

**Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Скороходов В.Н.,
Трубецков Д.И., Шараевский Ю.П.**

*Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского*

Диссипативные спин-волновые солитоны в микроволновых генераторах на основе вакуумных элементов с насыщающимся поглощением

В работе приводятся экспериментальные результаты, демонстрирующие генерацию пространственно-временных диссипативных хаотических солитонов огибающей спиновых волн в кольцевой автоколебательной системе с мультинелинейной ферромагнитной пленкой, клистроном-усилителями и насыщающимся поглотителем в виде лампы бегущей волны, работающей в режиме подавления Компфнера. Мультинелинейность ферромагнитной пленки обусловлена трех- и четырехволновыми процессами взаимодействия спиновых волн. Показано, что трехволновая параметрическая неустойчивость спиновых волн совместно с временной дисперсией активного кольцевого резонатора приводит к генерации параметрических временных солитонов огибающей микросекундной длительности, имеющих «тонкую» структуру в виде пачек пространственных солитонов огибающей наносекундной длительности. Пассивная хаотическая синхронизация частот автомодуляции спиновых волн с частотами собственных мод кольцевого резонатора обуславливает формирование последовательностей некогерентных импульсов со скважностью $q > 10000$.

Ключевые слова: Диссипативные солитоны, спиновые волны, ЛБВ-подавитель, пассивная синхронизация мод.

Пространственно-временные структуры и хаос являются одними из наиболее распространенных природных явлений, которые наблюдаются в открытых, сильно неравновесных системах, относящихся к различным областям науки: гидродинамике [1], физике плазмы [2], вакуумной электронике [3], химии [4], биологии [5] и др. Оба этих явления являются традиционными объектами исследования в *теории самоорганизации и образования структур* или *синергетике* [6]. Среди локализованных в пространстве и/или во времени структур выделяются солитоны – волновые пучки или импульсы со стационарным профилем, которые формируются в слабо диссипативных (консервативных) системах за счет установления баланса между дисперсионным расплыванием/дифракцией и нелинейной фокусировкой [7]. Помимо консервативных систем существуют диссипативные системы с притоком энергии извне и ее оттоком (диссипацией). В таких системах распространяются *диссипативные солитоны* [8], для которых важен баланс как между усилением и потерями, так и между дисперсией и нелинейностью. Если в диспергирующей среде присутствует характерный пространственный масштаб, то она обладает пространственной дисперсией, а сформировавшиеся в такой среде солитоны называются *пространственными солитонами* [9]. В средах с временной (материальной) дисперсией, имеющих характерный временной масштаб, распространяются *временные солитоны* [9].

Известно, что ферромагнитная пленка является мультинелинейной средой, в которой существуют как трех-, так и четырехволновые процессы взаимодействия спиновых волн [10]. Пространственные солитоны огибающей спиновых волн формируются за счет четырехволновых процессов, связанных с кубической (керровской) нелинейностью ферромагнитной среды, и пространственной дисперсии пленки. Ферромагнитная пленка в условиях четырехволнового взаимодействия является аналогом оптической керровской линзы, использование которой в активных кольцевых резонаторах обуславливает пассивную синхронизацию кольцевых мод и генерацию периодических последовательностей пространственных солитонов огибающей [11, 12]. Длительность таких солитонов не превышает их времени прохождения через ферромагнитную пленку и характеризуется значениями порядка десятков наносекунд. Временные солитоны огибающей формируются за счет трехволновой параметрической неустойчивости спиновых волн и временной дисперсии активного кольцевого резонатора, создаваемой различными резонансными элементами [13, 14]. В отличие от четырехволновых пространственных солитонов, параметрические временные солитоны огибающей формируются, как правило, в одномодовом режиме за много проходов сигнала по кольцу, а их длительность определяется временем релаксации спиновых волн с характерными значениями порядка единиц микросекунд.

Хаотические солитоны были открыты в оптических системах [15, 16], после чего обнаружены в генераторах электромагнитных солитонов [17], в ферромагнитных пленках [18] и в активных кольцевых резонаторах на их основе [13], а также в конденсации Бозе-Эйнштейна [19]. В указанных выше работах хаотические солитоны формировались либо за счет пространственной [15, 17-19], либо за счет временной [13, 16] дисперсии среды, вследствие чего являются либо пространственными, либо временными хаотическими солитонами. До настоящего времени хаотические солитоны огибающей спиновых волн формировались в активных кольцевых резонаторах только за счет одного из указанных выше (трехволновых или четырехволновых) нелинейных волновых процессов. В настоящей работе демонстрируется возможность генерации пространственно-временных хаотических солитонов огибающей спиновых волн за счет использования как трех-, так и четырехволновых процессов в ферромагнитной пленке совместно с дополнительным нелинейным элементом, обладающим характеристикой насыщающегося поглотителя. Известно, что насыщающиеся поглотители осуществляют подавление флуктуаций малой амплитуды и используются для пассивной синхронизации мод и генерации когерентных ультракоротких импульсов большой амплитуды в лазерных кольцевых резонаторах [20, 21]. В исследуемом нами спин-волновом кольцевом резонаторе насыщающийся поглотитель осуществляет пассивную хаотическую синхронизацию частот автомодуляции спиновых волн с частотами собственных мод кольцевого резонатора. Результатом такой синхронизации являются последовательности некогерентных импульсов большой амплитуды со скважностью $q > 10^4$, значения которой являются недостижимыми в автогенераторных схемах с пассивной синхронизацией мод за счет керровской нелинейности ферромагнитных пленок.

На рисунке 1 приведено схематическое изображение спин-волнового генератора, в цепи обратной связи которого используются два нелинейных элемента: спин-волновая линия передачи \mathcal{Q} с мультинелинейной ферромагнитной пленкой и лампа бегущей волны (ЛБВ) I , выступающая в роли элемента с насыщающимся поглощением. Спин-волновая линия передачи содержит входной и выходной микрополосковые преобразователи, поверх которых накладывается волновод спиновых волн шириной 4 мм и длиной 10 мм, выполненный на основе пленки железо-иттриевого гранта (ЖИГ) толщиной $d=65$ мкм и намагниченностью насыщения $4\pi M_0=1750$ Гс. Входной преобразователь осуществляет возбуждение МСВ в ферромагнитном волноводе, а выходной преобразователь ее детектирование. Рас-

стояние между микрополосковыми преобразователями L определяет время распространения МСВ в волноводе. При проведении эксперимента $L=7$ мм. Внешнее постоянное магнитное поля H_0 прикладывается касательно к поверхности ферромагнитного волновода и вдоль микрополосковых преобразователей, что обеспечивает возбуждение в пленке ЖИГ поверхностной МСВ (ПМСВ). Значение поля H_0 выбирается таким образом, чтобы трех- и четырехволновые процессы взаимодействия спиновых волн были разрешены. В отличие от спин-волновой линии передачи, ЛБВ является вакуумным устройством, которое может работать как в режиме усиления, так и в режиме подавления сигнала [22]. В основе работы ЛБВ лежит взаимодействие пучка электронов с полем электромагнитной волны, распространяющейся по замедляющей системе. Если скорость электронов немного превосходит фазовую скорость электромагнитной волны, то электроны оказываются в области тормозящих фаз поля. В этом случае происходит перекачка энергии электронного пучка в энергию электромагнитной волны, и ЛБВ работает как усилитель. Если скорость электронов немного меньше фазовой скорости электромагнитной волны, то электроны оказываются в области ускоряющих фаз поля, и энергия электромагнитной волны тратится на ускорение электронов. В этом случае ЛБВ работает как подавитель (режим подавления Компфнера [22]), обладая свойствами насыщающегося поглотителя, возможность использования которого для пассивной синхронизации мод была продемонстрирована теоретически в [23]. Выбор одного из двух указанных выше режимов работы ЛБВ определяется значениями ускоряющего напряжения $U_{ЛБВ}$ и тока пучка $I_{ЛБВ}$. При проведении эксперимента $U_{ЛБВ}=1980$ В и $I_{ЛБВ}=17.3$ мА.

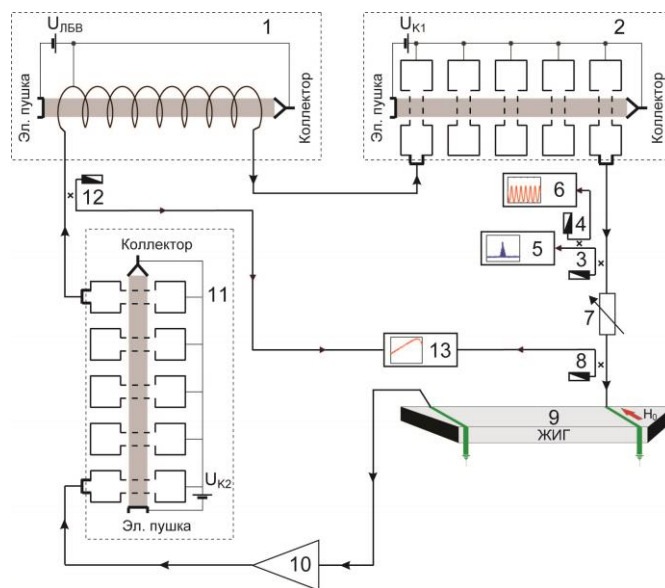


Рис. 1. Схематическое изображение активного кольцевого резонатора.

Для осуществления частотной селекции кольцевых мод и компенсации потерь сигнала в кольце используются вакуумные усилители резонансного типа в виде пролетных пятирезонаторных клистронов 2, 11. В отличие от ЛБВ-подавителя, пролетные клистроны работают в усилительном режиме при взаимодействии пучка электронов с электрическими полями объемных СВЧ-резонаторов. Значение ускоряющего напряжения и тока пучка клистрона $2U_{К1}=1948$ В и $I_{К1}=46$ мА, а соответствующие значения для клистрона 11 - $U_{К2}=2050$ В и $I_{К2}=48$ мА. Для работы ЛБВ в режиме «просветления» большим сигналом, на ее входе совместно с клистроном-услителем 11 используется транзисторный усилитель 10 с коэффициентом усиления $K_T=30$ дБ. Все усилители 2, 10 и 11 работают в малосигнальном

режиме. Генерируемый в кольце сигнал поступает на входы анализатора спектра 5 и осциллографа реального времени 6 через направленные ответвители 3, 4. Уровень мощности сигнала на входах спин-волновой линии передачи и ЛБВ-подавителя контролируется с помощью двухканального измерителя мощности 13, подключенного к кольцу через направленные ответвители 8, 12. Регулировка уровня мощности сигнала на входе спин-волновой линии передачи осуществляется с помощью переменного аттенуатора 7.

На рисунке 2 приведены спектр мощности и временные реализации сигнала, генерируемого в кольцевой автоколебательной системе, когда суммарные потери в кольце полностью компенсируются усилением, т.е. коэффициент усиления кольца $G=0$. Из представленных результатов следует, что при использовании в цепи обратной связи насыщающегося поглотителя в кольце жестко генерируется сигнал на частотах нескольких кольцевых модах. В этом случае спектр сигнала является многочастотным за счет развития в спин-волновой линии передачи трех- и четырехволновых процессов взаимодействия спиновых волн. Четырехволновые процессы обуславливают генерацию сигнала на кольцевых модах, а трехволновые параметрические процессы приводят к появлению в спектре каждой кольцевой моды частот автомодуляции спиновых волн $f_{ам}$ и их гармоник. Значения частот $f_{ам} < 1$ кГц являются нестабильными во времени, что приводит к образованию у сигнала сплошного спектра на частотах каждой кольцевой моды (см. рисунок 2а). Частотный интервал между кольцевыми модами $\Delta f = 3.3 \div 3.8$ МГц определяется временем задержки сигнала в кольце $\tau = 1/\Delta f = 263 \div 303$ нс, которое складывается, в основном, из времени задержки спин-волновой линии передачи (~120 нс), ЛБВ-подавителя и клистронов-усилителей. Во временной (см. рисунок 2б) области наблюдается формирование последовательности микроволновых импульсов, период следования между которыми $T_{r1} \sim 1.7$ мс определяет значение частоты автомодуляции спиновых волн $f_{ам} = 1/T_{r1} \cong 600$ Гц. При детальном рассмотрении микроволнового импульса (см. рисунок 2в) видно, что он имеет «тонкую» структуру, которая представляет собой пачку микроволновых импульсов, каждый из которых имеет длительность $T_d \cong 77 \div 88$ нс, измеренной по половине уровню от максимального значения амплитуды. В этом случае скважность импульсной последовательности $q = T_{r1}/T_d \cong 2 \times 10^4$. Период следования импульсов в пачке есть $T_{r2} = \tau$. На рисунке 2в показаны амплитудные профили импульсов в пачке, на пиковые значения которых наложена «огibaющая», описываемая функцией гиперболического секанса. Здесь же приведены их фазовые профили, полученные с использованием преобразования Гильберта. Видно, что в пачке наблюдается порядка 4-5 импульсов, пиковые значения которых достаточно хорошо ложатся на аппроксимирующую кривую. При этом профили двух импульсов с максимальной амплитудой близки к аналогичным профилям светлого солитона огibaющей. В тоже самое время амплитудные и фазовые профили микроволновых импульсов «тонкой» структуры являются нестабильными во времени, что свидетельствует об их хаотической природе.

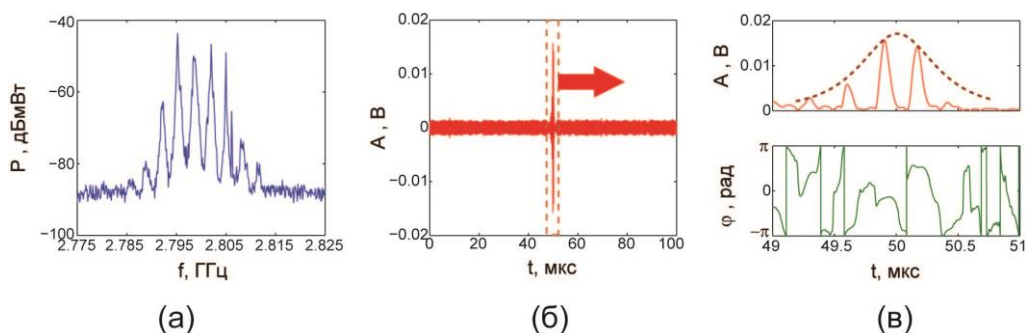


Рис. 2. Спектр мощности (а) и временная реализация (б) генерируемых в системе микроволновых импульсов. На (в) показана «тонкая» структура микроволнового импульса.

В заключении отметим, что предложенный в работе способ формирования импульсных последовательностей большой скважности может быть распространен на автогенераторные схемы с насыщаемыми поглотителями другой физической природы.

Библиографический список

1. A. Kudrolli, J.P. Gollub. Localized spatiotemporal chaos in surface waves // *Phys. Rev. E*. 1996. Vol. 54, No 2. P. R1052.
2. T. Nagasawa. Chaotic phenomena of a periodic ion-acoustic soliton system // *Phys. Plasm.* 1999. Vol. 6, No 9. P. 3471-3476.
3. D.I. Trubetskov, E.S. Mchedlova, V.G. Anfinogentov, et al. Nonlinear waves, chaos and patterns in micro-wave electronic devices // *Chaos*. 1996. Vol. 6, No 3. P. 358-367.
4. W.Y. Tarn, J.A. Vastano, H.L. Swinney, and W. Horsthemke. Regular and chaotic chemical spatiotemporal patterns // *Phys. Rev. Lett.* 1988. Vol. 61, No 7. P. 2163-2166.
5. A.J. Koch and H. Meinhardt. Biological pattern formation: from basic mechanisms to complex structures // *Rev. Mod. Phys.* 1994. Vol. 66, No 4. P. 1481-1507.
6. H. Haken. *Advanced Synergetics*. Berlin, Heidelberg: Springer. 1985.
7. A. Newell, *Solitons in Mathematics and Physics*. New York: SIAM. 1982.
8. N.N. Akhmediev and A. Ankiewicz (Eds). *Dissipative solitons*. Berlin: Springer-Verlag. 2005.
9. Ю.С. Кившарь, Г.П. Агравал. *Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам*. Москва: Физматлит. 2005.
10. В.С. Львов. *Нелинейные спиновые волны*. Москва: Наука. 1987.
11. B.A. Kalinikos, N.G. Kovshikov, C.E. Patton. Self-generation of microwave magnetic envelope soliton trains in yttrium iron garnet thin films // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 80, No 19. P. 4301-4304.
12. B.A. Kalinikos, M.M. Scott, C.E. Patton. Self-generation of fundamental dark solitons in magnetic films // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 84, No 20. P. 4697-4700.
13. Е.Н. Бегинин, С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский. Генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками // *Письма в ЖЭТФ*. 2008. Т. 88, № 10. С. 743-747.
14. S.V. Grishin, E.N. Beginin, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. Dissipative soliton generation in an active ring resonator based on magnonicquasicrystal with Fibonacci type structure // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 103, 022408.
15. S.R. Bolton and M.R. Acton. Quasiperiodic route to chaos in the Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser // *Phys. Rev. A*. 2000. Vol. 62, No 6. P. 063803.
16. N. Akhmediev, J. M. Soto-Crespo, and G. Town. Pulsating solitons, chaotic solitons, period doubling, and pulse coexistence in mode-locked lasers: Complex Ginzburg-Landau equation approach // *Phys. Rev. E*. 2001. Vol. 63, No 5. P. 056602.
17. D. Ham, X. Li, S.A. Denenberg, T.H. Lee, and D.S. Ricketts. Electrical Soliton Oscillator // *IEEE Comm. Mag.* 2006. Vol. 54, No 1. P. 126-135.
18. A.B. Ustinov, V.E. Demidov, A.V. Kondrashov, et al. Observation of the chaotic spin-wave soliton trains in magnetic films // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106, 017201.
19. Q. Zhu, W. Hai, and S. Rong. Transition probability from matter-wave soliton to chaos // *Phys. Rev. E*. 2009. Vol. 80, No 1. P. 016203.
20. S.B. Cho, H. Song, S. Gee, et al. Pulse width and peak power optimization in a mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror // *Microwave and Opt. Technol. Lett.* 2012. V. 54. No 10. P. 2256.
21. T. Hasan, Z. Sun, F. Wang, et al. Nanotube-polymer composites for ultrafast photonics // *Adv. Funct. Mater.* 2009. Vol. 21. P. 3874-3899.
22. R. Kompfner. On the operation of the travelling-wave tube at low level // *J. of the British IRE*. 1950. No 10. P. 283-289.
23. N.S. Ginzburg, G.G. Denisov, M.N. Vilkov, et al. Generation of trains of ultrashort microwave pulses by two coupled helical gyro-TWTs operating in regimes of amplification and nonlinear absorption // *Phys. Plasm.* 2017. V. 24, No 2. P. 023103.