

09

Генерация хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой системе на основе клистронного усилителя мощности и нелинейной линии задержки на магнитостатических волнах

© С.В. Гришин, Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков,
В.Н. Скороходов, Ю.П. Шараевский

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

Поступило в Редакцию 9 июля 2009 г.

Приведены результаты экспериментального исследования автономной генерации стационарной последовательности хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой автоколебательной системе с нелинейной линией задержки на поверхностной магнитостатической волне и многорезонаторным клистронным усилителем мощности, работающим в малосигнальном режиме. Продемонстрирована возможность управления характеристиками генерируемых хаотических СВЧ-импульсов с помощью тока пучка и ускоряющего напряжения клистрона.

Известно, что автоколебательные системы с внешней запаздывающей обратной связью могут демонстрировать различные режимы генерации, включая хаотический [1]. Хаотическая генерация в таких системах обусловлена в основном зависимостью амплитудных и фазовых характеристик нелинейного элемента от уровня мощности входного сигнала. В диапазоне СВЧ в качестве нелинейного элемента традиционно выступают вакуумные усилители мощности либо усилители мощности твердотельной природы. Однако в качестве нелинейного элемента для указанных целей могут использоваться пассивные устройства магнитоэлектроники, являющиеся многофункциональными [2]. В этом случае активный элемент служит лишь для компенсации потерь в кольце, а хаотическая генерация обусловлена в основном нелинейностью пассивного элемента.

В частности, в работе [3] было показано, что в автономной кольцевой автоколебательной системе с усилителем мощности на

основе полевых транзисторов возможна генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ-импульсов при наличии в цепи внешней обратной связи нелинейной линии задержки на поверхностной магнитостатической волне (ПМСВ) и объемного пассивного резонатора. Использование резонатора позволяет выделить одну из собственных мод кольца, на которой за счет нелинейности автогенератора формируется СВЧ-сигнал с линейчатым спектром, что приводит к появлению во временной области периодической последовательности СВЧ-импульсов. Формирование СВЧ-сигнала с линейчатым спектром обусловлено амплитудной модуляцией магнитостатической волны параметрически возбуждаемыми спиновыми волнами [4,5] и нелинейным преобразованием такого амплитудно-модулированного сигнала на усилителе мощности. В работах [6,7] сигнал с линейчатым спектром формировался за счет одновременного прохождения двух СВЧ-сигналов с близкими частотами через линию задержки на МСВ и использовался для получения СВЧ-импульсов в виде солитонов огибающей МСВ.

Для использования описанного выше генератора хаотических СВЧ-импульсов в системах прямохаотической передачи информации [1] интерес представляют исследования, направленные на выяснение возможности управления характеристиками генерируемых импульсов (длительностью, периодом повторения и др.) с помощью изменения параметров используемого в кольце резонансного элемента (резонансной частоты, добротности и др.). В этом случае в качестве резонансного элемента удобно использовать, например, клистронный усилитель мощности, который обладает резонансной зависимостью коэффициента усиления от частоты и возможностью электронного управления этой зависимостью путем изменения тока пучка и ускоряющего напряжения. Кроме того, как было показано в [8], при определенных значениях тока пучка и ускоряющего напряжения зависимость выходной мощности от входной у клистронного усилителя является нелинейной, что приводит к возникновению падающего участка на его динамической характеристике. В этом случае автоколебательная система, содержащая клистронный усилитель мощности и цепь внешней положительной обратной связи, демонстрирует режимы хаотической генерации СВЧ-сигнала, возникновение которых определяется только нелинейностью клистрона [8].

В настоящем сообщении впервые продемонстрирована автономная генерация стационарной последовательности хаотических СВЧ-импульсов в автоколебательной системе с клистронным усилителем мощности

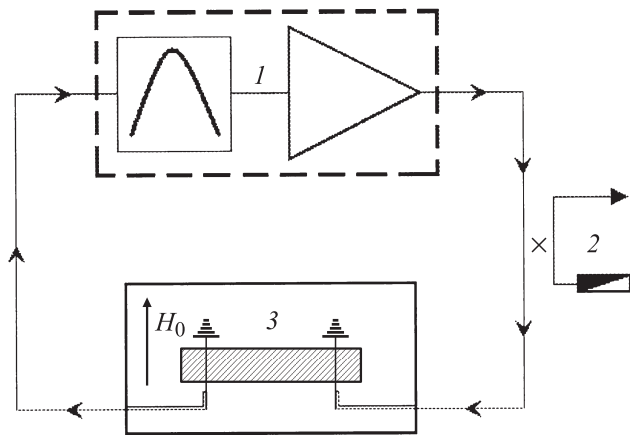


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

при использовании в цепи внешней обратной связи нелинейной линии задержки на ПМСВ и показана возможность управления длительностью и формой хаотических СВЧ-импульсов с помощью изменения тока пучка и ускоряющего напряжения клистрона. При этом клистронный усилитель мощности работал в малосигнальном режиме.

Экспериментальный макет исследуемой автоколебательной системы (рис. 1) представлял собой последовательно соединенные СВЧ-усилитель мощности 1 в виде пятирезонаторного пролетного клистрона средней мощности типа КУ-134Е и широкополосную нелинейную линию задержки на ПМСВ 3, которые были замкнуты в кольцо для реализации внешней положительной обратной связи. Часть мощности с выхода усилителя мощности возвращалась обратно в кольцо, а другая часть мощности через направленный ответвитель 2 поступала на вход анализатора спектра ESA-L E4408B (9 kHz–3 GHz) и осциллографа реального времени Infiniium DS081004B с полосой пропускания 10 GHz.

Проведенные с помощью анализатора цепей ENA-L E5062A (200 kHz–3 GHz) измерения зависимости коэффициента усиления клистрона от частоты при уровне входной мощности на клистроне $P_{in} \sim 1 \mu\text{W}$ показали, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

клистронного усилителя мощности имела вид многорезонансной кривой¹ с выделенной частотой $f_0 = 2798$ МГц, на которой значение коэффициента усиления $K_0 \sim 20$ dB при токе пучка $I \sim 20$ mA и ускоряющем напряжении $U \sim 2$ kV. Значения тока пучка и ускоряющего напряжения выбирались таким образом, чтобы полоса пропускания клистрона Δf по уровню 3 dB составляла величину $\Delta f < 7$ МГц², а сам клистрон при использовании его в кольце работал в малосигнальном режиме.

Линия задержки 3 представляла собой планарную микрополосковую конструкцию, в которой использовалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) с намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1680$ Gs, геометрическими размерами $6 \times 10 \times 0.04$ mm и параметром потерь $2\Delta H = 0.69$ Oe. Внешнее постоянное магнитное поле H_0 прикладывалось касательно к поверхности пленки ЖИГ так, что в ней возбуждалась ПМСВ. Величина поля H_0 выбиралась таким образом, чтобы нижняя частотная граница полосы возбуждения ПМСВ находилась вблизи частоты f_0 ($H_0 = 425$ Oe). При выбранном значении H_0 параметрические процессы первого порядка, связанные с возбуждением поверхностной МСВ тепловых спиновых волн на частотах, вдвое меньших частоты СВЧ-сигнала, были разрешены [9].

На рис. 2 приведены экспериментальные результаты, полученные в случае, когда величина ускоряющего напряжения была фиксированной $U = 2023$ V и изменялся только ток пучка клистрона. При токе пучка $I = 15$ mA в кольце генерировался монохроматический сигнал на частоте кольцевой моды, близкой к частоте f_0 . Увеличение тока пучка приводило к увеличению коэффициента усиления клистрона и, как следствие этого, к возрастанию уровня мощности сигнала на входе нелинейной линии задержки на ПМСВ. В результате этого режим одночастотной генерации сменялся режимом генерации СВЧ-сигнала с линейчатым спектром, а затем режимом узкополосной хаотической генерации, которая наблюдалась в полосе частот ~ 5 МГц (рис. 2, *a* — левая колонка). Возникновение линейчатого спектра и последующая ха-

¹ Присутствие на АЧХ клистрона нескольких резонансных пиков обусловлено использованием в клистроне пяти резонаторов с разными резонансными частотами.

² Ширина полосы частот пятирезонаторного клистронного усилителя мощности выбиралась таким образом, чтобы нагруженная добротность эквивалентного колебательного контура имела величину $Q_L > 400$, при которой в эксперименте с пассивным объемным резонатором наблюдалась генерация стационарной последовательности хаотических СВЧ-импульсов [3].

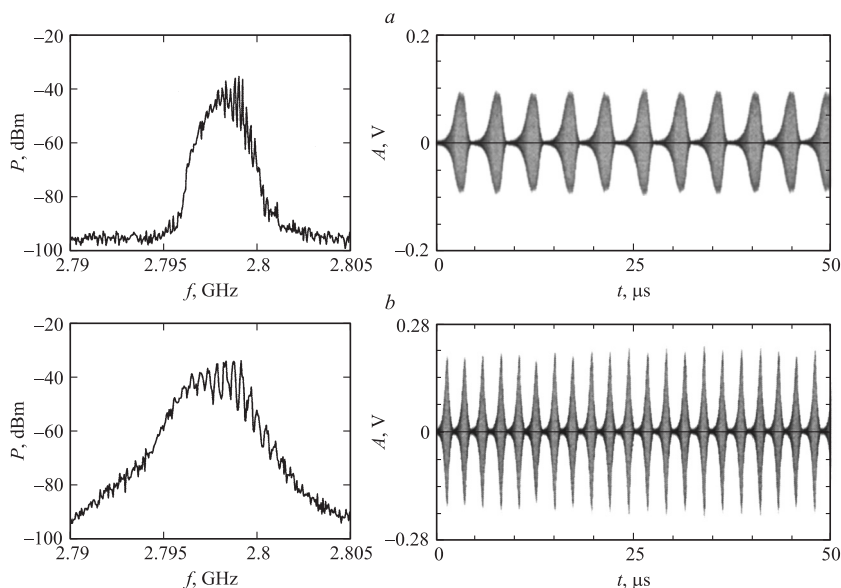


Рис. 2. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка) хаотического СВЧ-сигнала при $U = 2023$ В и различных значениях I : a — 16.5 мА; b — 19.5 мА.

отизация СВЧ-сигнала обусловлены в основном нелинейностью линии задержки на ПМСВ. В этом случае поверхностная МСВ, возбуждаемая в ферромагнитной пленке на частоте СВЧ-сигнала, является неустойчивой и возбуждает тепловые спиновые волны на вдвое меньших частотах. Как известно [5], процесс параметрического распада МСВ на спиновые волны (параметрические процессы первого порядка) приводит к амплитудной модуляции параметрически возбуждаемыми волнами генерируемого в кольце СВЧ-сигнала, который, проходя через усилитель мощности, обогащается новыми спектральными компонентами. Такая модуляция в общем случае является стохастической в связи с нестабильностью во времени амплитуд возбуждаемых спиновых волн [4]. Следует отметить, что клистронный усилитель мощности при выбранных значениях тока пучка и ускоряющего напряжения имел коэффициент усиления $K_0 \sim 10$ дБ и ширину полосы пропускания,

равную $\Delta f = 4.3$ МГц. Во временной области (рис. 2, *a* — правая колонка) наблюдалась генерация стационарной последовательности хаотических СВЧ-импульсов, период следования которых составлял величину $T_r \cong 4.7 \mu\text{s}$, что соответствовало частоте автомодуляции $f_{am} \cong 220$ кГц. При этом длительность импульсов составляла величину $T_d \sim 3 \mu\text{s}$.

С увеличением тока пучка спектр хаотического СВЧ-сигнала расширялся и при $I = 19.5$ мА занимал полосу частот ~ 15 МГц (рис. 2, *b* — левая колонка). В этом случае, как и на рис. 2, *a*, в спектре хаотического сигнала на фоне шумового пьедестала наблюдалась сетка выделенных частот, расстояние между которыми соответствовало частоте автомодуляции. Во временной области период следования и длительность импульсов уменьшались до $T_r \cong 2.45 \mu\text{s}$ и $T_d \sim 2 \mu\text{s}$ соответственно (рис. 2, *b* — правая колонка), а частота автомодуляции увеличивалась до $f_{am} \cong 410$ кГц. При дальнейшем увеличении тока пучка ($I > 20$ мА) клистрон начинал работать в режиме больших входных сигналов, что приводило, во-первых, к автомодуляции СВЧ-сигнала за счет наличия падающего участка у клистрона [8], а во-вторых, к уменьшению коэффициента усиления клистрона на частоте f_0 . В этом случае в спектре хаотического сигнала вблизи частоты f_0 регистрировались шумоподобные автомодуляционные составляющие, отстоящие от частоты f_0 на величину $\sim 3\text{--}4$ МГц [8], и возникала генерация хаотического СВЧ-сигнала на частоте соседней кольцевой моды, отстоящей от частоты f_0 на величину ~ 12 МГц. В результате этого стационарная последовательность хаотических СВЧ-импульсов разрушалась.

На рис. 3 представлены результаты, полученные при изменении ускоряющего напряжения и фиксированном токе пучка $I = 21.5$ мА. Следует отметить, что в предыдущем случае при данной величине тока пучка и $U = 2023$ В генерируемые хаотические СВЧ-импульсы являлись нестационарными по амплитуде. Из представленных на рис. 3 результатов следует, что увеличение ускоряющего напряжения ($U > 2023$ В) приводило к установлению стационарной последовательности хаотических СВЧ-импульсов³. При этом наблюдалась перестройка по частоте спектра хаотического СВЧ-сигнала в более высокочастотную область, что обусловлено изменением фазовых условий генерации в полосе частот клистрона. На временной реализации было

³ Данный факт можно объяснить работой клистронного усилителя мощности в мало-сигнальном режиме при выбранных значениях тока пучка и ускоряющего напряжения.

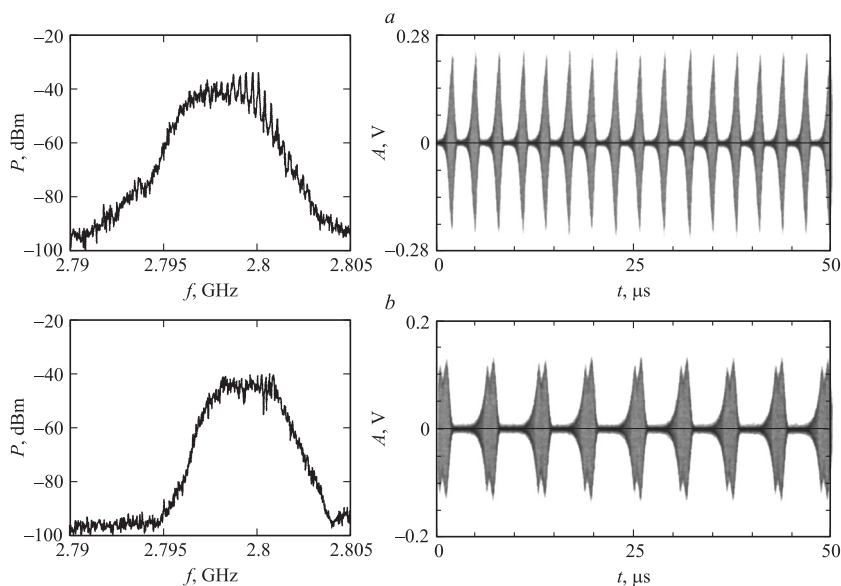


Рис. 3. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка) хаотического СВЧ-сигнала при $I = 21.5$ мА и различных значениях U : a — 2066 В; b — 2101 В.

зафиксировано изменение не только значений T_r и T_d , но и формы генерируемых СВЧ-импульсов, что связано с отстройкой частоты генерации от частоты f_0 .

При ускоряющем напряжении $U = 2066$ В (рис. 3, a) спектр мощности хаотического СВЧ-сигнала имел ширину ~ 15 МГц. При этом во временной области $T_r \cong 3 \mu\text{s}$, а $T_d \sim 2 \mu\text{s}$ (частота автомодуляции $f_{am} \cong 333$ кГц). С увеличением ускоряющего напряжения до $U = 2101$ В (рис. 3, b) спектр мощности хаотического СВЧ-сигнала сужался до величины ~ 10 МГц, а длительность импульсов увеличивалась до $T_d \sim 3 \mu\text{s}$. При этом наблюдалось увеличение периода следования импульсов до $T_r \cong 6 \mu\text{s}$, что соответствовало уменьшению частоты автомодуляции до $f_{am} \cong 170$ кГц. Увеличение ускоряющего напряжения также привело к появлению у СВЧ-импульсов двухпиковой структуры (рис. 3, b).

В результате проведенных исследований показана возможность управления параметрами генерируемых хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой схеме с пассивным нелинейным элементом на основе ферритовой пленки и активного резонансного элемента в виде клистронного усилителя мощности. Полученные результаты могут использоваться при создании управляемых источников хаотических СВЧ-импульсов для систем связи нового поколения, основанных на прямохаотической передаче информации [1].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 08-02-00102), Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1/235), в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-355.2008.2), а также программы Федерального агентства по образованию и АФГИР (№ Y4-P-06-02).

Список литературы

- [1] *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
- [2] *Палладий Н.В., Рудый Ю.Б., Яковлев С.В.* // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1996. В. 1(467). С. 3–17.
- [3] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. № 10. С. 743–747.
- [4] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 7. С. 66–72.
- [5] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 8. С. 100.
- [6] *Scott M.M., Kostylev M.P., Kalinikos V.A., Patton C.E.* // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 174440.
- [7] *Wu M., Kalinikos V.A.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. P. 027206.
- [8] *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 7. С. 105–110.
- [9] *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993.