

09

Генерация последовательности хаотических импульсов при воздействии периодического сигнала на динамическую систему

© А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Л.В. Кузьмин

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
E-mail: chaos@cplire.ru

Поступило в Редакцию 20 мая 2005 г.

Показывается, что путем воздействия периодического сигнала на динамическую систему можно осуществлять генерацию последовательности хаотических импульсов. В качестве модели рассматривается генератор хаоса с 2.5 степенями свободы.

Устанавливается, что за счет частоты воздействия и выбора постоянного напряжения смещения (рабочей точки) можно в широких пределах варьировать длину хаотических импульсов и темп их следования.

Хаотические импульсы используются в качестве носителя информации в широкополосных и сверхширокополосных системах связи [1–4]. Последовательность хаотических импульсов может быть получена путем модуляции стационарного хаотического сигнала на выходе источника хаоса. Однако такой подход требует постоянной работы источника хаоса и, в силу этого, обладает невысокой энергетической эффективностью, особенно при большой скважности следования импульсов. В данной работе исследуется возможность генерации последовательности хаотических импульсов путем воздействия периодического сигнала на динамическую систему. Задача заключается в том, чтобы за счет такого воздействия обеспечить возбуждение хаотических колебаний только на части периода внешнего сигнала и тем самым упростить процесс получения хаотических импульсов и увеличить энергетическую эффективность системы.

В качестве источника хаотических колебаний будем использовать модель генератора хаоса с активным элементом — биполярным транзистором. Схема генератора представлена на рис. 1, а. Он построен

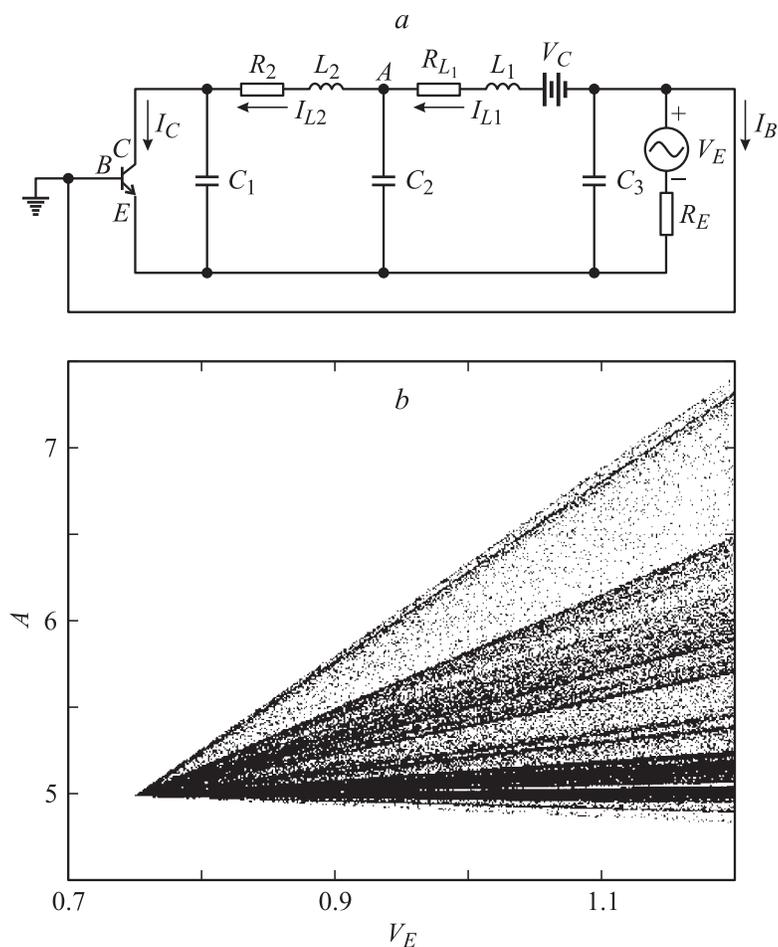


Рис. 1. Генератор с 2.5 степеней свободы: *a* — принципиальная схема; *b* — диаграмма режимов работы генератора при $V_C = 5$ В; $L_1 = 25$ нГ; $L_2 = 2.5$ нГ; $C_1 = 10$ пФ; $C_2 = 1$ пФ; $C_3 = 1.3$ пФ; $R_{BE} = 200$ Ω ; $R_E = 246$ Ω ; $R_1 = 20$ Ω ; $R_2 = 20$ Ω ; $\beta = 425$; $V_T = 0.75$ В; A — значения локальных максимумов реализации V_A автономного генератора.

на основе емкостной трехточечной схемы, описываемой тремя обыкновенными дифференциальными уравнениями [5,6], в цепь обратной связи которой дополнительно включен RLC -фильтр нижних частот. Это позволяет увеличить число степеней свободы системы до 2.5 и создает дополнительные возможности для синтеза спектра мощности хаотических колебаний. Внешнее периодическое воздействие на генератор осуществляется с помощью источника переменного напряжения, включенного в цепь питания.

Модель генератора описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 \dot{V}_{CE} &= I_{L2} - I_C, \\ C_3 \dot{V}_{BE} &= (V_E - V_{BE})/R_E - I_{L1} - I_B(V_{BE}), \\ C_2 \dot{V}_A &= I_{L1} - I_{L2} - \frac{C_2}{C_3} ((V_E - V_{BE})/R_E - I_{L1} - I_B(V_{BE})), \\ L_1 \dot{I}_{L1} &= V_C - V_A - R_{L1} I_{L1}, \\ L_2 \dot{I}_{L2} &= V_A + V_{BE} - V_{CE} - R_2 I_{L2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $V_E = V_{DC} + V_{AC} \sin(2\pi f t)$, V_{DC} и V_{AC} — амплитуды постоянной и переменной составляющей внешнего сигнала V_E соответственно и f — частота внешнего сигнала; V_{CE} , V_{BE} — напряжения коллектор–эмиттер и база–эмиттер; V_A — напряжение в точке A ; V_C и V_E — разности потенциалов на источниках напряжения; I_{L1} , I_{L2} , I_C , I_B — токи через индуктивность L_1 , индуктивность L_2 , коллектор C и базу B соответственно; $I_C = \beta I_B$, β — коэффициент усиления транзистора. В автономном режиме работы генератора $V_{AC} = 0$.

Для описания работы транзистора в модели генератора ниже используется кусочно-линейная аппроксимация статической вольт-амперной характеристики биполярного транзистора $I_B(V_{BE})$:

$$\begin{aligned} I_B &= 0, \quad \text{если } V_{BE} \leq V_T, \\ I_B &= (V_{BE} - V_T)/R_{BE}, \quad \text{если } V_{BE} > V_T, \end{aligned} \quad (2)$$

где V_T — барьерный потенциал (примерно 0.75 В); R_{BE} — сопротивление перехода база–эмиттер.

В качестве переменной, используемой для анализа колебаний в системе, выбрано напряжение V_A .

На рис. 1, *b* изображена диаграмма зависимости режимов работы автономного генератора при разных напряжениях от напряжения база–эмиттер V_E .

Из диаграммы следует, что хаотические колебания имеют место для всех значений V_E , больших V_T . Объяснить это можно тем, что ключевым параметром вольт-амперной характеристики, определяющим режим колебаний в генераторе, является наклон линейного участка характеристики, а значение напряжения смещения на транзисторе задает характерную амплитуду колебаний в модели и является нормирующим множителем при переходе от размерной модели к безразмерной. Т.е. форма характеристики является инвариантной относительно преобразования подобия, не меняющего наклона линейного участка характеристики, а инвариантность, в свою очередь, приводит к качественно одинаковым режимам при значениях параметров, которые переводятся друг в друга преобразованием подобия.

На рис. 2, *a* представлен спектр мощности сигнала генератора, работающего в автономном режиме, при вышеуказанных значениях параметров и значении напряжения база–эмиттер $V_E = 1$ В. Основная часть мощности колебаний генератора сосредоточена в полосе 250...500 МГц.

Рассмотрим воздействие гармонического сигнала на генератор, которое будем производить путем медленного, по сравнению с характерной частотой генератора, периодического изменения напряжения V_E .

Расчеты показывают, что воздействие периодического (гармонического) сигнала приводит к возникновению модуляции хаотических колебаний, период которой обратно пропорционален частоте модулирующего сигнала f . При увеличении амплитуды внешнего сигнала глубина модуляции колебательного процесса увеличивается вплоть до появления цугового режима колебаний. В этом режиме промежутки времени, на которых наблюдаются колебания, периодически прерываются промежутками времени, на которых колебания отсутствуют (рис. 2, *b*). При этом расстояние между цугами колебаний определяется периодом внешнего воздействия, его амплитудой и напряжением постоянного смещения на эмиттере транзистора V_{DC} .

С точки зрения режима работы транзистора указанные явления связаны с запирающим и открывающим $p-n$ -перехода в процессе модуляции.

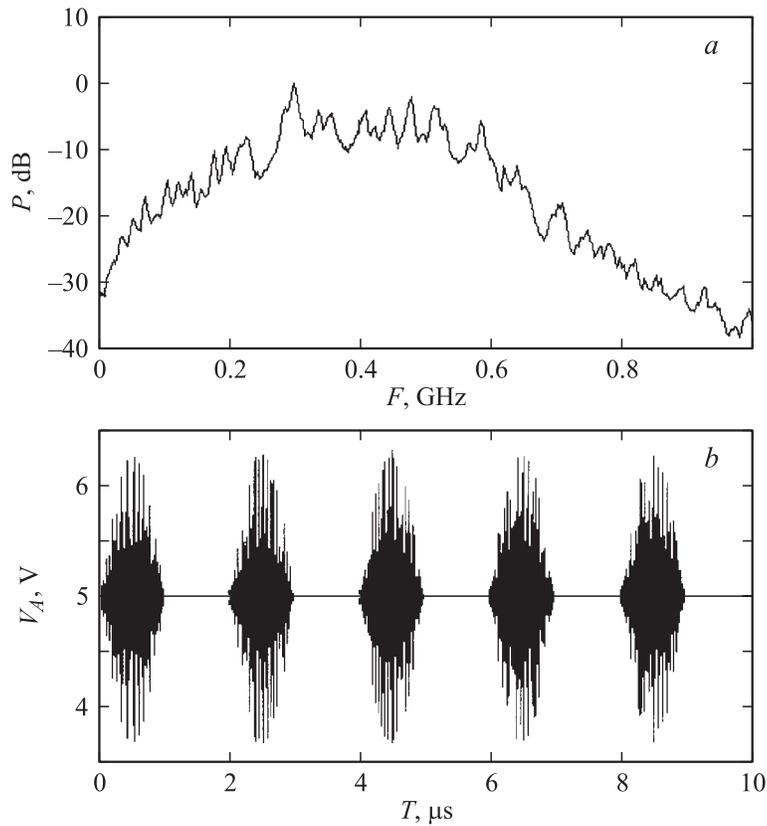


Рис. 2. Модулированный режим колебаний генератора: *a* — спектр мощности последовательности хаотических импульсов; *b* — последовательность хаотических импульсов со скважностью 2; *c* — последовательность хаотических импульсов со скважностью 4.

Генерация возникает в период времени, когда напряжение V_E превышает напряжение смещения на транзисторе V_T . Таким образом, подбирая частоту модулирующего колебания, его амплитуду V_{AC} и постоянное напряжение V_{DC} , можно получать последовательность хаотических импульсов разной скважности. Например, на рис. 2, *b* изображен фрагмент

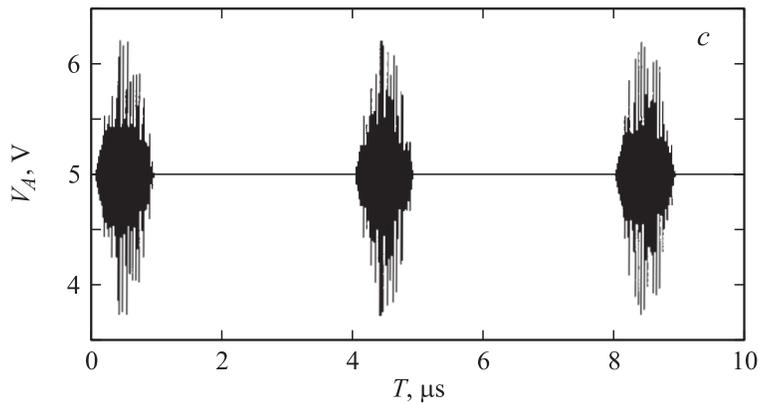


Рис. 2 (продолжение).

реализации сигнала на выходе генератора, модулированного сигналом V_E с параметрами $V_{DC} = V_T$, $V_{AC} = 0.25$ V и $f = 500$ kHz. Такой выбор параметров позволяет получить последовательность хаотических импульсов со скважностью 2.

На рис. 2, *c* показан спектр мощности и фрагмент реализации сигнала на выходе генератора, модулированного сигналом V_E с параметрами $V_{DC} = 0$ V, $V_{AC} = 1$ V и $f = 250$ kHz, что позволяет генерировать последовательность хаотических импульсов со скважностью 4. Заметим, что на интервалах времени между хаотическими импульсами потребление тока близко к нулю, что существенно повышает энергетическую эффективность генератора.

Что представляют собой последовательности хаотических импульсов с точки зрения нелинейной динамики? На временной оси наблюдаются интервалы времени как с регулярным поведением траектории (промежутки между импульсами), так и с хаотическим поведением (хаотические импульсы). Анализ старшего локального ляпуновского показателя приводит к выводу, что на регулярных участках траектории старший ляпуновский показатель отрицателен, а на интервалах времени, соответствующих хаотическим импульсам, ляпуновский показатель в среднем положителен.

Для динамики исследуемой системы этот факт становится понятным из анализа рис. 1, *b*. Из него следует, что в отсутствие периодического

внешнего воздействия и при $V_E > V_T$ в системе реализуются хаотические колебания (это подтверждается и прямым расчетом ляпуновского показателя). Периодическое воздействие на систему производится с частотой, много меньшей характерных частот собственных колебаний. Поэтому с точки зрения динамических свойств системы оно квазистационарно. Последнее означает, что в те интервалы времени, когда теперь уже переменное напряжение V_E превышает $0.75 V$, режим в системе хаотический, что и подтверждается генерацией хаотических импульсов.

Интересно отметить, что в системе можно наблюдать и серии практически идентичных импульсов. Такая ситуация имеет место в случае коротких импульсов и в достаточно больших межимпульсных промежутках. При этом локальный старший ляпуновский показатель на промежутках с импульсами в среднем положителен, как и в случае более длинных импульсов, однако поскольку начальные условия импульсов практически одинаковы, то за короткое время импульса малые отличия в начальных условиях не успевают привести к существенным различиям в траекториях.

Рассмотренные эффекты позволяют формировать пачки сверхширокополосных цугов (радиоимпульсов) с заданной длиной и интервалом повторения при контролируемом непрерывном спектре мощности сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант 05–02–17667А.

Список литературы

- [1] *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И.* и др. // РЭ. 2001. Т. 46. № 2. С. 224–233.
- [2] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физ.-мат. лит., 2002. 252 с.
- [3] *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 2. С. 70–76.
- [4] *Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I.* et al. // Int. J. Bifurcation & Chaos. 2003. V. 13. N 6. P. 1495–1507.
- [5] *Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М.* Теория колебаний в радиотехнике / Учебн. пособие для вузов. М.: Наука, 1984. 320 с.
- [6] *Kennedy M.* // IEEE Trans. 1994. V. CAS-41. N 11. P. 771.