

09

Генерация хаотических СВЧ-импульсов при пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн в кольцевых автоколебательных системах

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

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

Поступило в Редакцию 24 июня 2010 г.

Впервые наблюдалась пассивная синхронизация частот автомодуляции спиновых волн хаотического сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала в кольцевой автоколебательной системе при использовании в ней нелинейного пассивного элемента с насыщающимся поглощением. Возникновение пассивной синхронизации приводило к генерации периодической последовательности хаотических СВЧ-импульсов со скважностью большей, чем 20. Показана возможность управления периодом следования хаотических СВЧ-импульсов за счет изменения коэффициента усиления кольца.

Известно, что в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) устойчивые образования в виде периодических последовательностей солитоноподобных импульсов могут формироваться в активных кольцевых резонаторах на основе нелинейных линий передачи с ферромагнитными пленками [1–5]. Использование СВЧ-усилителя в таких системах позволяет компенсировать потери магнитоэлектрических волн (МЭВ) в ферромагнитной пленке и получать режимы генерации сигнала с линейчатым спектром, спектральные компоненты которого соответствуют собственным модам кольца. Совместное использование частотной фильтрации, модуляционной неустойчивости и синхронизации кольцевых мод дает возможность реализовать режимы генерации периодических последовательностей как светлых, так и темных солитонов огибающей [1].

Сигнал с линейчатым спектром в активном кольцевом резонаторе с ферромагнитной пленкой может быть сформирован и в режиме одномодовой генерации за счет трехмагнотных (3М) процессов распада МЭВ, приводящих к автомодуляции коротковолновыми спиновыми волнами

магнитостатической волны на частоте сигнала генерации [4,6]. В этом случае спектральные компоненты сигнала соответствуют частотам автомодуляции спиновых волн, а во временной области наблюдаются периодические пульсации огибающей, похожие на релаксационные колебания. Увеличение коэффициента усиления кольца приводит к стохастизации спектра генерируемого СВЧ-сигнала и к разрушению периодической последовательности пульсаций. Однако, как показано в [4,5], использование в кольце активного или пассивного резонатора дает возможность реализовать режим автономной генерации стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ-импульсов. В этом случае спектр сигнала является сплошным, огибающая СВЧ-импульсов периодически изменяется во времени, а СВЧ-заполнение импульсов является хаотическим. Наличие периодичности в следовании СВЧ-импульсов обусловлено, по аналогии с лазерными системами [7], возникновением явления самосинхронизации спектральных компонент сигнала (частот автомодуляции спиновых волн) за счет слабой нелинейности активного элемента [5]. Однако в отличие от [7] исследуемый в [4,5] сигнал является хаотическим.

В настоящей работе впервые осуществлена пассивная синхронизация частот автомодуляции спиновых волн, приводящая к автономной генерации периодической последовательности хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитными пленками. Пассивная синхронизация осуществлялась за счет использования в кольце дополнительного нелинейного элемента в виде линии передачи на поверхностной МСВ (ПМСВ), получившей в литературе название „усилитель отношения сигнал/шум“ [8] или „шумоподавитель“ [9]. Основной особенностью такой линии передачи является то, что сигналы с малым уровнем мощности (ниже порогового значения) ослабляются сильнее, чем сигналы с большим уровнем мощности (выше порогового значения), т.е. наблюдается насыщение поглощения сигнала с увеличением его мощности. Необходимо отметить, что нелинейные элементы с насыщающимся поглощением используются в оптике для осуществления пассивной синхронизации мод, приводящей к генерации ультракоротких импульсов [7].

Экспериментальный макет (рис. 1) представлял собой кольцевую автоколебательную систему, состоящую из двух усилителей мощности на GaAs полевых транзисторах 1, 7, объемного резонатора 2, переменных аттенуаторов 4, 8, нелинейной линии задержки на ПМСВ 6 и шумопо-

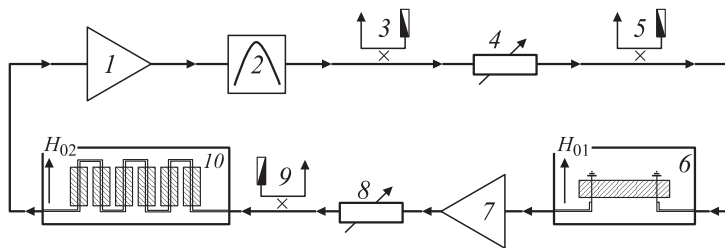


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

давателя на ПМСВ 10. Транзисторные усилители мощности имели в полосе частот 2–4 GHz значение коэффициента усиления в малосигнальном режиме $K \sim 34$ dB. Использование в кольцевой автоколебательной системе двух активных элементов было необходимо для обеспечения уровня мощности сигнала выше порога ЗМ-процессов распада ПМСВ на входе каждой из указанных выше нелинейных линий передачи. Линия задержки на ПМСВ состояла из двух закороченных с одного конца и разнесенных между собой на расстояние $l = 3$ mm проводочных проводников диаметром $w_1 = 70 \mu\text{m}$, под которыми располагалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ). Шумоподавитель на ПМСВ состоял из микрополосковой линии передачи типа „меандр“ с периодом $D = 12$ mm, общей длиной $L = 150$ mm, шириной полосок $w_2 = 500 \mu\text{m}$, поверх которых были наложены пленки ЖИГ. Пленки ЖИГ имели геометрические размеры $4 \times 10 \times 0.04$ mm, намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1680$ Gs и параметр потерь $2\Delta H = 0.69$ Oe. Объемный резонатор характеризовался резонансной частотой $f_0 = 2.8$ GHz, ослаблением на резонансной частоте $A_0 = 1.8$ dB, нагруженной добротностью $Q_L = 560$ и использовался в кольце как для создания условий генерации в полосе частот шумоподавителя, обладающего в линейном режиме характеристикой режекторного фильтра, так и для осуществления частотной фильтрации СВЧ-сигнала на одной кольцевой моде. Величина внешнего постоянного магнитного поля H_0 подбиралась таким образом, чтобы возбуждение ПМСВ в пленках ЖИГ происходило на частотах, где ЗМ-процессы распада ПМСВ были разрешены.

Основная часть мощности сигнала с выхода резонатора возвращалась обратно в кольцо, а меньшая часть мощности поступала на вход анализатора спектра и осциллографа реального времени через

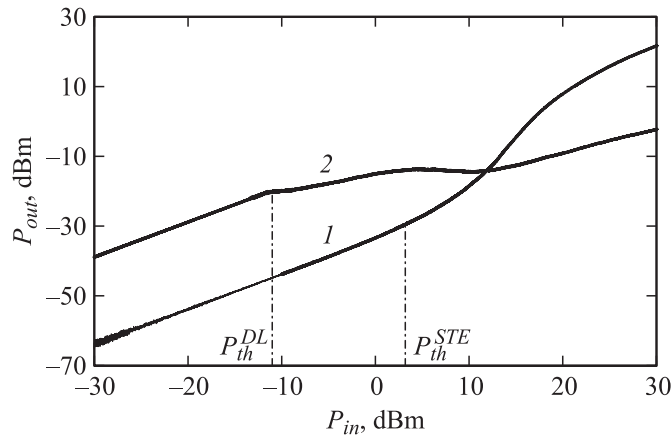


Рис. 2. Амплитудные характеристики шумоподавителя на ПМСВ (кривая 1) и линии задержки на ПМСВ (кривая 2), измеренные при $H_{02} = 270$ Ое и $H_{01} = 415$ Ое соответственно. Штрихпунктирными линиями показаны пороговые значения P_{th}^{STE} , P_{th}^{DL} шумоподавителя и линии задержки соответственно.

направленный ответвитель 3. Контроль уровня мощности сигнала на входе линии задержки и шумоподавителя на ПМСВ осуществлялся с помощью двухканального измерителя мощности, подключенного через направленные ответвители 5 и 9 соответственно.

На рис. 2 приведены амплитудные характеристики (зависимость выходной мощности P_{out} от входной P_{in}) шумоподавителя и линии задержки на ПМСВ, измеренные на частоте f_0 . Из представленных на рис. 2 результатов следует, что СВЧ-сигнал малого уровня мощности ($P_{in} < -5$ dBm), проходя через шумоподавитель, ослабляется на величину $A_{sm} = 34$ dB, а СВЧ-сигнал большого уровня мощности ($P_{in} > +25$ dBm) — на величину $A_{lg} = 9$ dB, т.е. малый сигнал проходит через шумоподавитель с большим ослаблением, чем большой сигнал. Амплитудная характеристика линии задержки на ПМСВ имеет вид, характерный для ограничителя мощности, т.е. СВЧ-сигнал большого уровня мощности ослабляется сильнее, чем малого уровня мощности. Таким образом, у шумоподавителя отношение большой сигнал/малый сигнал на выходе увеличивается по сравнению со входом, а у ограничителя мощности, наоборот, уменьшается. Подчеркнем также, что порог

начала нелинейного режима¹ на амплитудной характеристике шумоподавителя ($P_{th}^{STE} = +3.2$ dBm) имеет величину, на порядок большую, чем у линии задержки ($P_{th}^{DL} = -11$ dBm).

Как показано в [4], в отсутствие в кольце шумоподавителя генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ-импульсов наблюдается при уровне мощности сигнала на входе нелинейной линии задержки, значительно превышающей пороговый уровень мощности P_{th}^{DL} , а частота автомодуляции в этом случае имеет значение $f_{am} \sim 850$ kHz. Использование в автоколебательной системе дополнительного нелинейного элемента в виде шумоподавителя на ПМСВ совместно со вторым усилителем мощности позволит установить такие амплитудные и фазовые условия, при которых генерация сигнала будет возникать при уровнях мощности, соответствующих пороговым значениям P_{th}^{DL} и P_{th}^{STE} на входе линии задержки и шумоподавителя соответственно. В этом случае в системе не будет наблюдаться одночастотного режима, а будет жестко генерироваться амплитудно-модулированный (АМ) сигнал с малым значением частоты автомодуляции спиновых волн ($f_{am} < 100$ kHz).² При этом шумоподавитель на ПМСВ будет выделять у АМ-сигнала только такие частоты автомодуляции, на которых уровень спектральной мощности больше, чем P_{th}^{STE} (пассивная синхронизация спектральных компонент сигнала). Во временной области это приведет к формированию из АМ-сигнала периодической последовательности СВЧ-импульсов, период следования которых T_r будет намного превышать их длительность T_d , т.е. будут генерироваться импульсы с большой скважностью $q = T_r/T_d$. Поскольку период следования СВЧ-импульсов T_r определяется частотой автомодуляции спиновых волн f_{am} , которая, в свою очередь, зависит от коэффициента усиления кольца G [4], то величиной T_r , а следовательно, и q можно управлять за счет изменения величины G .

Так как $T_r \gg \tau$ (τ — время задержки сигнала в кольце) [4], то каждый последующий СВЧ-импульс будет „забывать“, с какого значения мгновенной фазы начиналась генерация предыдущего СВЧ-импульса, и набег мгновенной фазы от импульса к импульсу будет меняться произвольным образом [4], что эквивалентно фазовой модуляции

¹ Порог начала нелинейного режима в обоих случаях определялся по изменению уровня потерь на 1 dB относительно линейного режима.

² Частота f_{am} и коэффициент модуляции АМ-сигнала зависят от коэффициента усиления кольца G и имеют минимальные значения вблизи P_{th}^{DL} .

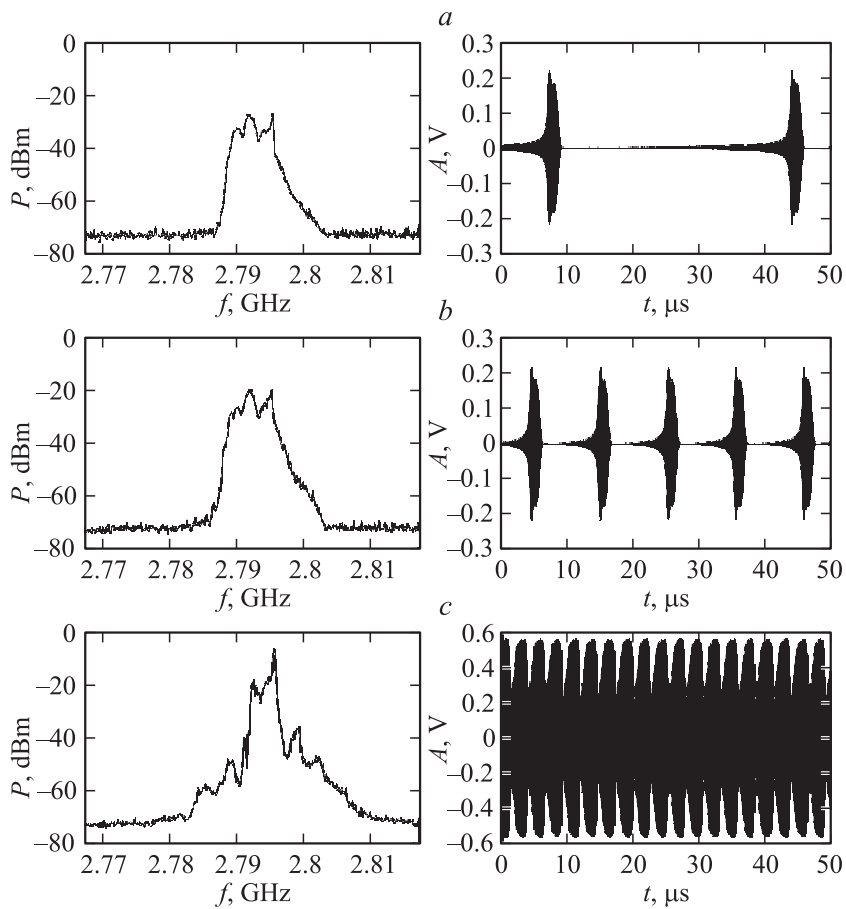


Рис. 3. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка) СВЧ-сигнала, измеренные при $H_{01} = 415$ Ое и различных значениях G и H_{02} : *a* — $G = 0$, $H_{02} = 270$ Ое; *b* — $G = 0.55$ дБ, $H_{02} = 270$ Ое; *c* — $G = 0.55$ дБ, $H_{02} = 0$. Спектрограммы получены при ширине полосы приемника 10 кГц.

СВЧ-сигнала по случайному закону. Спектр такого сигнала будет сплошным, но в нем будут присутствовать выделенные шумоподавителью компоненты со строго определенными частотами, уровень спектральной

мощности которых больше, чем P_{th}^{STE} . Таким образом, генерируемая периодическая последовательность импульсов будет иметь хаотическое СВЧ-заполнение.

На рис. 3 приведены спектры мощности и временные реализации СВЧ-сигнала, измеренные при различных значениях коэффициента усиления кольца G . При $G = 0$ (рис. 3, *a*) в системе начинается генерация СВЧ-сигнала на частоте кольцевой моды, практически совпадающей с частотой f_0 . Спектр такого сигнала является сплошным (рис. 3, *a* — левая колонка), а во временной области наблюдается периодическая последовательность СВЧ-импульсов с $T_r = 36.8 \mu s$ ($f_{am} = 27.2 \text{ kHz}$) и длительностью $T_d = 1.42 \mu s$, измеренной по половинному уровню от максимального значения СВЧ-сигнала A_{max} (рис. 3, *a* — правая колонка). В этом случае $q = 26$.

С увеличением G (рис. 3, *b*) спектр сигнала практически не изменяется, а во временной области наблюдается уменьшение периода следования импульсов до $T_r = 10.3\text{--}10.42 \mu s$, что соответствует увеличению частоты автомодуляции до $f_{am} = 95.9\text{--}97.1 \text{ kHz}$. При этом длительность импульсов практически не изменяется ($T_d = 1.29 \mu s$), что приводит к уменьшению скважности до $q \approx 8$.

На рис. 3, *c* приведены результаты, полученные в отсутствие возбуждения ПМСВ в шумоподавитель ($H_{02} = 0$), но при том же значении G , что и в предыдущем случае (рис. 3, *b*). Как видно из рис. 3, *c*, спектр хаотического СВЧ-сигнала, в отсутствие механизма насыщающегося поглощения, становится шире спектра, представленного на рис. 3, *b*, а во временной области наблюдается исчезновение периодической последовательности СВЧ-импульсов при данном значении G .

В заключение отметим, что исследования механизма пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками представляют интерес в плане изучения возможности генерации более коротких хаотических СВЧ-импульсов. Данный эффект может быть получен, например, в случае многомодовой хаотической генерации в широкополосных автоколебательных системах при осуществлении пассивной синхронизации частот автомодуляции спиновых волн на нескольких кольцевых модах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-02-00102) и Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1/235)

Список литературы

- [1] *Scott M.M., Kalinikos B.A., Patton C.E.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 7. P. 970–972.
- [2] *Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А., Веннер Н.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 11. С. 81–87.
- [3] *Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 5. С. 62–70.
- [4] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* // Письма ЖЭТФ. 2008. Т. 88. В. 10. С. 743–747.
- [5] *Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 2. С. 62–69.
- [6] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 8. С. 100–103.
- [7] *Диссипативные солитоны* / Под ред. Н.А. Ахмедиева, А.А. Анкевича. М.: Физматлит, 2008.
- [8] *Adam J.D., Stitzer S.N.* // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. N 6. P. 485–487.
- [9] *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. 320 с.