Письма в ЖЭТФ, том 88, вып. 10, с. 743 – 747

Генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками

Е. Н. Бегинин, С. В. Гришин, Ю. П. Шараевский[1)]

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

Поступила в редакцию 29 сентября 2008 г.

Наблюдалась генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в автономной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой и резонатором. Данные импульсы формировались за счет трехволновых параметрических процессов и модуляционной неустойчивости поверхностной магнитостатической волны. На солитоноподобный характер СВЧ импульсов указывает зависимость мгновенной фазы огибающей от времени.

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

Известно, что нелинейность магнитостатических волн (МСВ), возбуждаемых в ферромагнитных пленках, обусловлена, в основном, двумя механизмами, один из которых основан на параметрическом возбуждении магнитостатическими волнами коротковолновых тепловых спиновых волн (СВ) и в настоящее время является достаточно хорошо изученным [1, 2], а другой связан с нелинейностью самой среды, которая при наличии у волны дисперсии может приводить, в частности, к модуляционной неустойчивости МСВ [2, 3]. Необходимо отметить, что второй механизм представляет особый интерес при исследовании нелинейных процессов на МСВ, так как открывает возможности для формирования нелинейных сверхвысокочастотных (СВЧ) импульсов в форме солитонов огибающей [4, 5].

В настоящее время для формирования солитонов огибающей широко используются кольцевые автоколебательные системы с ферромагнитными пленками при возбуждении различных типов МСВ [6 – 13]. Интерес к таким системам обусловлен, прежде всего, тем, что, помимо компенсации потерь у МСВ за счет наличия в кольце активного элемента, использование резонансных свойств кольца дает возможность влиять на характер дисперсии системы, создавая частотные области с различными законами дисперсии [9]. Последнее позволяет выполнять условие модуляционной неустойчивости [3] и возбуждать в кольцевой системе как темные, так и светлые солитоны огибающей на одном и том же типе волны, в частности, на поверхностной МСВ (ПМСВ), являющейся устойчивой вне кольца [3].

В последние годы актуальными являются исследования, направленные на изучение возможности генерации в кольцевых автоколебательных системах коротких хаотических СВЧ импульсов, которые могут найти широкое применение в современных системах связи [14]. Отметим, что полученные в работах [6 – 13] стационарные последовательности солитонов огибающей не являются хаотическими. Можно указать только работу [15], в которой продемонстрирована возможность генерации в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой коротких хаотических спин-волновых импульсов в режиме, когда трех- и четырехволновые процессы, связанные с параметрическим возбуждением в пленке тепловых СВ, разрешены. Однако возможность получения в [15] хаотических спин-волновых импульсов, имеющих солитоноподобный характер, не обсуждалась. О возможности формирования на МСВ случайных уединенных волн в линии передачи с ферромагнитной пленкой без внешней положительной обратной связи было отмечено в [16].

В отличие от указанных выше работ, в настоящем сообщении на основе экспериментальных исследований продемонстрирована возможность формирования в автономной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой и резонатором стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в области частот, где трехволновые параметрические процессы разрешены. Использование резонатора позволяет: во-первых, в отличие от работ [10 – 13], выделить сетку частот, возникающую вблизи одной из собственных мод системы за счет модуляции спиновыми волнами поверхностной МСВ; во-вторых, сформировать узко-

1)e-mail: sharaevskyyp@info.sgu.ru

полосный хаотический сигнал в полосе выделенной сетки частот и увеличить его амплитуду до уровня, превышающего порог модуляционной неустойчивости. Эти условия необходимы для генерации последовательности хаотических СВЧ импульсов, форма огибающей амплитуды которых должна быть близкой к солитонной.

Экспериментальный макет (рис.1) исследуемой автоколебательной системы представлял собой последовательно соединенные в кольцо СВЧ усилитель мощности на GaAs полевых транзисторах *1*, резонатор *2*, переменный аттенюатор *4* и нелинейную линию передачи на ПМСВ *6*. Транзисторный усилитель мощности имел в полосе частот 2 – 4 ГГц значение коэффициента усиления в линейном режиме $K\sim$ 34 дБ. Линия передачи на ПМСВ представляла собой широкополосную линию задержки, которая состояла из двух закороченных с одного конца и разнесенных между собой на расстояние l=3 мм полосковых проводников с шириной w=70 мкм, под которыми располагалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), имевшая следующие параметры: геометрические размеры 6×14×0.04 мм, намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1680$ Гс, параметр потерь $2\Delta H$=0.69 Э. Величина внешнего постоянного магнитного поля H_0 подбиралась таким образом, чтобы возбуждение ПМСВ в пленке ЖИГ происходило на частотах ниже 4.7 ГГц, где трехволновые параметрические процессы для ПМСВ были разрешены. Резонатор характеризовался резонансной частотой f_0 = 2072.4 МГц, ослаблением на резонансной частоте $A_0 = -1.05$ дБ и нагруженной добротностью Q_L = 474.

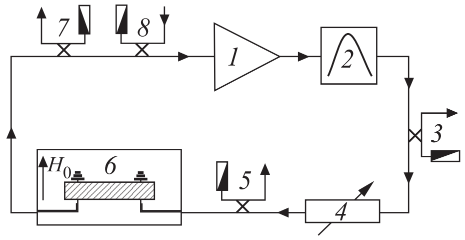

Рис.1. Схема экспериментальной установки

Основная часть мощности сигнала с выхода резонатора возвращалась обратно в кольцо, а меньшая часть мощности поступала в нагрузку (анализатор спектра ESA-E E4402B и осциллограф реального времени Infiniium DSO81004B) через направленный ответвитель *3*. Контроль уровня мощности сигнала на входе линии передачи на ПМСВ осуществлялся с помощью измерителя мощности, подключенного к системе через направленный ответвитель *5*. С помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи Р4-38 и двух направленных ответвителей *7* и *8* были проведены исследования в режиме малого сигнала амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) кольцевой системы, находящейся вблизи порога генерации. Было установлено, что при выбранных параметрах макета на АЧХ системы присутствуют два резонансных максимума, соответствующих двум собственным резонансным модам кольца. Резонансная частота одного из этих максимумов (высокочастотного) имела значение f_{01} = 2078.6 МГц, а другого (низкочастотного) f_{02} = 2065.6 МГц. Время задержки сигнала в кольце составляло величину $\tau\cong$ 77 нс, что соответствовало отстройке по частоте между модами, равной 13 МГц. Локальный минимум на АЧХ кольца, находящийся между двумя максимумами, приходился на частоту f_0 резонатора. Наименьшим коэффициентом ослабления обладала более высокочастотная мода кольца, вблизи частоты которой в дальнейшем и наблюдалась генерация сигнала.

На рис.2 приведены спектры мощности и временные реализации амплитуды СВЧ сигнала, генерируемого в автономной кольцевой автоколебательной системе при различных уровнях усиления в кольце G[2]. При G=0.8 дБ (рис.2a), когда мощность ПМСВ становится больше порога трехволнового взаимодействия, в спектре генерируемого системой монохроматического сигнала возникает сетка частот, частотный интервал между соседними спектральными компонентами которой равен Δf=285 кГц. Появление сателлитов в спектре сигнала связано с амплитудной модуляцией ПМСВ обменными СВ [17 – 19]. При этом на временной реализации сигнала наблюдаются типичные релаксационные колебания, присущие кольцевой системе с ферромагнитной средой в случае трехволнового параметрического взаимодействия [19], с периодом повторения $T=1/\Delta f$=3.5 мкс. Присутствие в спектре мощности сигнала равноотстоящих друг относительно друга по частоте спектральных компонент свидетельствует о наличии в системе фазовой синхронизации спектральных компонент сигнала. При дальнейшем увеличении усиления в кольце наблюдается возрастание Δf и последующее "зашумление" спектра сигнала (рис.2b). В этом случае наблюдается разрушение фазовой синхронизации между спектральными компонентами, что приводит к случайному изменению величины периода T на временной реализации амплитуды сигнала. Необходимо

[2]По аналогии с работой [17] будем считать, что уровень G=0 соответствует условию возникновения в кольце монохроматической генерации СВЧ сигнала

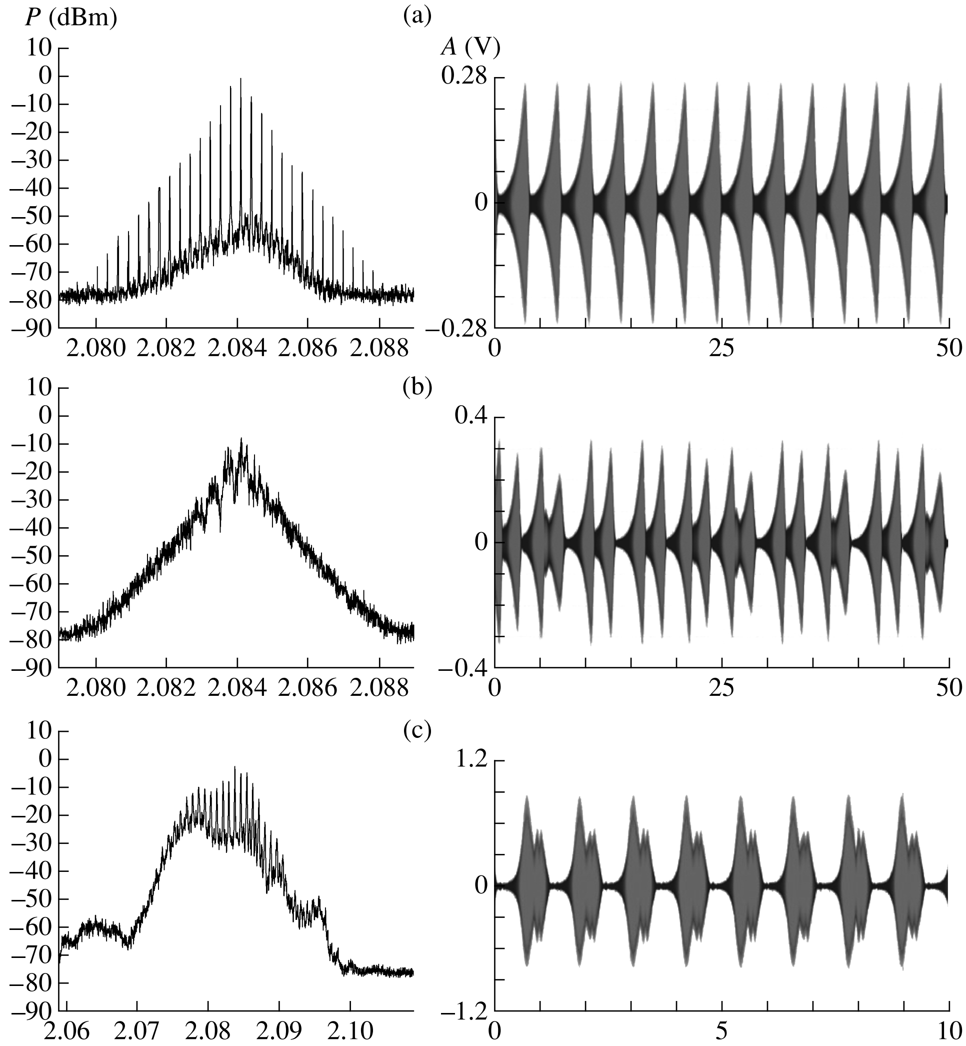

Рис.2. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации амплитуды (правая колонка) СВЧ сигнала, генерируемого в кольце при различных значениях G. (a) $G = 0.8$ дБ; (b) $G = 0.93$ дБ; (c) $G = 5.8$ дБ

отметить, что явление стохастической автомодуляции сигнала в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными средами достаточно хорошо изучено [17 – 19].

Дальнейший рост усиления в кольце приводит к расширению спектра шумоподобного сигнала, что может быть обусловлено развитием четырехволновых параметрических процессов [15]. Начиная с определенных значений G ($G > 2$ дБ), в кольцевой системе формируется стационарная последовательность нелинейных СВЧ импульсов, спектр мощности которой и соответствующая временная реализация при G=5.8 дБ представлены на рис.2c[3]. Подчеркнем, что спектр мощности сигнала в данном случае является практически непрерывным, но в отличие от спектра мощности, представленного на рис.2b, содержит сетку частот, рожденную в результате трехволнового параметрического взаимодействия (см. рис.2a). Частотный интервал между соседними спектральными компонентами сетки на рис.2c равен $\Delta f \sim 825 \div 875$ кГц, что соответствует периоду следования импульсов $T \sim 1.1 \div 1.2$ мкс. Из рис.2c также следует, что во временной области каждый хаотический импульс имеет трехпиковую структуру. При этом первый пик, находящийся на переднем фронте импульса, имеет наибольшую амплитуду по сравнению со значениями амплитуд двух последующих пиков, находящихся на заднем фронте импульса. Первый пик можно рассматривать как основной нелинейный импульс, формирующийся в кольце за счет

[3]Отметим, что стационарная последовательность нелинейных СВЧ импульсов формируется на падающем участке динамической характеристики линии передачи на ПМСВ.

возникновения модуляционной неустойчивости при достижении амплитуды хаотического сигнала значения выше ее порога и имеющий вследствие этого солитоноподобную природу. Два последующих пика на рис.2c образуются в результате прохождения основного импульса через резонатор за счет так называемого "звона", время которого определяется как $\tau_r = 2Q_L/\omega_0 \cong 73$ нс [20], причем длительность обоих пиков практически соответствует этому времени.

Для подтверждения солитоноподобной природы наблюдаемой стационарной последовательности хаотических СВЧ импульсов проведен расчет мгновенной фазы СВЧ сигнала, результаты которого представлены на рис.3 для последовательности из 8 импульсов. Данный расчет проводился на основе изме-

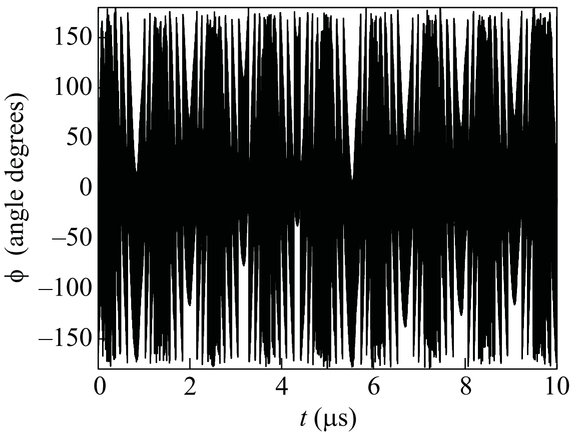

Рис.3. Временная реализация мгновенной фазы последовательности хаотических СВЧ импульсов при G=5.8 дБ

ренной временной реализации амплитуды СВЧ сигнала, к которой применялось преобразование Гильберта, позволяющее определить действительную и мнимую части аналитического сигнала. Следуя работе [21], фазовая характеристика последовательности нелинейных СВЧ импульсов определялась на основе сравнения их мгновенной фазы с мгновенной фазой гармонического (опорного) СВЧ сигнала, соответствующего частоте f_{01}.

Из представленных на рис.3 результатов следует, что мгновенная фаза огибающей последовательности нелинейных импульсов имеет вид, близкий к параболе на переднем фронте каждого импульса вблизи первого пика (основного импульса). Однако значение фазы в минимуме параболы у каждого последующего импульса не соответствует предыдущему, но всегда находится в области положительных значений. Данный вид мгновенной фазы огибающей основного импульса хорошо согласуется с аналогичным профилем мгновенной фазы огибающей импульса, генерируемого в неавтономной кольцевой автоколебательной системе при параметрическом усилении внешней периодической импульсной накачкой пакета обратных объемных МСВ [22 – 24]. При этом авторы указанных выше работ говорят о солитоноподобной природе генерируемой последовательности нелинейных импульсов.

Следует особо подчеркнуть, что наблюдаемые в нашем случае солитоноподобные импульсы, в отличие от работ [22 – 24], формируются в автономной кольцевой автоколебательной системе за счет модуляционной неустойчивости ПМСВ, причем СВЧ колебания внутри этих импульсов являются хаотическими. О хаотической природе СВЧ колебаний свидетельствуют результаты, приведенные на рис.4, где показано распределение вероятностей мгновен-

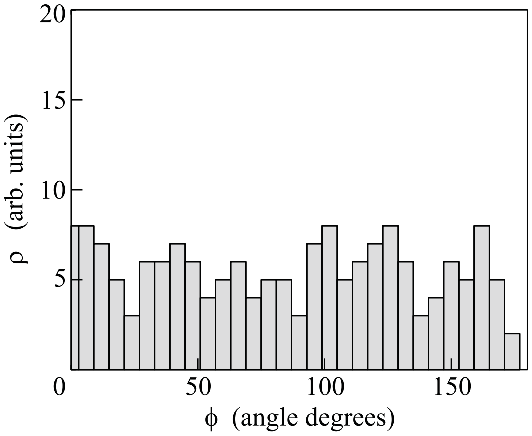

Рис.4. Распределение вероятностей фаз хаотических СВЧ импульсов при G=5.8 дБ

ных значений фазы колебаний в минимумах парабол для последовательности из 168 нелинейных импульсов. Из представленных на рис.4 результатов следует, что вероятностная характеристика имеет закон распределения, близкий к равновероятному.

Таким образом, нами продемонстрирована возможность формирования в автономной кольцевой автоколебательной системе, содержащей резонатор и ферромагнитную пленку при возбуждении в ней ПМСВ, стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов. Целесообразность дальнейших исследований в этом направлении будет продиктована поиском путей управления характеристиками таких СВЧ импульсов, например, за счет изменения добротности резонатора.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 08 – 02 – 00102), гранта президента РФ (# МК – 1320.2007.9), в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект # НШ – 355.2008.2), а также программы федерального агентства по образованию РФ и АФГИР "Фундаментальные исследования и высшее образование" (грант # Y4 – P – 06 – 02)

---

1. A. G. Gurevich and G. A. Melkov, *Магнитные колебания и волны*, М.: Наука, 1994.
2. P. E. Wigen, *Nonlinear phenomena and chaos in magnetic materials*, World Scientific Publisher, Singapore, 1994.
3. A. K. Zvezdin and A. F. Popkov, ЖЭТФ **84**, 606 (1983).
4. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, and A. N. Slavin, ЖЭТФ **94**, 159 (1988).
5. M. Chen, M. A. Tsankov, J. M. Nash, and C. E. Patton, Phys. Rev. Lett. **70**, 1707 (1993).
6. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, and C. E. Patton, Phys. Rev. Lett. **78**, 2827 (1997).
7. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, and C. E. Patton, Phys. Rev. Lett. **80**, 4301 (1998).
8. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, and C. E. Patton, Письма в ЖЭТФ **68**, 229 (1998).
9. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, and C. E. Patton, Appl. Phys. Lett. **75**, 265 (1999).
10. B. A. Kalinikos, M. M. Scott, and C. E. Patton, Phys. Rev. Lett. **84**, 4697 (2000).
11. M. M. Scott, B. A. Kalinikos, and C. E. Patton, Appl. Phys. Lett. **78**, 970 (2001).
12. B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, M. P. Kostylev, and H. Benner, Письма в ЖЭТФ **76**, 310 (2002).
13. A. V. Kondrashov, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos, and H. Benner, Письма в ЖТФ **34**, 81 (2008).
14. A. S. Dmitriev, B. E. Kyarginsky, A. I. Panas et al., Письма в ЖТФ **29**, 70 (2003).
15. W. Mingzhong, B. A. Kalinikos, and C. E. Patton, Phys. Rev. Lett. **95**, 237202 (2005).
16. W. Mingzhong, P. Krivosik, B. A. Kalinikos, and C. E. Patton, Phys. Rev. Lett. **96**, 227202 (2006).
17. S. V. Grishin, V. S. Grishin, A. E. Hramov, and Yu. P. Sharaevsky, ЖТФ **78**, 89 (2008).
18. V. E. Demidov and N. G. Kovshikov, Письма в ЖЭТФ **66**, 243 (1997).
19. V. E. Demidov and N. G. Kovshikov, ЖТФ **69**, 100 (1999).
20. E. L. Ginzton, *Измерения на сантиметровых волнах*, М.: Иностр. лит-ра, 1960. (E. L. Ginzton, *Microwave measurements*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York-Toronto-London, 1957).
21. J. M. Nash, P. Kabos, R. Staudinger, and C. E. Patton, Appl. Phys. **83**, 2689 (1998).
22. A. A. Serga, M. P. Kostylev, B. A. Kalinikos et al., Письма в ЖЭТФ **77**, 350 (2003).
23. S. O. Demokritov, A. A. Serga, V. E. Demidov et al., Nature **426**, 159 (2003).
24. A. A. Serga, M. P. Kostylev, B. A. Kalinikos et al., ЖЭТФ **129**, 566 (2006).