

09

Генерация хаотических СВЧ-импульсов в широкополосной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой под воздействием импульсно-модулированного СВЧ-сигнала

© С.В. Гришин, Е.В. Зарькова, Ю.П. Шараевский

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

В окончательной редакции 10 ноября 2010 г.

На основе экспериментального исследования впервые установлены особенности генерации хаотических сверхвысокочастотных (СВЧ) импульсов в широкополосной кольцевой автоколебательной системе с нелинейной линией задержки на поверхностной магнитостатической волне, полосно-пропускающим фильтром и усилителем мощности на GaAs полевых транзисторах под воздействием внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала, находящегося за полосой генерируемого хаотического сигнала. Показано, что уменьшение скважности внешних СВЧ-импульсов приводит к увеличению скважности хаотических СВЧ-импульсов. Отмечено увеличение интегральной мощности хаотического СВЧ-сигнала под импульсным воздействием по сравнению с автономным режимом генерации.

На сегодняшний день в связи с поиском новых методов передачи информации, основанных на использовании динамического хаоса, интерес представляют исследования, направленные на разработку источников хаотических сигналов в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), в частности хаотических радиоимпульсов [1–4]. Известно [1], что одним из основных преимуществ хаотического радиоимпульса по сравнению с классическим радиоимпульсом является независимость полосы частот хаотического сигнала от длительности радиоимпульса. Указанное обстоятельство позволяет управлять скоростью передачи информации при изменении длительности и периода следования хао-

тических радиоимпульсов, что особенно важно в системах связи, имеющих фиксированную полосу частот.

В настоящее время генерация потока хаотических радиоимпульсов осуществляется за счет модуляции либо параметров генератора хаоса, например питания усилителя мощности на биполярных транзисторах [2], либо хаотического СВЧ-сигнала уже на выходе генератора хаоса, например с помощью электронных ключей [1]. В работах [3,4] предложен другой подход, при котором генерация хаотических радиоимпульсов осуществляется за счет введения в кольцевую автоколебательную систему внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала. Так, в [3] исследовался клистронный автогенератор с внешней запаздывающей обратной связью, который в автономной режиме осуществлял одночастотную генерацию вблизи порога автомодуляции. При подаче в кольцо внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала определенного уровня мощности автогенератор начинал работать в хаотическом режиме в те интервалы времени, на которых присутствовал внешний гармонический СВЧ-сигнал, а на временных интервалах, на которых внешнее воздействие отсутствовало, клистронный автогенератор генерировал гармонический СВЧ-сигнал. В [4] клистронный автогенератор в автономном режиме работал в режиме динамического хаоса, а подача внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала приводила к подавлению хаоса в те интервалы времени, в которых присутствовало внешнее воздействие, и к генерации хаотического сигнала, когда внешнее воздействие отсутствовало. Однако в обоих случаях гармонический сигнал, находящийся во временных интервалах между хаотическими радиоимпульсами, имел значительный уровень мощности, так как присутствовал в полосе хаотического сигнала, определяемой рабочей полосой узкополосного активного фильтра (клистрона).

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования генерации хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой автоколебательной системе с нелинейной линией задержки на поверхностной магнитостатической волне (ПМСВ), полосно-пропускающим фильтром и усилителем мощности на GaAs полевых транзисторах, находящейся под воздействием импульсно-модулированного СВЧ-сигнала. В отличие от [3,4] наличие в кольце нелинейного пассивного элемента на магнитостатических волнах (ПМСВ) приводит к генерации широкополосного хаотического СВЧ-сигнала, а использование сверхширокополосного усилителя мощности дает возможность осуществлять

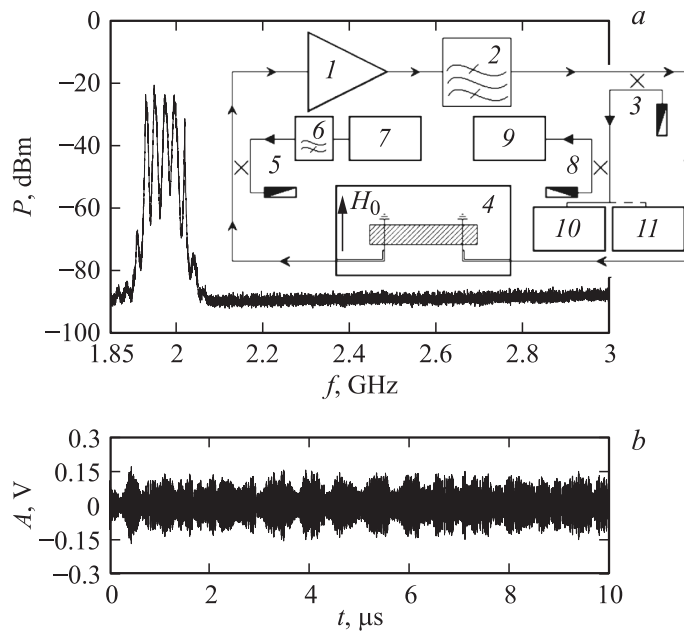


Рис. 1. Спектр мощности (*a*) и временная реализация (*b*) хаотического СВЧ-сигнала автогенератора в отсутствие внешнего воздействия при $H_0 = 158$ Ое. На вставке показана блок-схема автогенератора.

подавление хаоса при отстройках между периодическим и хаотическим СВЧ-сигналами, превышающих ширину полосы частот хаотического сигнала. Последнее обстоятельство позволяет формировать хаотические СВЧ-импульсы с сильно подавленной гармонической составляющей между ними.

Исследуемый автогенератор (см. вставку на рис. 1, *a*) представлял собой последовательно соединенные в кольцо СВЧ-усилитель мощности на GaAs полевых транзисторах *1*, полосно-пропускающий фильтр *2* и линию задержки на ПМСВ *4*. Усилитель обеспечивал в полосе частот 1.8–4.0 GHz коэффициент усиления в линейном режиме $K = 38.5 \pm 1$ dB и уровень мощности насыщения $P_{sat} = 32.5 \pm 0.5$ dBm. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр имел в полосе пропускания минимальный уровень ослабления $A_0 = 10$ dB на частоте

те $f_0 = 1.979$ GHz, ширину полосы пропускания по уровню 3 dB $\Delta f_{3\text{ dB}} = 80$ MHz, по уровню 20 dB $\Delta f_{20\text{ dB}} = 136$ MHz и по уровню 40 dB $\Delta f_{40\text{ dB}} = 191$ MHz. Линия задержки состояла из ферромагнитной пленки и двух закороченных с одного конца полосковых проводников шириной $w = 30$ μm , расстояние между которыми устанавливалось равным $l = 6$ mm. В качестве ферромагнитной пленки использовалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), которая была прижата к проводникам, имела 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. Для возбуждения ПМСВ постоянное магнитное поле H_0 было направлено параллельно проводникам, касательно к поверхности пленки ЖИГ и подбиралось таким образом, чтобы возбуждение ПМСВ происходило на частотах ниже 4.7 GHz, где разрешены трехволновые процессы распада. Основная часть мощности с выхода усилителя возвращалась обратно в кольцо, а меньшая часть мощности через направленные ответвители 3, 8 поступала на осциллограф Infiniium DSO81004B 9 и анализатор спектра ESA-E E4402B 10 или измеритель мощности N1912A 11. Внешний импульсно-модулированный СВЧ-сигнал формировался с помощью генератора MXG N5181A 7 и заводился в кольцо на вход усилителя мощности 1 через направленный ответвитель 5. Фильтр верхних частот 6 осуществлял ослабление спектральных компонентов импульсно-модулированного СВЧ-сигнала на величину ~ 40 dB на частотах вблизи f_0 . Длительность СВЧ-импульсов T_d^{rp} имела минимальную величину, равную 120 ns, и могла увеличиваться с шагом 10 ns.

На рис. 1, *a, b* приведены результаты экспериментального исследования хаотической динамики автоколебательной системы в режиме автономной генерации. Из рис. 1, *a* следует, что широкополосный хаотический СВЧ-сигнал формируется в полосе пропускания полосового фильтра, а во временной области (рис. 1, *b*) этот сигнал является непрерывным. Интегральная мощность хаотического сигнала составляет величину $P_{int} = +10$ dBm.

При подаче на вход усилителя мощности гармонического СВЧ-сигнала со средней мощностью $P_{av} = 0$ dBm и частотой $f_{ext} = 2.8$ GHz, находящейся в рабочей полосе усилителя, но за полосой пропускания полосового фильтра, наблюдается полное подавление хаотической динамики автогенератора за счет эффекта синхронизации хаоса [5]. Аналогичный эффект наблюдался в [6] при воздействии гармоническим

СВЧ-сигналом на широкополосную автоколебательную систему, работающую в режиме динамического хаоса, при возбуждении ПМСВ и обратных объемных МСВ. В этом случае квазипериод хаотических колебаний совпадает с периодом внешнего воздействия, и на спектрограмме присутствует только СВЧ-сигнал с частотой f_{ext} .

При подаче на вход усилителя мощности импульсно-модулированного СВЧ-сигнала (рис. 2) с частотой несущего гармонического колебания f_{ext} и мощностью в импульсе, равной P_{av} , во временной области формируется периодическая последовательность хаотических СВЧ-импульсов. Механизм генерации таких импульсов, как и в [4], заключается в подавлении хаоса (синхронизации) на временных интервалах, на которых присутствует внешнее воздействие, и генерации хаоса, когда внешнее воздействие отсутствует. При этом спектральная составляющая импульсно-модулированного СВЧ-сигнала на частоте f_{ext} оказывается подавленной на 15–40 дБ относительно максимальной по величине спектральной составляющей хаотического СВЧ-сигнала и, в отличие от [4], может быть дополнительно уменьшена при использовании на выходе генератора хаоса режкторного фильтра, настроенного на частоту f_{ext} .

Из представленных на рис. 2 результатов следует, что эффект подавления хаоса приводит к увеличению скважности хаотических СВЧ-импульсов q_{ch} при уменьшении скважности внешних СВЧ-импульсов q_{rp} . При длительности внешних СВЧ-импульсов $T_d^{rp} = 0.12 \mu\text{s}$ и периоде следования $T_r^{rp} = 2 \mu\text{s}$ (рис. 2, а) в автоколебательной системе генерируются хаотические СВЧ-импульсы с длительностью $T_d^{ch} = T_r^{rp} - T_d^{rp} = 1.88 \mu\text{s}$ и периодом следования $T_r^{ch} = T_r^{rp} = 2 \mu\text{s}$ ($q_{ch} = 1.06$). В случае, когда $T_d^{rp} = 1.5 \mu\text{s}$ (рис. 2, б), генерируются хаотические СВЧ-импульсы с $T_d^{ch} = 0.5 \mu\text{s}$ ($q_{ch} = 4$). Отметим, что при изменении длительности хаотических СВЧ-импульсов ширина их спектра, измеренная по уровню -40 дБ от максимального значения спектральной плотности мощности, остается практически постоянной и совпадает с шириной спектра непрерывного хаотического СВЧ-сигнала (ср. рис. 1, б и рис. 2 — левые колонки). Таким образом, при $T_r^{rp} = T_r^{ch}$ длительность хаотического СВЧ-импульса T_d^{ch} равна паузе между внешними СВЧ-импульсами $T_i^{rp} = T_r^{rp} - T_d^{rp}$, и наоборот, пауза между хаотическими СВЧ-импульсами $T_i^{ch} = T_r^{ch} - T_d^{ch}$ равна длительности внешнего СВЧ-импульса T_d^{rp} . При этом скважность хаотических СВЧ-импульсов выражается как $q_{ch} = q_{rp} / (q_{rp} - 1)$.

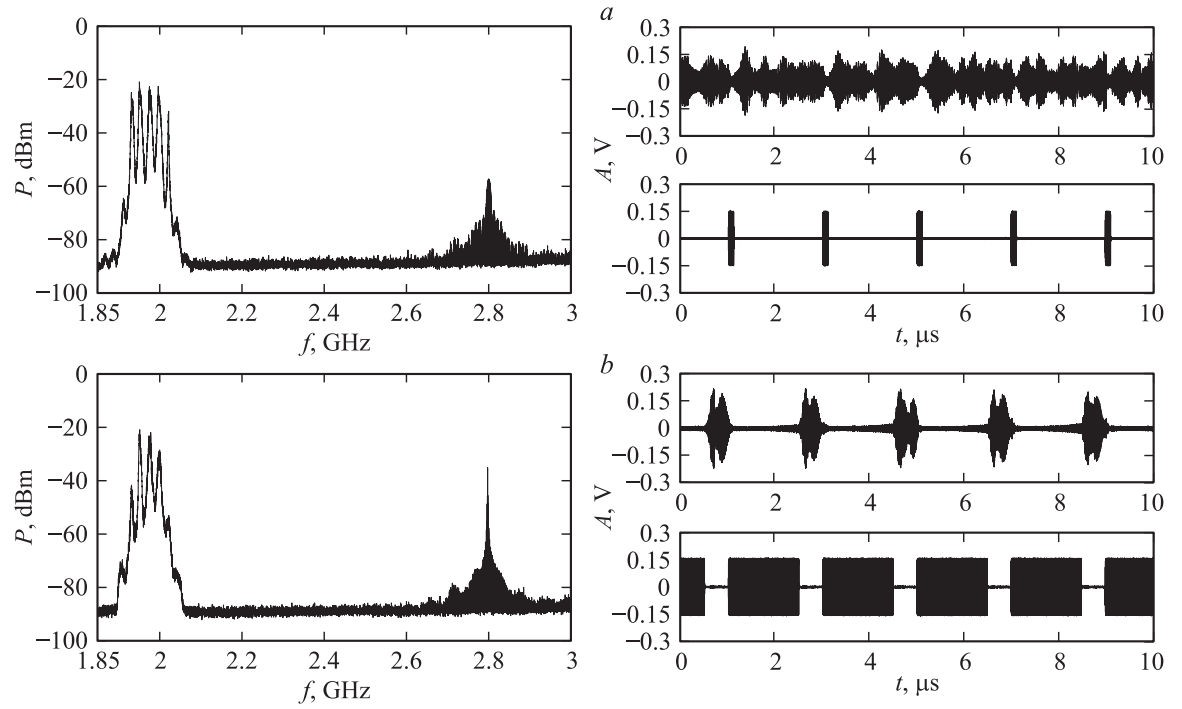


Рис. 2. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка) хаотического СВЧ-сигнала при $H_0 = 158$ Ое в присутствии внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала со скважностью q_{rp} : a — 16.7, b — 1.33. Верхние реализации — хаотические СВЧ-импульсы, нижние реализации — внешние прямоугольные СВЧ-импульсы. Спектрограммы получены при ширине полосы приемника 10 kHz и времени свипирования 14.8 s.

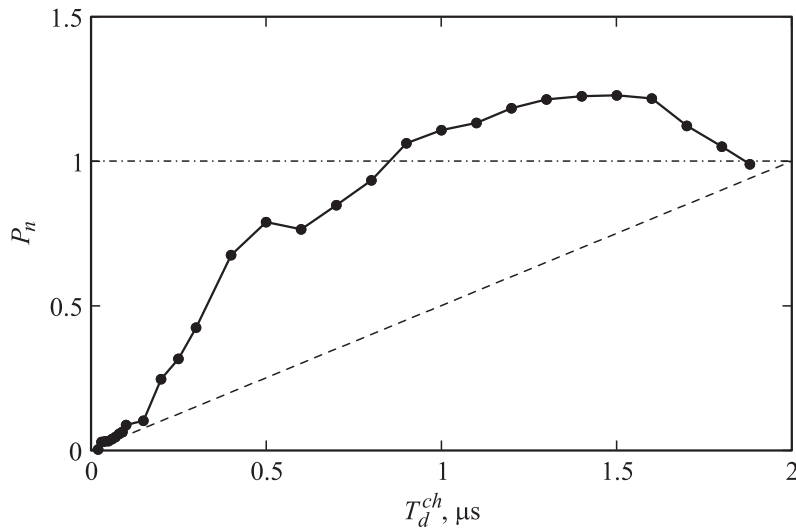


Рис. 3. Зависимость безразмерной интегральной мощности P_n от длительности хаотических СВЧ-импульсов T_d^{ch} при периоде следования $T_r^{ch} = 2 \mu\text{s}$: кружки — эксперимент, пунктирная линия — расчет. Штрихпунктирной линией показан уровень $P_n = 1$.

На рис. 3 приведена экспериментально полученная зависимость средней за период следования импульсов безразмерной интегральной мощности хаотического СВЧ-сигнала $P_n = P_{int}^{ext}/P_{int}$ (P_{int}^{ext} — средняя за период интегральная мощность хаотического СВЧ-сигнала при внешнем воздействии) от длительности хаотических СВЧ-импульсов. Для сравнения здесь же приведена расчетная зависимость, где P_n определялась как $P_n = P_{int}/(P_{int}q_{ch}) = T_d^{ch}/T_r^{ch}$ и соответствовала средней за период мощности хаотического сигнала, у которого интегральная мощность в импульсе равна P_{int} . Из приведенных результатов видно, что экспериментальная кривая $P_n(T_d^{ch})$ является нелинейной с протяженной областью значений T_d^{ch} , где P_n превышает расчетное. С увеличением T_d^{ch} на экспериментальной зависимости P_n от T_d^{ch} наблюдается сначала возрастание P_n до $P_n > 1$, а затем падение P_n до $P_n \sim 1$, что приводит к возникновению максимума, имеющего значение $P_n = 1.23$ при $T_{d,max}^{ch} = 1.5 \mu\text{s}$. Увеличение мощности хаотического сигнала при

импульсном воздействии по сравнению с расчетными значениями и с автономным режимом обусловлено тем, что хаотические СВЧ-импульсы имеют на переднем фронте (в области переходных процессов) остроконечные пики, в которых мгновенные значения напряжения A превышают мгновенные значения напряжения в стационарной области. Возникновение остроконечных пиков в области переходных процессов обусловлено трехволновыми процессами слияния спиновых волн, а их длительность определяется шириной спектра вторичных ПМСВ и зависит от мощности СВЧ-импульса на входе линии задержки [7]. В автономном режиме, где исследуемый процесс является стационарным, переходные процессы отсутствуют (ср. рис. 1, b и рис. 2 — правые колонки). Увеличение P_n наблюдается только до $T_d^{ch} = T_{d,max}^{ch}$ в связи с тем, что пауза T_i^{ch} становится меньше времени релаксации спиновых волн, которое можно определить как $T_{rl} = T_r^{ch} - T_{d,max}^{ch} = 0.5 \mu s$. При $T_i^{ch} < T_{rl}$ амплитуда намагниченности не успевает вернуться в исходное (невозбужденное) состояние после прекращения генерации СВЧ-сигнала, что приводит к снижению эффективности возбуждения вторичных ПМСВ при повторном возникновении генерации СВЧ-сигнала. Это обуславливает уменьшение уровня пиков в области переходных процессов до уровня мгновенных значений напряжения сигнала в области стационарных процессов (рис. 2, a). Таким образом, подбирая определенные соотношения между длительностью и периодом следования внешних СВЧ-импульсов можно добиться увеличения уровня интегральной мощности хаотического СВЧ-сигнала по сравнению с автономным режимом за счет наличия в системе при генерации хаотических СВЧ-импульсов переходных процессов.

В заключение отметим, что полученные в работе результаты демонстрируют возможность генерации хаотических СВЧ-импульсов с помощью синхронизации хаоса под внешними периодическим воздействием, а предложенная схема может быть использована при разработке широкополосных систем прямохаотической передачи информации.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией ЗАО „НПЦ „Алмаз-Фазотрон“ В.С. Гришину за полезные обсуждения при написании данной работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-02-00057) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-3407.2010.2).

Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2001. 252 с.
- [2] *Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 15. С. 1–6.
- [3] *Дмитриев А.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Бирюков А.А.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14. № 4. С. 36–42.
- [4] *Дмитриев А.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н.* // Патент на изобретение, РФ. № 2349027. 2009. Бюллетень № 7.
- [5] *Неймарк Ю.И., Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. Изд. 2-е, доп. М.: Книжный дом „ЛИБРОКОМ“, 2009. 424 с.
- [6] *Гришин С.И., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 5. С. 89–98.
- [7] *Synogach V.T., Fetisov Yu.K., Mathieu C., Patton C.E.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. N 10. P. 2184–2187.