерируются в условиях трехволнового параметрического распада поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) при определенном уровне мощности сигнала в кольце и при нахождении частоты генерации вблизи резонансной частоты активного элемента.

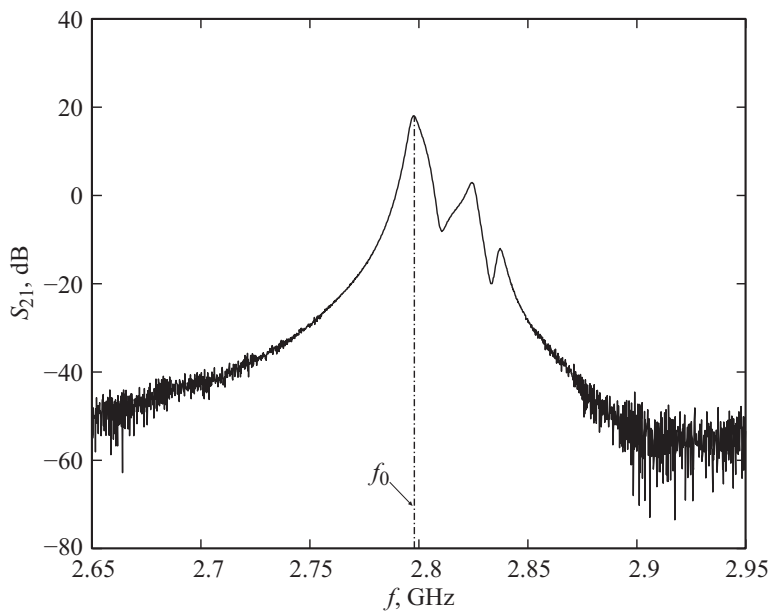
Генерация импульсов осуществляется в кольцевой автоколебательной системе, в цепи обратной связи которой находится спин-волновая линия передачи на ПМСВ (рис. 1). В качестве усилителя используется многорезонаторный пролетный клистрон, обладающий одновременно свойствами активного и резонансного элементов. СВЧ-сигнал выводится из кольца с помощью двух направленных ответвителей DC-1 и DC-2 и поступает на входы анализатора спектра и осциллографа реального времени для анализа и последующей обработки. Спин-волновая линия передачи имеет стандартную конфигурацию линии задержки, в которой для возбуждения приема ПМСВ используются два микрополосковых проводника шириной  $30\ \mu\text{m}$ , находящихся на расстоянии  $3\ \text{mm}$  относительно друг друга. В качестве ферромагнитной пленки используется



**Рис. 1.** Блок-схема кольцевой автоколебательной системы: 1 — клистрон-усилитель, 2 — спин-волновая линия передачи на ПМСВ, 3 — анализатор спектра, 4 — осциллограф реального времени.

пленка железо-иттриевого граната с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1680$  Gs и толщиной  $d = 40 \mu\text{m}$ . Внешнее постоянное магнитное поле  $H_0$  прикладывается параллельно микрополосковым проводникам и имеет значение  $H_0 = 425$  Oe. Усилитель представляет собой пятирезонаторный пролетный клистрон, имеющий резонансную зависимость коэффициента усиления от частоты (рис. 2). Представленная на рис. 2 амплитудно-частотная характеристика клистрона-усилителя характеризуется тремя пиками, один из которых (основной) имеет резонансную частоту  $f_0 = 2798$  MHz, соответствующую центральной частоте клистрона. При проведении эксперимента клистрон-усилитель работает в малосигнальном режиме и осуществляет компенсацию потерь в кольце. Управление режимами генерации СВЧ-сигнала осуществляется с помощью изменения ускоряющего напряжения  $U$  клистрона, приводящего в основном к изменению набега фазы СВЧ-сигнала в кольце и, как следствие этого, к перестройке частоты генерации  $f_{osc}$  относительно центральной частоты клистрона [5]. Данная особенность клистрона позволяет использовать его как электронный фазовращатель.

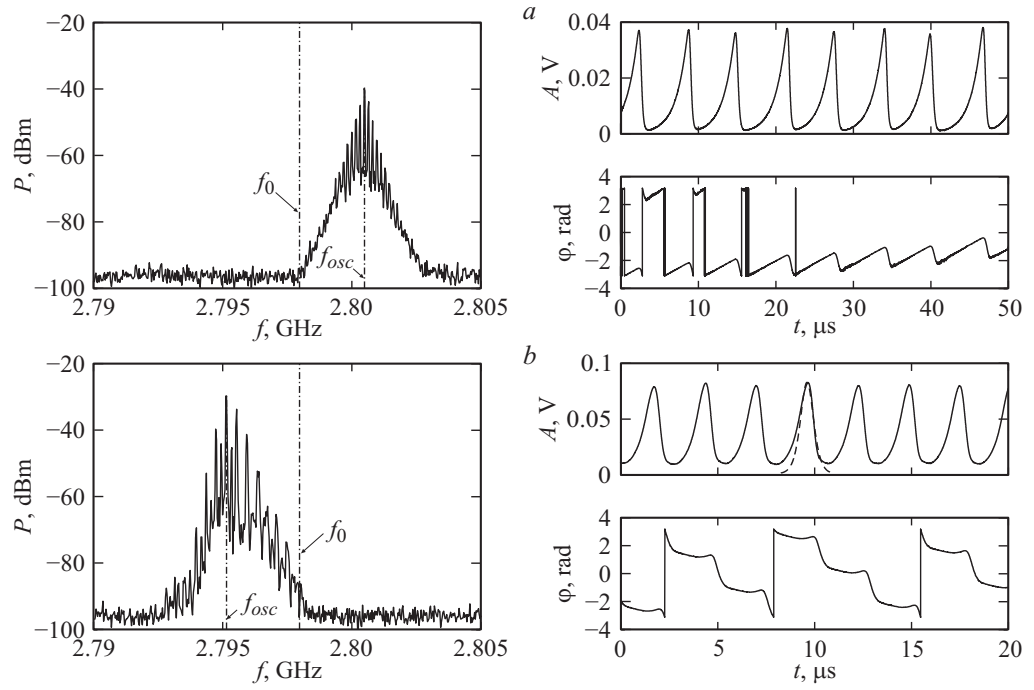
На рис. 3 приведены спектры мощности, а также профили амплитуды и фазы генерируемого сигнала при изменении  $U$ . Профили фазы рассчитываются на основе преобразования Гильберта, применяемого к измеренным временным реализациям. Из представленных на рис. 3 спектров мощности следует, что изменение ускоряющего напряжения



**Рис. 2.** Зависимость модуля коэффициента передачи клистрона-усилителя от частоты, измеренная при токе пучка  $I = 17.25$  mA и  $U = 2023$  V.

клистрона приводит к перестройке частоты генерации  $f_{osc}$  (частоты несущей многочастотного сигнала) относительно центральной частоты клистрона. Одновременно с этим во временной области наблюдаются изменение профиля амплитуды и фазы генерируемых диссипативных структур и переход от квазипериодической последовательности импульсов в виде релаксационных колебаний (рис. 3, *a*) к квазипериодической последовательности солитоноподобных импульсов (рис. 3, *b*). В случае релаксационных колебаний профиль фазы внутри импульсов имеет ярко выраженный экстремум (максимум) и является несимметричным (фаза медленно нарастает на фронте импульса и быстро спадает на его срезе). В случае солитоноподобных импульсов (рис. 3, *b*) профиль фазы внутри импульсов практически не меняется во времени, а профиль амплитуды импульсов становится практически симметричным и близким к профилю диссипативных светлых солитонов.

3\* Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 9



**Рис. 3.** Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка) профиля амплитуды (верхние реализации) и фазы (нижние реализации), полученные при токе пучка  $I = 17.25$  mA и различных значениях ускоряющего напряжения  $U$ :  $a$  — 2115 и  $b$  — 1836 V. Пунктирной линией на временной реализации ( $b$ ) показано солитонное решение  $A = a \operatorname{sch}^2(t)$ , где  $a = 0.0833$  V.

Как следует из рис. 3, *a*, у импульсов в виде релаксационных колебаний при  $\Delta f = f_{osc} - f_0 \approx 3$  МГц частота автомодуляции спиновых волн имеет значение  $f_{am} = 1/T_r = 146\text{--}170$  кГц ( $T_r$  — период следования импульсов), а длительность импульсов  $T_d$ , измеренная по их основанию, практически совпадает с их периодом, т.е.  $T_d \sim T_r = 5.9\text{--}6.8$   $\mu\text{s}$ . Наличие в спектре мощности СВЧ-сигнала шумоподобного пьедестала связано, по всей видимости, с непостоянством периода следования импульсов. Генерация импульсов, являющихся аналогом диссипативных светлых солитонов, наблюдается при  $\Delta f \approx -3$  МГц (рис. 3, *b*). В этом случае уменьшение ускоряющего напряжения приводит к увеличению уровня мощности сигнала в кольце, о чем свидетельствует увеличение частоты автомодуляции спиновых волн  $f_{am} = 375\text{--}399$  кГц. При этом длительность импульсов уменьшается  $T_d = 2.5\text{--}2.7$   $\mu\text{s}$ , однако это значение более чем в 30 раз превышает время обхода сигнала по кольцу ( $\tau_r = 83$  нс). Таким образом, квазипериодическая последовательность импульсов с профилем амплитуды и фазы, близким к профилю диссипативных светлых солитонов, формируется при определенном уровне мощности сигнала в кольце, когда частота генерации находится вблизи центральной частоты клистрона.

Исследуемую автоколебательную систему можно представить в виде последовательно соединенных в кольцо ферромагнитной среды, линейного безынерционного усилителя и линейного осциллятора. Ферромагнитная среда в кольце описывается системой трех параметрически связанных дифференциальных уравнений первого порядка, анализ которой был впервые проведен в [8]. Линейный осциллятор с линейным безынерционным усилителем представляют собой упрощенную модель клистрона-усилителя, работающего в малосигнальном режиме. Для предложенной кольцевой модели имеем систему из четырех дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{m} + \nu m - c_0 b_1 b_2 \exp(-j\delta t) &= Kz, \\ \dot{b}_1 + \alpha_K b_1 - c_1 m b_2^* \exp(j\delta t) &= 0, \\ \dot{b}_2 + \alpha_K b_2 - c_2 m b_1^* \exp(j\delta t) &= 0, \\ \dot{z} + \xi z &= \chi m, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m$ ,  $b_1$  и  $b_2$  — безразмерные медленные комплексные амплитуды намагниченности (ПМСВ) и спиновых волн соответственно;  $z$  — без-

размерная медленная комплексная амплитуда линейного осциллятора,  $K$  — коэффициент усиления,  $\nu$  — постоянная затухания ПМСВ,  $\alpha_k$  — постоянная затухания на частоте  $\omega_k$  спиновой волны,  $\delta = \omega_{osc}/2 - \omega_k$ ,  $\omega_{osc}$  — частота генерации, совпадающая с частотой ПМСВ,  $c_0, c_1, c_2$  — комплексные коэффициенты связи, выражения для которых приведены в [9],  $\xi = \alpha_0 + j(\omega_{osc}^2 - \omega_0^2)/(2\omega_{osc})$ ,  $\alpha_0$  — потери в линейном осцилляторе,  $\omega_0$  — собственная частота линейного осциллятора,  $\chi$  — коэффициент возбуждения линейного осциллятора.

Будем полагать, что амплитуды спиновых волн являются одинаковыми по величине, т.е.  $b_1 = b_2 = b$ . Помимо этого введем следующую замену переменных:

$$m = \hat{m}_0 \exp(j\delta t), \quad b = \hat{b}_0 \exp(j\delta t), \quad z = \hat{z}_0 \exp(j\delta t), \quad (2)$$

где  $\hat{m}_0, \hat{b}_0$  и  $\hat{z}_0$  — комплексные амплитуды ПМСВ, спиновой волны и линейного осциллятора соответственно. С учетом (2) система (1) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{m}}_0 + (\nu + j\delta)\hat{m}_0 - c_0\hat{b}_0^2 &= K\hat{z}_0, \\ \dot{\hat{b}}_0 + (\alpha_k + j\delta)\hat{b}_0 - c_1\hat{m}_0\hat{b}_0^* &= 0, \\ \dot{\hat{z}}_0 + (\xi + j\delta)\hat{z}_0 &= \chi\hat{m}_0. \end{aligned} \quad (3)$$

В режиме большого усиления, когда  $K\hat{z}_0 \gg \dot{\hat{m}}_0$ , в случае малых отстроек спиновых волн от половинного значения частоты генерации  $\delta \sim 0$  и в пренебрежении быстро осциллирующими членами из системы уравнений (3) можно получить уравнение для комплексной амплитуды спиновой волны  $\hat{b}_0$  в виде

$$D_1\dot{\hat{b}}_0 + D_2\hat{b}_0 + D_3b_0 + D_4|b_0|^2b_0 = 0, \quad (4)$$

где  $D_1 = \nu$ ,  $D_2 = \nu(\alpha_k + \xi) - \chi K$ ,  $D_3 = \alpha_k(\nu\xi - \chi K)$ ,  $D_4 = -c_0c_1\xi$ . Выражение (4) содержит кубическую нелинейность, которая является результатом каскадной связи двух квадратичных эффектов в первых двух уравнениях системы (3) [10], а также временную дисперсию (вторая производная по времени), которая обусловлена присутствием

в кольце линейного осциллятора. При условии, что

$$K = \frac{\nu}{\chi} (\alpha_k + \xi) \quad \text{и} \quad \omega_{osc} = \omega_0, \quad (5)$$

уравнение (4) преобразуется к уравнению с действительными коэффициентами

$$d_1 \ddot{b}_0 - d_2 \dot{b}_0 + d_3 b_0^3 = 0, \quad (6)$$

где  $b_0$  — амплитуда спиновой волны,  $d_1 = D_1$ ,  $d_2 = \alpha_k^2 \nu$  и  $d_3 = \alpha_0 c_0 c_1$ .

Полученное дифференциальное уравнение второго порядка (6) является интегрируемым, а его решение (при условии  $t \rightarrow \infty$   $b_0 = \dot{b}_0 = 0$ ) соответствует светлым солитонам огибающей [11]

$$b_0 = \alpha_k \sqrt{\frac{2\nu}{d_3}} \operatorname{sch}(\alpha_k t). \quad (7)$$

Из системы уравнений (3) можно получить выражение, связывающее комплексные амплитуды ПМСВ и спиновой волны:

$$\hat{m}_0 = \frac{c_0(\xi + j\delta)}{(\xi + j\delta)(\nu + j\delta) - K} \hat{b}_0^2. \quad (8)$$

Из (8) следует, что амплитуда намагниченности пропорциональна квадрату амплитуды спиновой волны и имеет также солитонное решение. Таким образом, генерация светлых солитоноподобных импульсов должна наблюдаться при  $\omega_{osc} = \omega_0$  или при отстройках между этими частотами, гораздо меньших их собственных значений. Это находит свое подтверждение в представленных на рис. 3, *b* результатах, полученных при  $f_{osc} \sim f_0$ .

Таким образом, в работе показано, что кольцевую автоколебательную систему с ферромагнитной пленкой, в которой имеет место параметрический распад ПМСВ, с усилителем и резонансным элементом можно рассматривать как искусственную среду с временной дисперсией и кубической нелинейностью. Использование в кольце активного резонансного элемента позволяет управлять дисперсией кольца и формировать диссипативные параметрические структуры, аналогичные светлым солитонам огибающей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-02-00577), президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-828.2014.2) и в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (задание № 2014/203).



## Список литературы

- [1] *Ахмедиев Н., Анкевич А.* Диссипативные солитоны. М.: Физматлит, 2008.
- [2] *Kalinikos B.A., Scott M.M., Patton C.T.* // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. N 20. P. 4697–4700.
- [3] *Scott M.M., Kalinikos B.A., Patton C.E.* // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. N 7. P. 970–972.
- [4] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2008. Т. 88. В. 10. С. 743–747.
- [5] *Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Шараевский Ю.П.* // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. В. 2. С. 62–69.
- [6] *Grishin S.V., Beginin E.N., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A.* // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 103. P. 022408.
- [7] *Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.Н.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1983. Т. 38. В. 7. С. 343–347.
- [8] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // *ЖТФ.* 1999. Т. 69. В. 8. С. 100–103.
- [9] *Grishin S.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., Romanenko D.V.* // *IEEE Trans. on Magnetics.* 2013. V. 49. N 3. P. 1047–1054.
- [10] *Кившарь Ю.С., Агравал Г.П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам / Пер. с англ. под ред. Н.Н. Розанова. М.: Физматлит, 2005.
- [11] *Уизем Д.* Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.