

Д.В. Романенко, С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский

ФГБОУ ВПО Саратовский государственный

университет имени Н.Г. Чернышевского

Генерация хаотических СВЧ импульсов в активной кольцевой неавтономной системе на основе ферромагнитной плёнки.

В работе приведены результаты экспериментального исследования генерации СВЧ импульсов в неавтономной кольцевой автоколебательной системы на основе ферромагнитной пленки в случае, когда разрешены трехмагنونные процессы распада. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ферромагнитная плёнка, автоколебательная система, хаос, трёхмагنونные процессы

В последние годы интерес вызывают активные кольцевые системы с положительной обратной связью, демонстрирующие хаотическое поведение в диапазоне сверхвысоких частот [1]. Среди указанных систем можно выделить те автоколебательные системы, в которых используются пассивные нелинейные элементы на основе объемных или тонкопленочных ферромагнетиков [2-8]. Нелинейные свойства таких элементов обусловлены тем, что уже при достаточно низких уровнях мощности сигнала в ферромагнетиках происходит параметрическое возбуждение коротковолновых обменных спиновых волн (СВ), приводящее к нелинейным потерям и к стохастической автомодуляции генерируемого сигнала [2, 4-7]. При этом усилитель в таких системах работает в линейном режиме и используется только для компенсации потерь.

Среди генераторов хаотических колебаний особое место занимают системы, которые позволяют генерировать хаотические СВЧ импульсы, поскольку частотная полоса генерируемых хаотических СВЧ импульсов не зависит от длительности импульса. Это позволяет использовать хаотические СВЧ импульсы разной длительности в одной и той же коммуникационной системе с фиксированным частотным диапазоном [1].

В настоящей работе приведены результаты по экспериментальному исследованию генерации хаотических СВЧ импульсов в неавтономной кольцевой автоколебательной системы на основе ферромагнитной пленки в диапазоне сверхвысоких частот. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования на основе модели кольцевой системы, находящейся под внешним воздействием и в которой учитываются трёхмагنونные процессы распада магнитостатической волны (МСВ) в ферромагнитной плёнке.

Экспериментальный макет (см. рис. 1) исследуемой автоколебательной системы представлял собой последовательно соединенные в кольцо широкополосный твердотельный СВЧ усилитель мощности 1 на GaAs полевых транзисторах, объемный резонатор 2, переменный аттенюатор 3 и перестраиваемую магнитным полем широкополосную нелинейную линию задержки на поверхностных магнитостатических волнах (ПМСВ) 4. Внешний сигнал подавался с генератора 7 через направленный ответвитель 5. Сигнал, генерируемый системой, снимался через направленный ответвитель 9 и регистрировался анализатором спектра 10 и осциллографом 11. Параметры кольцевой системы подбирались таким образом, чтобы генерация сигнала на одной из собственных мод кольца осуществлялась в области частот меньших, чем 3 ГГц, где параметрические процессы распада для ПМСВ разрешены [9].

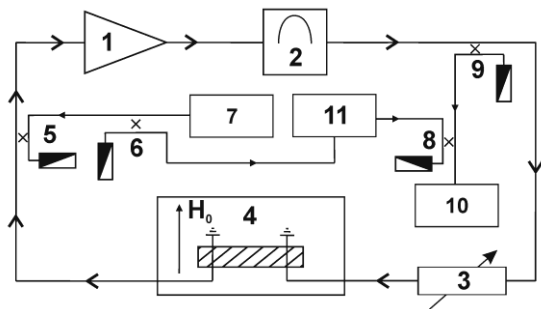


Рисунок 1

В автономном режиме, наблюдалась генерация СВЧ сигнала на частоте $f_0 = 2597$ МГц. Данной частоте в предгенерационном режиме соответствует максимальное значение коэффициента передачи линии задержки. В случае, когда коэффициент усиления кольца $G = 0$ дБ ($G = K - A$, где K - коэффициент усиления усилителя 1, A - величина ослабления в кольце), в системе генерировался

гармонический сигнал. При увеличении коэффициента усиления кольца режим одночастотной генерации сменяется режимом амплитудной автомодуляции сигнала, возникновение которого обусловлено параметрическим возбуждением поверхностной магнитостатической волной коротковолновых спиновых волн на частотах, вдвое меньших частоты ПМСВ, и обратным влиянием спиновых волн на ПМСВ. При значении $G = 0.5$ дБ на осциллограмме СВЧ - сигнала регистрируется последовательности цугов с медленно нарастающей и быстро спадающей амплитудой (релаксационные колебания). Возникновение релаксационных колебаний связано с тем, что амплитуда сигнала экспоненциально растёт за счет наличия активного элемента в кольце, а ограничение экспоненциального роста связано с тем, что нелинейные потери ПМСВ начинают превышать усиление в кольце. За счёт этих процессов происходит резкий спад амплитуды сигнала. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления кольца релаксационные колебания становятся непериодическими, и наблюдается генерация хаотической последовательности СВЧ релаксационных колебаний. Спектр данного сигнала является сплошным с шириной полосы ~ 20 МГц. Следует отметить, что во всех вышеописанных режимах СВЧ усилитель мощности работал в линейном режиме.

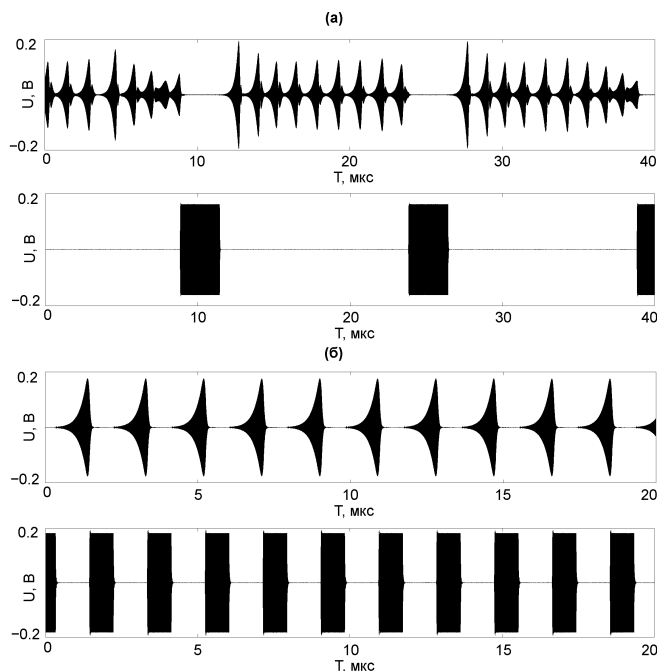


Рисунок 2

При экспериментальном исследовании внешний сигнал подавался за полосу возбуждения МСВ на частоте $f_{ext} = 2.06$ ГГц. На рис. 2 приведены временные реализации мгновенных значений амплитуды СВЧ сигнала, генерируемого в кольце на частоте основной моды, и внешнего СВЧ сигнала, подаваемого в систему при различных значениях периодов внешних радиоимпульсов T_{per} . В случае, когда период внешних СВЧ импульсов значительно превышает собственный временной масштаб системы (см. рис 2 а), на временной реализации наблюдается генерация последовательности релаксационных колебаний (верхний рисунок). Причём первый импульс в последовательности

имеет самую большую амплитуду. Увеличение амплитуды первого из импульсов может быть связано с тем обстоятельством, что внешние СВЧ импульсы прерывали генерацию в кольцевой системе. При этом амплитуды МСВ и СВ спадали до уровня шумов в системе. При начале генерации нового импульса, когда внешнее воздействие отсутствует,

амплитуда генерируемого импульса растёт экспоненциально за счёт усиления в цепи обратной связи до тех пор, пока в ферромагнитной плёнке не возбудятся параметрические спиновые волны. Причём время нарастания первого импульса может быть больше чем в автономном случае, так как данный импульс находится в области переходных процессов. Поэтому пиковая мощность первого импульса в последовательности может превышать среднюю мощность сигнала в установившемся режиме.

Если уменьшить период следования внешних импульсов (см. рис. 2 б), то из импульсов, образованных в переходной области, можно сгенерировать периодическую последовательность релаксационных импульсов. Следует отметить, что в данном случае средняя мощность генерируемого в кольце сигнала P_{pulse} может превышать мощность сигнала генерируемого в автономной системе P_{auto} . На рис. 3 изображена зависимость нормированной мощности сигнала, генерируемая в неавтономной системе P ($P = P_{pulse} / P_{auto}$) в зависимости от средней длительности генерируемого импульса T_{pulse} ($T_{pulse} = T_{per} - T_{ext}$, где T_{ext} - длительность внешнего радиоимпульса).

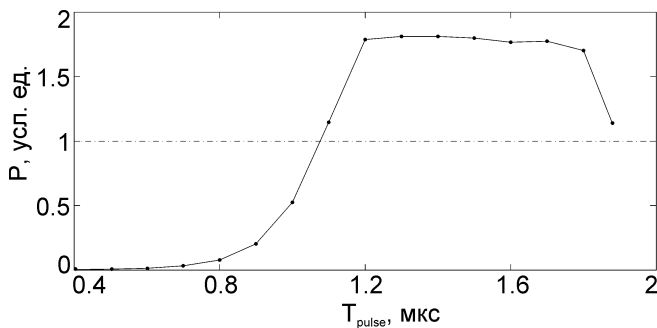


Рисунок 3

При малой длительности генерируемого импульса нормированная средняя мощность сигнала $P \ll 1$. При увеличении длительности импульса средняя мощность растёт и достигает максимума при $T = 1.2$ мкс. Данная длительность соответствует полностью сформированному в системе импульсу (см. рис. 2 б). Следует особо отметить, что при данной длительности

нормированная средняя мощность генерируемого сигнала превышает единицу и равняется $P = 1.87$. Это говорит о том, что мощность генерируемого сигнала в неавтономной системе превышает среднюю мощность сигнала в автономном режиме. При дальнейшем увеличении длительности генерируемого импульса нормированная мощность уменьшается до 1.

Для выяснения механизма генерации импульсов в рассматриваемой схеме использована модель автономной автоколебательной кольцевой системы с ферромагнитной плёнкой [7], в которую добавлено внешнее воздействие. Модель описывает параметрическое трёхволновое взаимодействия ПМСВ накачки $m(t)$ с параметрически возбуждаемыми СВ $b_1(t), b_2(t)$ с учётом влияния внешнего сигнала, частота которого может отличаться от частоты генерируемого сигнала. Система уравнений для описания указанной модели представлена в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= c_0 b_1(t) b_2(t) \exp(-i\delta t) - \alpha m(t) + \gamma [1 - f(m(t-\tau) + A_{ext}(t) \exp(i\chi t))] m(t-\tau); \\ \frac{db_1(t)}{dt} &= c_1 m(t) b_2^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_1(t); \\ \frac{db_2(t)}{dt} &= c_2 m(t) b_1^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где δ - отстройка частоты СВ от половинной частоты МСВ; ν - коэффициент затухания спиновых волн; γ - линейный коэффициент усиления; τ - задержка в цепи

обратной связи; f - функция, характеризующая нелинейность усилителя; α - коэффициент линейного затухания магнитостатической волны, $A_{ext}(t)$ - амплитуда внешнего воздействия, χ - расстройка между частотой внешнего воздействия и частотой МСВ.

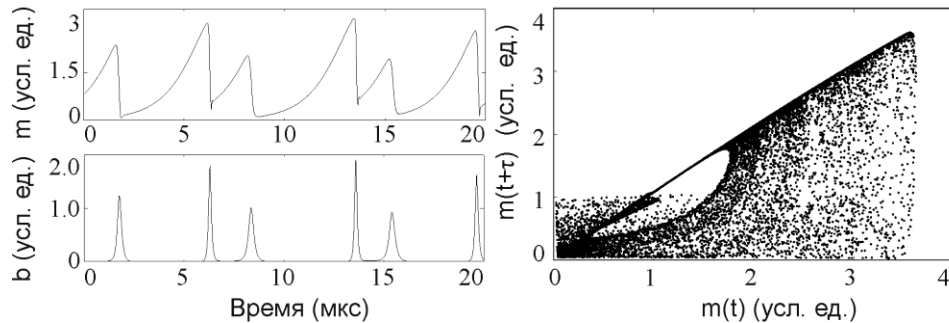


Рисунок 4

Система дифференциальных уравнений (1) решалась методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Коэффициенты в уравнениях были рассчитаны для параметров экспериментального макета по формулам приведённым в [7] и были равны: $\delta = 0.2$ МГц, $\nu = 7$ МГц, $\alpha = 7$ МГц, $\tau = 95$ нс, $c_0 = 1162$ МГц, $c_1 = c_2 = 750$ МГц, $\chi = 100$ МГц. Начальным был выбран режим генерации хаотической последовательности релаксационных колебаний, наблюдаемый при коэффициенте усиления $G' = 1.99$ дБ ($G' = 20(\gamma - \alpha)\tau \lg(e)$). На рис. 4 изображены модули комплексных амплитуд огибающих МСВ $m(t)$ и СВ $b(t)$ (слева), а также фазовый портрет МСВ (справа) в автономном режиме. Хаотическая природа генерируемой последовательности колебаний подтверждается расчётом старшего ляпуновского показателя по алгоритму Бенеттина [10]. Известно, что наличие положительного старшего ляпуновского показателя свидетельствует о наличии неустойчивости или хаоса в динамической системе [11]. Для представленного случая старший ляпуновский показатель равнялся $\Lambda = 0.88$.

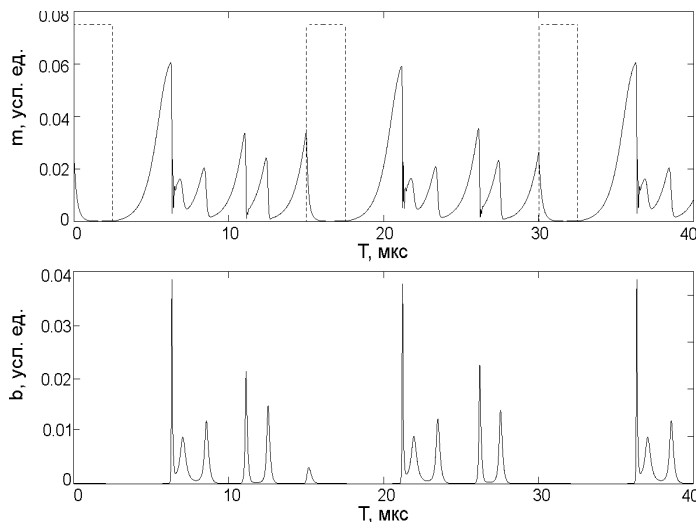


Рисунок 5

Так как внешние радиоимпульсы подавались на вход усилителя вне полосы возбуждения МСВ, а после усилителя отфильтровывались объемным резонатором, то можно учитывать только их влияние на коэффициент усиления. Последнее означает, что в момент подачи внешнего импульса уменьшается коэффициент усиления кольца и генерация может прекратиться. На рис. 5 приведены временные зависимости модуля комплексной амплитуды ПМСВ (сверху сплошной кривой), амплитуды огибающей внешнего радиоимпульса (сверху пунктиром) и модуля комплексной амплитуды параметрической СВ при длительности внешнего радиоимпульса $T_{ext} = 2.5$ мкс и периодом между импульсами $T_{per} = 15$ мкс.

В момент подачи внешнего импульса коэффициент усиления кольца становится меньше уровня потерь в системе и генерация сигнала прекращается. При этом амплитуды

огибающих МСВ и СВ уменьшаются экспоненциально. При достижении МСВ порогового уровня мощности при параметрических процессах первого порядка генерация СВ происходит через некоторый промежуток времени, как видно из рис. 5. За счёт более позднего процесса возбуждения спиновых волн, амплитуда первого импульса может в несколько раз превышать последующие, что приводит к увеличению средней мощности сигнала.

Заключение

В работе приведены результаты экспериментального исследования генерации СВЧ импульсов в кольцевой автоколебательной системе на основе ферромагнитной пленки в случае, когда разрешены трехмагنونные процессы распада. Внешний импульсный сигнал позволяет управлять периодом генерации импульсов и увеличить мощность генерируемого сигнала. Результаты численного моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ (проект 11.G34.31.0030) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00057).

Библиографический список

1. Дмитриев А.С. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи./ Дмитриев А.С., Панас А.И./ - М.: Физматлит. – 2002.
2. Кондрашов А.В. Автогенерация хаотического СВЧ сигнала в активных колцах на основе ферромагнитных пленок/ Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А., Benner H. / - Письма в ЖТФ. - 2008. - Т. 34. - № 11. - С. 81-87.
3. Wu M. Excitation of chaotic spin waves through modulational instability/ Wu M., Hagerstrom A.M., Eykholt R., Kondrashov A., and Kalinikos B.A. / - Phys. Rev. Letters. - 2009. - Vol. 102, - article 237203-1 – 237203-4.
4. Гришин С.В. Генерация широкополосного хаотического сигнала в автоколебательной системе с нелинейной линией передачи на магнитостатических волнах/ Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П. / - ЖТФ. 2008. - Т. 78. - № 5. - С.89-98.
5. Кондрашов А.В. Управляемая генерация хаотического СВЧ-сигнала в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн/ Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А. / - Письма в ЖТФ. - 2010. - Т. 36. - № 5. - С. 62-70.
6. Демидов В.Е. Механизм возникновения и стохастизации автомодуляции интенсивных спиновых волн / Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. / ЖТФ. 1999. Т. 69, № 8. С. 100.
7. Романенко Д.В. Генерация хаотической последовательности свч-импульсов в автоколебательной системе с ферромагнитной плёнкой. - Известия ВУЗов «ПНД». - 2012. - Т. 20. - № 1. - С. 67-74.
8. Sergey V. Grishin Generation of chaotic microwave pulses in ferromagnetic film ring oscillators under external influence / Sergey V. Grishin, Yurii P. Sharaevskii, Sergey A. Nikitov and Dmitrii V. Romanenko / - IEEE Transaction on magnetic. - 2013. - VOL. 49, - No. 3. - P 1047-1054.
9. Гуревич А. Г. Магнитные колебания и волны / Гуревич А. Г., Мелков Г. А. / - М.: Физматлит - 1994.
10. G. Benettin Kolmogorov entropy and numerical experiment / G. Benettin, L. Galgani, J. M. Strelcyn / - Phys. Rev. A., - Vol. 14, - No. 6, - pp. 2338-2345.
11. Кузнецов С.П. Динамический хаос. - М.: Физматлит, - 2001.