

ГЕНЕРАЦИЯ ПОТОКА ХАОТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ВНЕШНИМ (ПЕРИОДИЧЕСКИМ) ВОЗДЕЙСТВИЕМ

А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Л.В. Кузьмин, Н.В. Атанов

Институт радиотехники и электроники РАН,
125009, Россия, г. Москва, ул. Моховая, 11/7.

chaos@cplire.ru

Исследуется возможность генерации хаотических радиоимпульсов путём воздействия внешнего сигнала на динамическую систему, представляющую собой математическую модель генератора хаоса с 2.5 степенями свободы с биполярным транзистором в качестве активного элемента.

Устанавливается, что периодическое внешнее воздействие на такую систему позволяет генерировать поток хаотических импульсов, а за счёт выбора частоты воздействия и значения постоянного напряжения смещения (рабочей точки транзистора), в широких пределах варьировать длину хаотического импульсов и темп их следования.

Введение

Хаотические радиоимпульсы используются в качестве носителя информации в широкополосных и сверхширокополосных системах связи [1–4]. Передаваемая информация в таких системах кодируется путём размещения этих импульсов на определённых временных позициях. В результате, образуется поток хаотических импульсов, состоящий из самих импульсов и интервалов между ними. Причём, в зависимости от скорости передачи информации и других условий, межимпульсные интервалы времени могут быть

как сопоставимыми по длине с импульсами, так и намного превосходить их. Последний случай соответствует большой скважности следования импульсов.

Последовательность хаотических импульсов получают путем глубокой амплитудной модуляции стационарного хаотического сигнала на выходе источника хаоса. Однако такой подход требует постоянной работы генератора хаоса, как на интервалах времени, когда формируются хаотические радиоимпульсы, так и в паузах между ними. Необходимость генерации хаотического сигнала в паузах между импульсами приводит к снижению энергетической эффективности системы в целом. Особенно значительным это снижение энергетической эффективности оказывается в случае больших скважностей следования импульсов. Именно такие режимы представляют значительный интерес для беспроводных сенсорных сетей и других приложений, чувствительных к сбережению энергии.

В данной работе исследуется возможность генерации потока хаотических радиоимпульсов путём воздействия внешнего периодического сигнала на динамическую систему, которая в автономном режиме способна генерировать хаотические колебания.

Задача заключается в том, чтобы за счёт такого воздействия обеспечить возбуждение хаотических колебаний на части периода внешнего сигнала, оставляя систему невозбуждённой на оставшейся части периода и получить периодическую последовательность хаотических импульсов с паузами между ними. Если в паузах генератор не будет потреблять энергию, или её потребление будет значительно меньше, чем на фазе генерации импульсов, то общее потребление энергии будет значительно ниже, чем при постоянной генерации хаоса. Таким образом, по сравнению с энергетической эффективностью системы с применением внешней модуляции, энергетическая эффективность системы в целом значительно повысится, особенно при больших скважностях.

1. Модель транзисторного генератора хаоса с 2.5 степенями свободы

В качестве источника хаотических колебаний будем использовать модель генератора хаоса с активным элементом – биполярным транзистором. Схема генератора представлена на рис. 1. Он реализован на основе емкостной трехточечной схемы [5, 6], в цепь обратной связи которой дополнительно включен RLC -фильтр нижних частот. Как показано в [6], уже в классической схеме транзисторного генератора (ёмкостной трёхточки) могут быть получены хаотические колебания. Включение дополнительного фильтра позволяет увеличить число степеней свободы системы до 2,5 и создает дополнительные возможности для синтеза спектра мощности хаотических колебаний [7]. Внешнее периодическое воздействие на генератор осуществляется с помощью источника переменного напряжения $V_E(t)$, включенного в цепь питания (рис. 1).

Модель генератора описывается системой дифференциальных уравнений:

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

где $V_E = V_{DC} + V_{AC} \sin(2\pi ft)$, V_{DC} – значение постоянной составляющей напряжения внешнего сигнала V_E ; V_{AC} – амплитуда переменной составляющей внешнего сигнала V_E ; f – частота внешнего сигнала; V_{CE} , V_{BE} – напряжения коллектор-эмиттер и база-эмиттер; V_A – напряжение в точке A ; V_C – разность потенциалов источников напряжения в цепи коллектора; 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 вольтамперной характеристики

биполярного транзистора $I_B(V_{BE})$:

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

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 .

В безразмерной форме уравнения модели имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{CE} &= \frac{1}{\omega_0 C_1 R_{BE}} (i_{L2} - i_C) \\ \dot{v}_{BE} &= \frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}} \left(\frac{R_{BE}}{R_E} (v_E - v_{BE}) - i_{L1} - i_B(v_{BE}) \right) \\ \dot{v}_A &= \frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}} \left(-\frac{R_{BE}}{R_E} (v_E - v_{BE}) + i_B(v_{BE}) + \left(1 + \frac{C_3}{C_2} \right) i_{L1} - \frac{C_3}{C_2} i_{L2} \right), \\ i_{L1} &= \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_1} \left(v_C - v_A - \frac{R_{L1}}{R_{BE}} i_{L1} \right) \\ i_{L2} &= \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} \left(v_A + v_{BE} - v_{CE} - \frac{R_{L2}}{R_{BE}} i_{L2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

где нелинейность $i_B(v_{BE})$

$$i_B(v_{BE}) = \begin{cases} 0, & \text{если } v_{BE} \leq 1 \\ v_{BE} - 1, & \text{если } v_{BE} > 1 \end{cases} \quad (4)$$

и $d/dt' = \omega_0 d/dt$, $v_{CE} = V_{CE}/V_T$, $v_{BE} = V_{BE}/V_T$, $v_A = V_A/V_T$, $i_{L1} = I_{L1}/I_0$, $i_{L2} = I_{L2}/I_0$,
 $v_E = V_E/V_T$, $v_C = V_C/V_T$, $I_0 = V_T/R_{BE}$, $i_C = \beta i_B(v_{BE})$, $\omega_0 = \sqrt{(C_1 + C_2)/L_1 C_1 C_2}$.

На рис. 2 представлен фрагмент реализации и спектр мощности сигнала генератора, работающего в автономном режиме, при указанных значениях параметров и значении напряжения питания на эмиттере $V_E = 1$ В. Основная часть мощности генератора сосредоточена в области частот 300...600 МГц.

Модель генератора обладает интересным свойством, заключающимся в том, что при $v_E < 1$ она имеет устойчивое состояние равновесия, а при $v_E > 1$ в ней возбуждаются хаотические колебания сразу, без промежуточных бифуркаций, как показано на рис. 3а, на котором изображена диаграмма зависимости режимов работы автономного генератора при разных напряжениях источника питания на эмиттере v_E . С ростом v_E амплитуда этих колебаний растёт пропорционально разности $(v_E - 1)$, однако структура колебаний и их характеристики не меняются. В частности остаётся постоянной форма функции распределения $p(V_A)$ мгновенных значений колебаний V_A (рис. 3б, 3в) и форма спектра мощности (рис. 2б).

Постоянство структуры колебаний объясняется тем, что параметром, определяющим режим колебаний в генераторе, является наклон линейного участка вольтамперной характеристики, а значение напряжения смещения на транзисторе, задаёт характерную амплитуду колебаний в модели. Поэтому, колебательный режим, являющийся решением (3) для $v_E > 1$, является инвариантным относительно преобразования подобия $\bar{v}'(t) = k\bar{v}(t)$, не меняющего наклона линейного участка характеристики. Инвариантность, в свою очередь, приводит к режимам, имеющим одинаковую структуру, которые переводятся друг в друга преобразованием подобия.

Действительно, модель генератора описывается следующей кусочно-линейной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{v}} &= \mathbf{A}_1 \bar{v} + \bar{c}_1, \text{ если } v_{BE} \leq 1, \\ \dot{\bar{v}} &= \mathbf{A}_2 \bar{v} + \bar{c}_2, \text{ если } v_{BE} > 1, \end{aligned} \tag{5}$$

где \bar{v} – вектор фазового состояния системы, т.е. $\bar{v} = (v_{CE}, v_{BE}, v_A, i_{L1}, i_{L2})^T$; \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 – матрицы с постоянными коэффициентами:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & (\omega_0 C_1 R_{BE})^{-1} \\ 0 & -(\omega_0 C_3 R_E)^{-1} & 0 & -(\omega_0 C_3 R_{BE})^{-1} & 0 \\ 0 & (\omega_0 C_3 R_E)^{-1} & 0 & \frac{1}{\omega_0 R_{BE}} \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) & -(\omega_0 C_2 R_{BE})^{-1} \\ 0 & 0 & -\frac{R_{BE}}{\omega_0 L_1} & -\frac{R_{L1}}{\omega_0 L_1} & 0 \\ -\frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} & \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} & \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} & 0 & -\frac{R_{L2}}{\omega_0 L_2} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\beta}{\omega_0 R_{BE} C_1} & 0 & 0 & (\omega_0 C_1 R_{BE})^{-1} \\ 0 & -\frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}} \left(1 + \frac{R_{BE}}{R_E} \right) & 0 & -(\omega_0 C_3 R_{BE})^{-1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}} \left(1 + \frac{R_{BE}}{R_E} \right) & 0 & \frac{1}{\omega_0 R_{BE}} \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) & -(\omega_0 C_2 R_{BE})^{-1} \\ 0 & 0 & -\frac{R_{BE}}{\omega_0 L_1} & -\frac{R_{L1}}{\omega_0 L_1} & 0 \\ -\frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} & \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} & \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} & 0 & -\frac{R_{L2}}{\omega_0 L_2} \end{pmatrix},$$

и \bar{c}_1, \bar{c}_2 – постоянные векторы: $\bar{c}_1 = \left(0, \frac{v_E}{\omega_0 C_3 R_E}, -\frac{v_E}{\omega_0 C_3 R_E}, \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_1} v_C, 0 \right)^T$,

$\bar{c}_2 = \left(\frac{\beta}{\omega_0 C_1 R_{BE}}, \frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}} \left(1 + \frac{R_{BE}}{R_E} v_E \right), -\frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}} \left(1 + \frac{R_{BE}}{R_E} v_E \right), \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_1} v_C, 0 \right)^T$. Такая

форма записи уравнений модели возможна благодаря кусочно-линейному характеру рассматриваемой вольтамперной характеристики транзистора. Отметим, что коэффициенты указанных матриц не зависят от напряжений v_E и v_C .

Система (5) имеет следующие положения равновесия $\bar{v}_{01} = -\mathbf{A}_1^{-1} \bar{c}_1$, если $v_{BE} \leq 1$, и $\bar{v}_{02} = -\mathbf{A}_2^{-1} \bar{c}_2$, если $v_{BE} > 1$.

Сделаем замену переменных $\bar{v}' = \bar{v} - \bar{v}_{01}$, т.е. сдвинем положение равновесия системы уравнений, соответствующей области фазового пространства $v_{BE} \leq 1$, в начало координат. При этом система в целом преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \dot{v}' &= \mathbf{A}_1 \bar{v}', \text{ если } v'_{BE} \leq -(v_E - 1), \\ \dot{v}' &= \mathbf{A}_2 \bar{v}' - \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1^{-1} \bar{c}_1 + \bar{c}_2, \text{ если } v'_{BE} > -(v_E - 1), \end{aligned} \quad (6)$$

Вычисления показывают, что свободный член $\bar{c}'_2 = -\mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1^{-1} \bar{c}_1 + \bar{c}_2$ имеет вид

$$\bar{c}'_2 = \left(-\frac{\beta(v_E - 1)}{\omega_0 C_1 R_{BE}}, -\frac{(v_E - 1)}{\omega_0 C_3 R_{BE}}, \frac{(v_E - 1)}{\omega_0 C_3 R_{BE}}, 0, 0 \right)^T, \text{ т.е. система (6) может быть}$$

переписана следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{v}' &= \mathbf{A}_1 \bar{v}', \text{ если } v'_{BE} \leq -(v_E - 1), \\ \dot{v}' &= \mathbf{A}_2 \bar{v}' + \bar{b}(v_E - 1), \text{ если } v'_{BE} > -(v_E - 1), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где вектор } \bar{b} = \left(-\frac{\beta}{\omega_0 C_1 R_{BE}}, -\frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}}, \frac{1}{\omega_0 C_3 R_{BE}}, 0, 0 \right)^T.$$

Система (7) имеет два положения равновесия: $\bar{v}'_{01} = (0, 0, 0, 0, 0)^T$ и

$$\bar{v}'_{02} = \frac{v_E - 1}{1 + \beta + \frac{R_{BE}}{R_E}} \left(-\left(1 + \beta \left(1 + \frac{R_{L1}}{R_E} + \frac{R_{L2}}{R_E} \right) \right), -(1 + \beta), -\beta \frac{R_{L1}}{R_E}, \beta \frac{R_{BE}}{R_E}, \beta \frac{R_{BE}}{R_E} \right)^T$$

При $v_E < 1$ нулевое положение равновесия \bar{v}'_{01} устойчиво, в то время как ненулевое положение равновесия \bar{v}'_{02} является неустойчивым. Поэтому, если $v_E < 1$, то траектория, стартующая с произвольных начальных условий, возвращается к устойчивому положению равновесия \bar{v}'_{01} и колебаний не возникает. Если же $v_E > 1$, то, поскольку $v'_{BE} < -(v_E - 1)$, устойчивое положение равновесия исчезает, остаётся лишь неустойчивое, и в системе возникают автоколебания.

Как видно из диаграммы на рис. 3, амплитуда колебаний пропорциональна $v_E - 1$, поэтому, достаточно показать, что, если для некоторого значения $v_E - 1$ мы имеем решение $\bar{v}'(t)$, то для некоторого значения $k(v_E - 1)$ мы будем иметь решение $\bar{v}''(t) = k\bar{v}'(t)$. Убедиться в этом можно, путём непосредственной подстановки последнего соотношения в (7):

$$\begin{aligned} k\dot{\bar{v}}' &= \mathbf{A}_1 k\bar{v}', \text{ если } v'_{BE} \leq -(v_E - 1), \\ k\dot{\bar{v}}' &= \mathbf{A}_2 k\bar{v}' + \bar{b}k(v_E - 1), \text{ если } v'_{BE} > -(v_E - 1), \end{aligned} \quad (8)$$

Откуда и следует, что решения, соответствующие значениям $v_E - 1$ и $k(v_E - 1)$, являются подобными и переводятся друг в друга преобразованием подобия $\bar{v}''(t) = k\bar{v}'(t)$, что и наблюдается в системе: с ростом v_E амплитуда колебаний растёт пропорционально $v_E - 1$, а структура колебаний не меняется.

2. Динамика модели при внешнем гармоническом воздействии

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. 4а). 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 открытием р-п перехода в процессе модуляции. Генерация возникает в период времени, когда напряжение V_E превышает напряжение смещения на транзисторе V_T (рис. 5). 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. 4а изображён фрагмент реализации сигнала на выходе генератора, модулированного сигналом V_E с параметрами $V_{DC} = V_T$, $V_{AC} = 0.25$ В и $f = 1$ МГц. Такой выбор параметров позволяет получить последовательность хаотических импульсов со скважностью 2.

На рис. 4б показан фрагмент реализации сигнала на выходе генератора, находящегося под воздействием сигнала V_E с параметрами $V_{DC} = 0$ В, $V_{AC} = 1$ В и $f = 1$ МГц, при которых генерируется последовательность хаотических импульсов со скважностью 4. На рис. 4в приведено сравнение спектров мощности исходного сигнала и сигналов генератора, находящегося под внешним периодическим воздействием.

Заметим, что на интервалах времени между хаотическими импульсами, когда $V_E < V_T$, транзистор закрыт, и ток через переход база-коллектор не течёт, т.е. $I_C = 0$ (см. рис. 1). При этом ток, текущий через переход база-эмиттер также равен нулю. Таким образом, на этих интервалах времени потребляемый ток и мощность равны нулю, что существенно повышает энергетическую эффективность генератора.

Что представляет собой последовательность хаотических импульсов с точки зрения нелинейной динамики? На временной оси наблюдаются интервалы времени как с регулярным поведением временной реализации (промежутки между импульсами), так и с хаотическим поведением (хаотические импульсы). На регулярных участках реализации процесса старший ляпуновский показатель отрицателен, а на интервалах времени, соответствующих хаотическим импульсам, он в среднем положителен.

Периодическое воздействие на систему производится с частотой много меньшей характерных частот собственных колебаний. Отсюда следует, что динамика системы в каждый момент времени является квазистационарной и определяется значением V_E . В силу этого полная картина формирования последовательности хаотических радиоимпульсов – определение их амплитуды, длительности и частоты следования, – может быть проиллюстрирована графически на рис. 5, из которого следует, что частота повторения импульсов равна частоте внешнего периодического сигнала. Длительность импульса равна части периода, на которой $V_E > V_T$, а максимальная амплитуда хаотических радиоимпульсов пропорциональна величине $(V_{DC} + V_{AC} - V_T)$.

3. Динамика модели при периодическом воздействии видеоимпульсами

Выше было установлено, что генерирование хаотических импульсов возможно при изменении напряжения питания на эмиттере по гармоническому закону. При этом имеется возможность получения импульсов различной длительности и скважности. Покажем, что эти результаты могут быть обобщены на периодические сигналы другой формы, в частности, воздействие может осуществляться периодическими видеоимпульсами.

В случае воздействия гармоническим сигналом система относительно медленно выводится из «спящего» состояния и переходит в него. В случае же воздействия видеоимпульсами генератор скачкообразно переводится из режима «молчания» в режим хаотической генерации и обратно, т.е. имеет место разрыв воздействующего сигнала в момент начала импульса.

В режиме «молчания» мы имеем дело с динамической системой, имеющей нулевое устойчивое и ненулевое неустойчивое положения равновесия. Это означает, что в режиме покоя траектория, стартующая с произвольных начальных условий, быстро притягивается устойчивым положением равновесия. Таким образом, при скачкообразном переводе системы в режим

генерации видеоимпульсом при достаточно большом промежутке времени между видеоимпульсами, обеспечивается воспроизводимость близких начальных условий. Отсюда следует, что система будет генерировать хаотические импульсы, начальные участки у которых близки друг другу.

Результаты моделирования генерации хаотических импульсов представлены на рис. 6а. Спектры мощности колебаний в автономном и неавтономном генераторе показаны на рис. 6в.

Интересно отметить, что фронты импульсов нарастают очень быстро (рис. 6б), за время порядка одного квазипериода колебаний. Это обеспечивает высокую скорость переключения системы из режима покоя в режим генерации и обратно, и, тем самым, высокую скорость передачи информации.

4. Генерация сложных идентичных радиоимпульсов

Как в случае воздействия гармоническим сигналом, так и в случае воздействия видеоимпульсами, генерация каждого импульса начинается с практически одинаковых начальных условий. Поэтому можно ожидать, что, если под воздействием периодического сигнала динамическая система находится в режиме хаотической генерации в течении коротких промежутков времени, то соответствующие радиоимпульсам и стартующие примерно с одних и тех же начальных условий траектории не успеют разойтись из-за экспоненциальной неустойчивости на достаточно большое расстояние и, таким образом, будут наблюдаться последовательности радиоимпульсов, имеющие сложную внутреннюю структуру, но при этом практически одинаковые.

Расчёты показывают, что, действительно, такая ситуация имеет место в случае коротких импульсов и достаточно больших межимпульсных интервалов. При этом локальный старший ляпуновский показатель на промежутках с импульсами в среднем положителен (рис. 7), как и для исходного хаотического сигнала.

Данные, позволяющие судить об идентичности формы импульсов, приведены на рис. 8а (воздействие гармонического сигнала) и рис. 8б (воздействие видеосигнала), где в логарифмическом масштабе показаны модули разности $\Delta U_i(t) = |U_1(t) - U_i(t)|$ между реализацией первого импульса $U_1(t)$ и реализациями последующих импульсов $U_i(t)$, $i = 2, 3, \dots, 10$, изображённых на рис. 4а и рис. 6а, соответственно. Указанные разности на протяжении приблизительно 100 нс от момента начала импульсов не превышают по абсолютной величине значения 10^{-3} В, что свидетельствует об идентичности формы импульсов на этом интервале времени.

Возможность получения идентичных импульсов расширяет набор возможных методов приёма в сверхширокополосных прямохаотических схемах связи.

Заключение

В работе показана возможность генерации хаотических импульсов в модели генератора хаоса с 2.5 степенями свободы путём воздействия на генератор внешнего периодического сигнала. Предложенный метод генерации позволяет формировать поток сверхширокополосных цугов (радиоимпульсов) с заданной частотой повторения и скважностью. Установлено, что этот способ генерирования импульсов также позволяет получать идентичные сверхширокополосные хаотические импульсы, что является привлекательным с точки зрения их использования в сверхширокополосных системах связи.

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. N. 2. С. 224.
- [2] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физ.-мат. лит., 2002.
- [3] Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 2, С. 70.
- [4] Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I. et al. // Int. J. Bifurcation&Chaos. 2003. V. 13. N. 6. P. 1495.
- [5] Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике. Учебное пособие для вузов. М.: Наука, 1984.
- [6] Kennedy M. // IEEE Trans. 1994. V. CAS-41. N. 11. P. 771.
- [7] Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. // Радиотехника. 2005. N. 8. С. 67.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Принципиальная схема генератор с 2.5 степенями свободы.

Рис. 2. Фрагмент реализации сигнала $V_A(t)$ и его спектр мощности при $V_C = 5$ В, $V_E = 1$ В, $L_1 = 25$ нГн, $L_2 = 25$ нГн, $C_1 = 10$ пФ, $C_2 = 10$ пФ, $C_3 = 13$ пФ, $R_{BE} = 200$ Ом, $R_E = 246$ Ом, $R_{L1} = 20$ Ом, $R_{L2} = 20$ Ом, $\beta = 425$, $V_T = 0.75$ В.

Рис. 3. Диаграмма режимов работы генератора в зависимости от напряжения V_E : а) $\max(V_A)$ – значения локальных максимумов напряжения $V_A(t)$; б) распределение мгновенных значений $V_A(t)$ при $V_E = 1$ В; в) распределение мгновенных значений $V_A(t)$ при $V_E = 1.5$ В.

Рис. 4. Генерация последовательности хаотических импульсов в модели генератора, находящегося под воздействием внешнего гармонического сигнала $V_E(t)$ с частотой 1 МГц: а) скважность 2; б) скважность 4; в) спектры мощности последовательности хаотических импульсов: исходного сигнала (окружности), импульсов со скважностью 2 (ромбы), импульсов со скважностью 4 (квадраты).

Рис. 5. Работа генератора с точки зрения работы p - n перехода транзистора: при превышении напряжением $V_E(t)$ внешнего воздействия порога генерации V_T возникают колебания. Варьирование амплитуды постоянного напряжения V_{DC} , переменного напряжения V_{AC} и частоты внешнего воздействия f позволяет генерировать импульсы различной скважности и длительности.

Рис. 6. Генерация последовательности хаотических импульсов в модели генератора, находящегося под воздействием внешнего сигнала $V_E(t)$ из видеоимпульсов с частотой 1 МГц: а) скважность 2; б) момент начала хаотического импульса (1) и напряжения $V_E(t)$ внешнего воздействия (2); в) спектр мощности исходного сигнала (окружности) и последовательности хаотических импульсов (квадраты).

Рис. 7. Зависимость локального показателя Ляпунова $\lambda(t)$ в модели генератора, находящегося под действием внешнего: а) гармонического сигнала; б) сигнала из видеоимпульсов.

Рис. 8. Разность в логарифмическом масштабе между реализацией первого хаотического импульса и последующих импульсов: а) изображённых на рис. 4а; б) изображённых на рис. 6а.

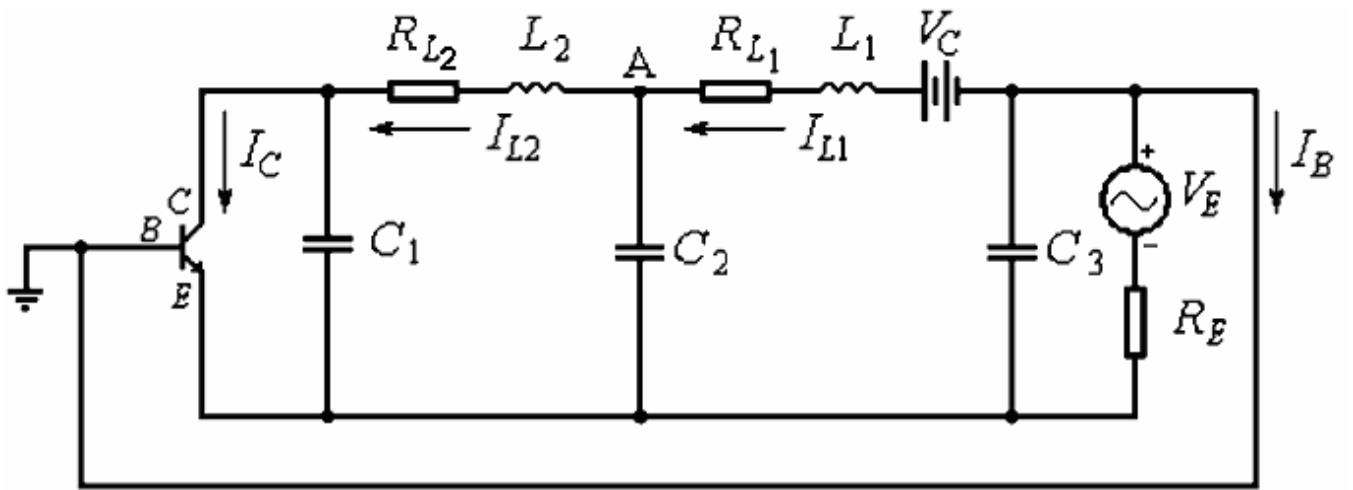
GENERATION OF CHAOTIC PULSE STREAM WITH DYNAMICAL SYSTEM DRIVEN BY PERIODIC FORCE

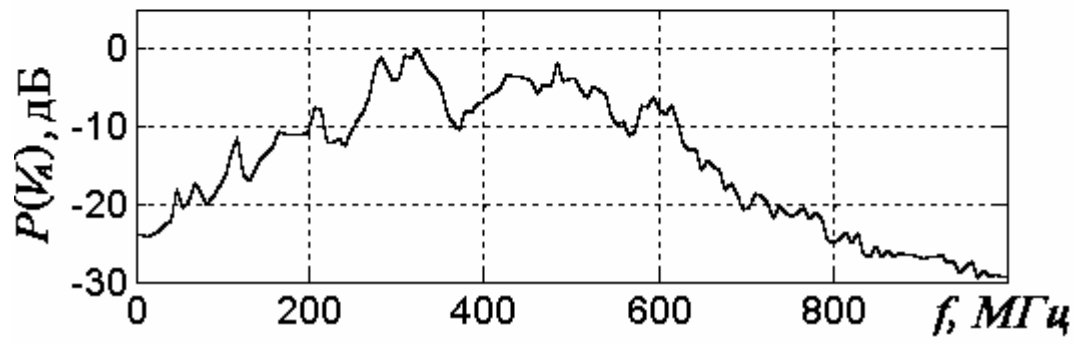
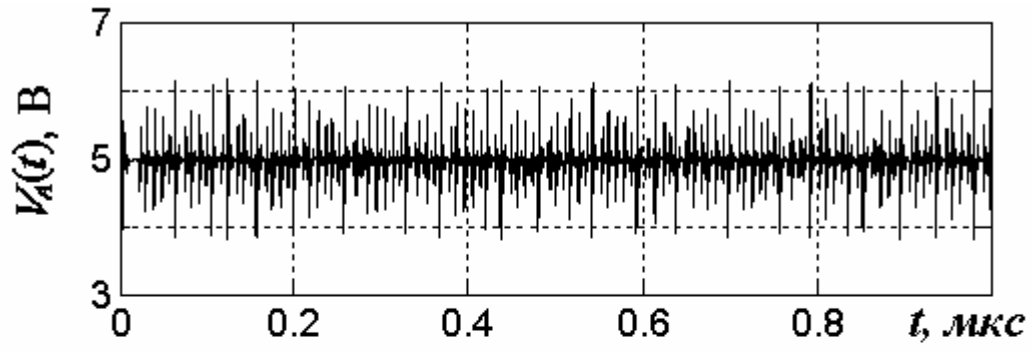
A.S. Dmitriev, E.V. Efremova, L.V. Kuzmin, N.V. Atanov

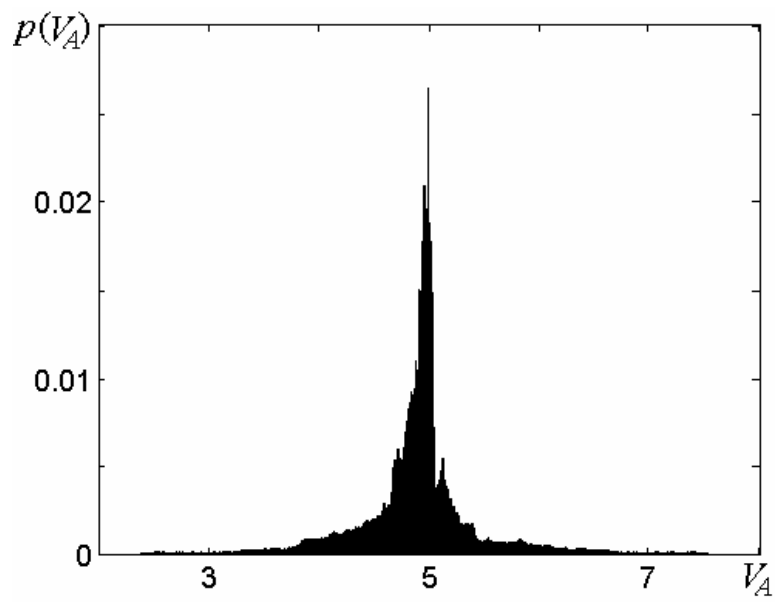
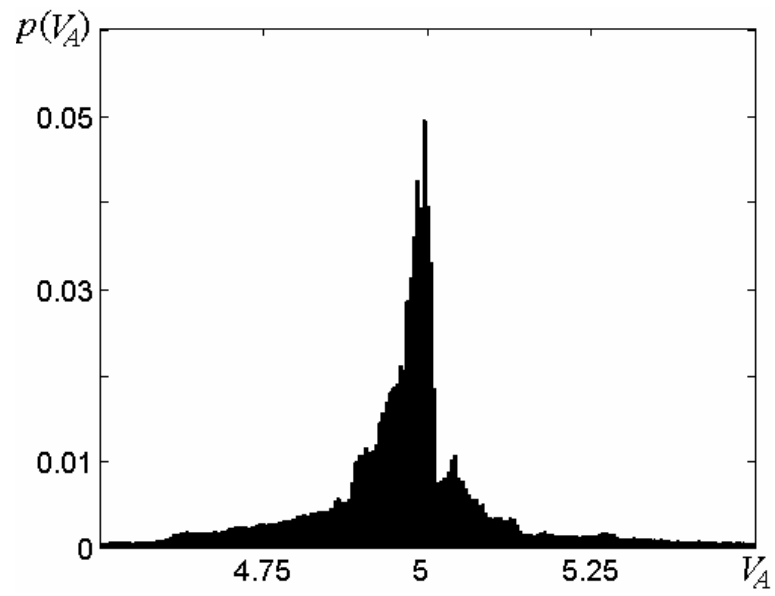
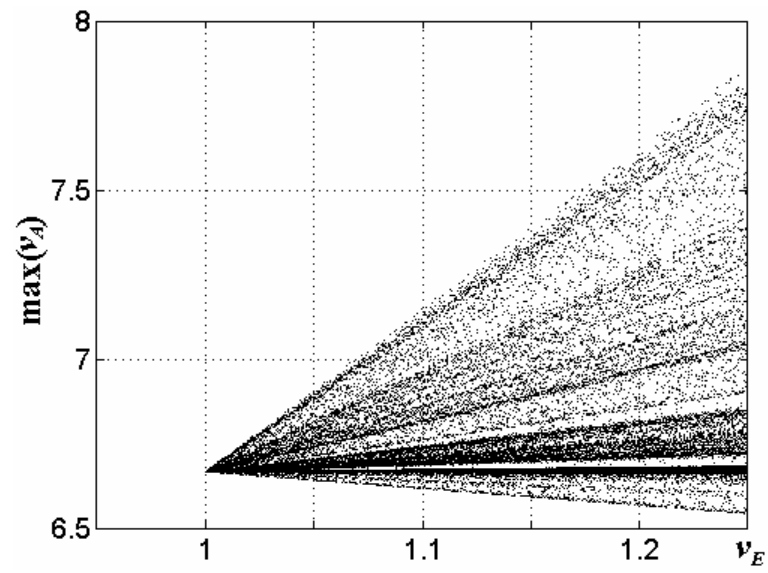
Institute of Radio-engineering and electronics of RAS,
125009, Russia, Moscow, Mokhovaya st., 11/7.

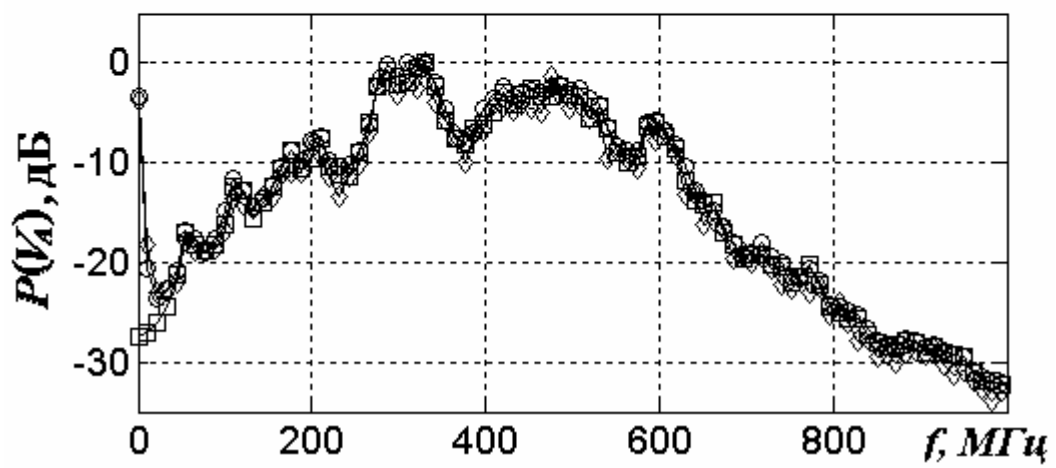
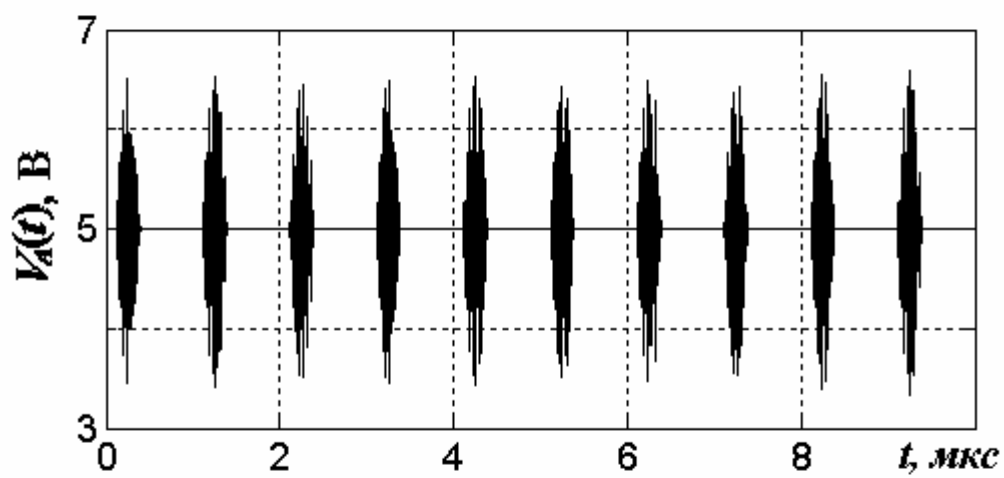
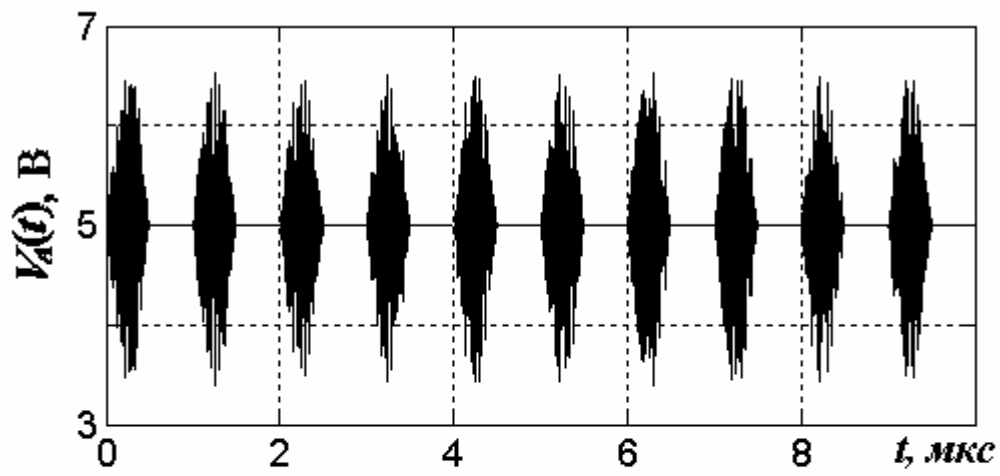
chaos@cplire.ru

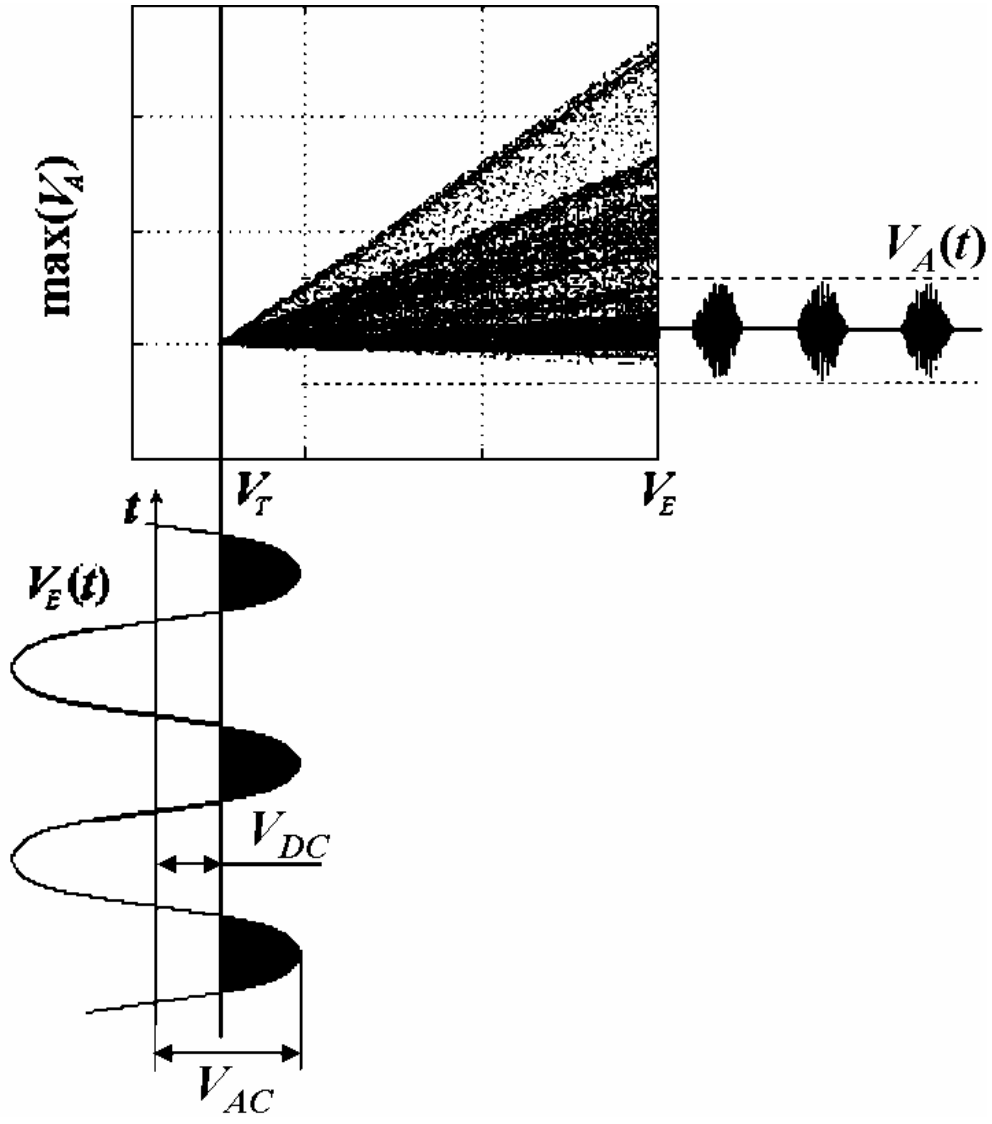
Possibility of chaotic pulse generation by means of chaotic oscillator driven by periodic force is investigated. The model of chaotic oscillator with 2.5 degrees of freedom contains bipolar transistor as an active element and it is described by a system of five ordinary differential equations. It is shown that variation of frequency and amplitude of driving force and transistor bias enables us to widely vary pulse rate, pulse length and duty cycle.

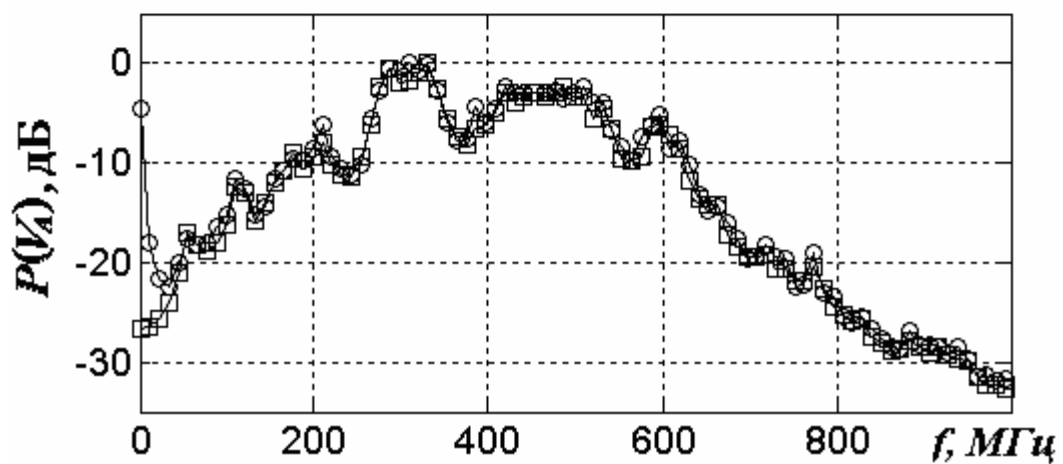
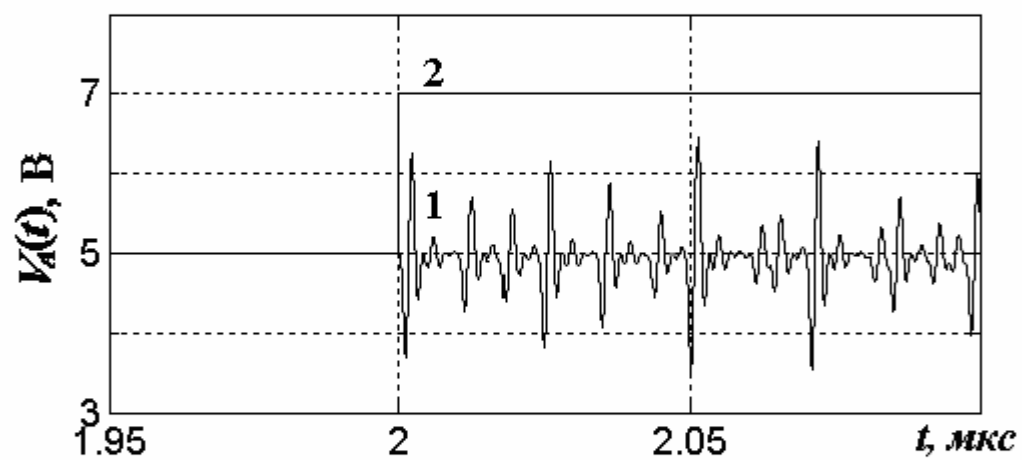
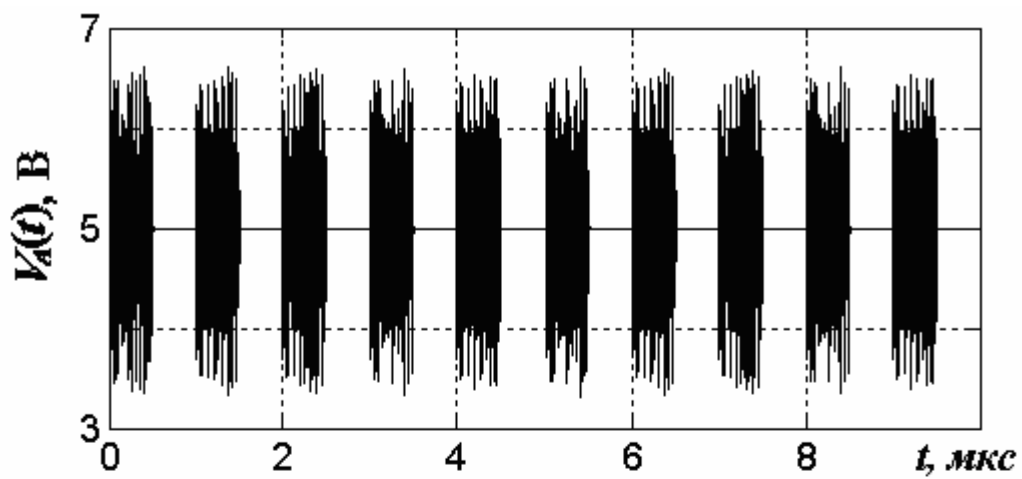


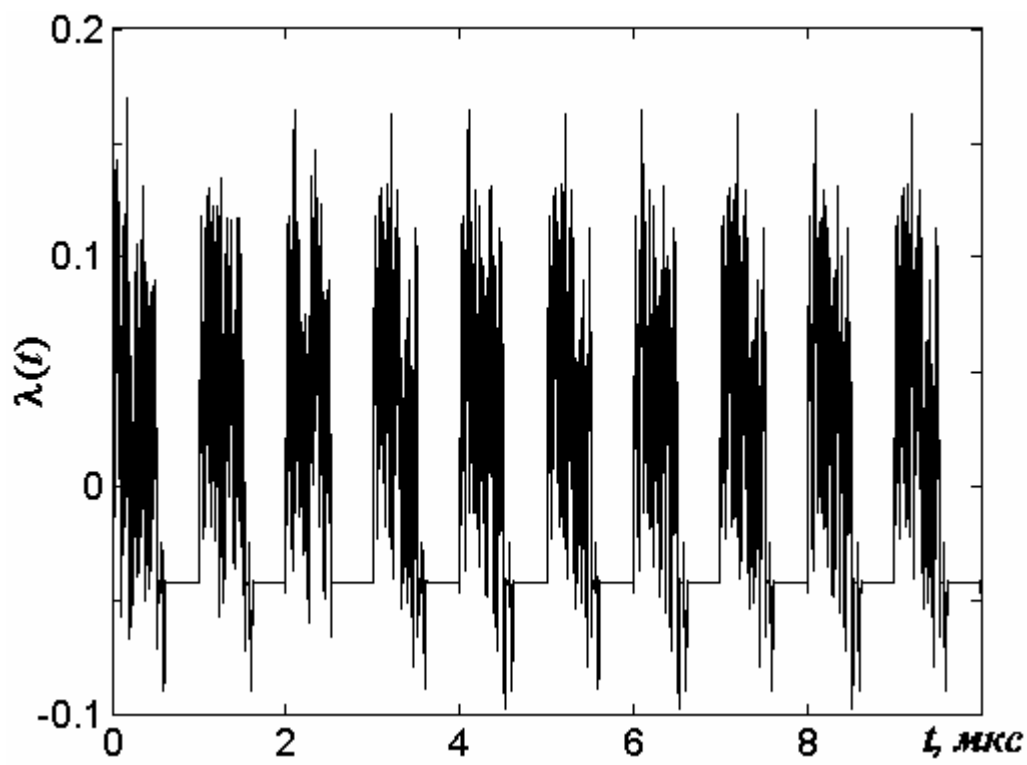
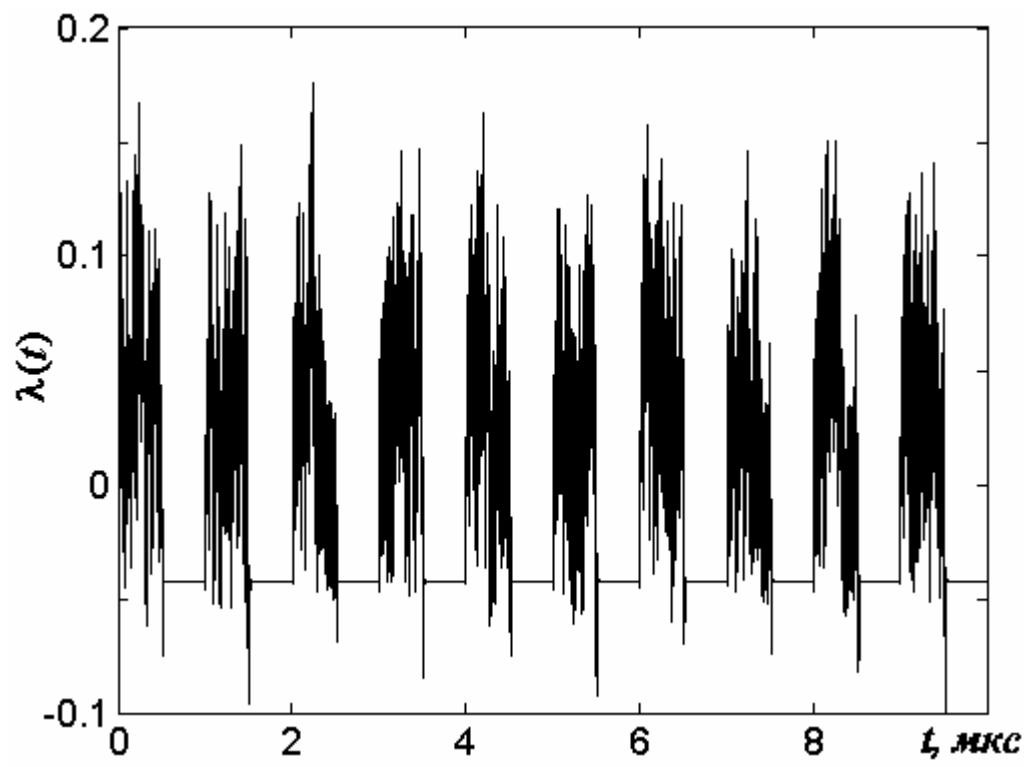


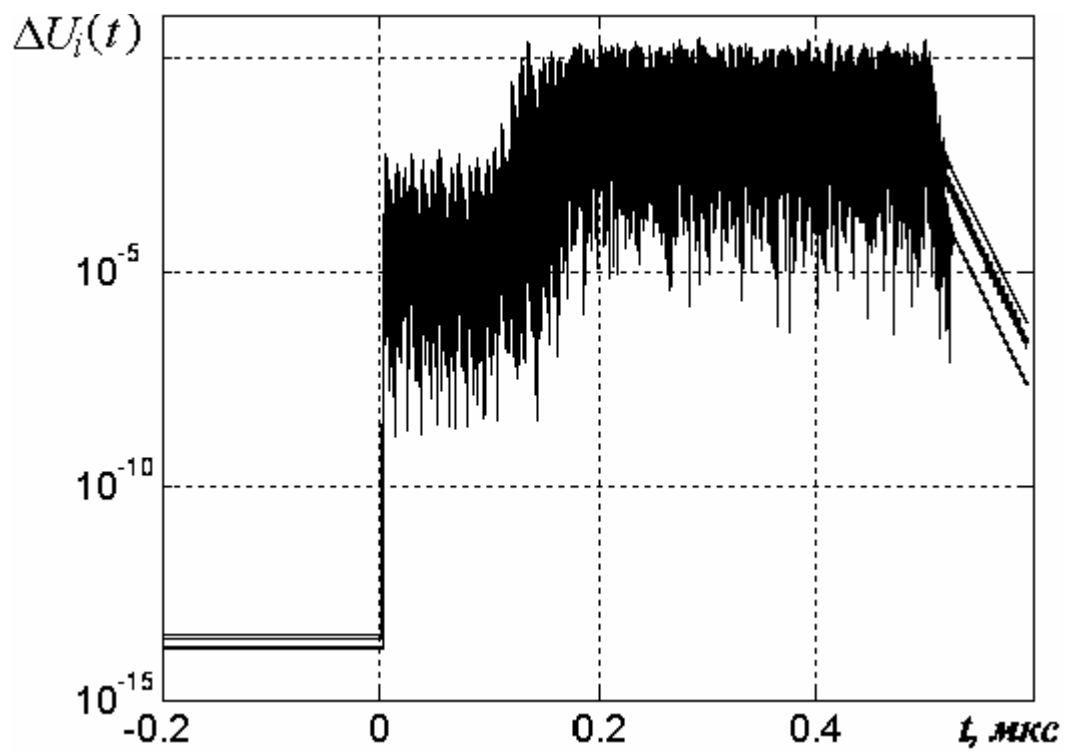
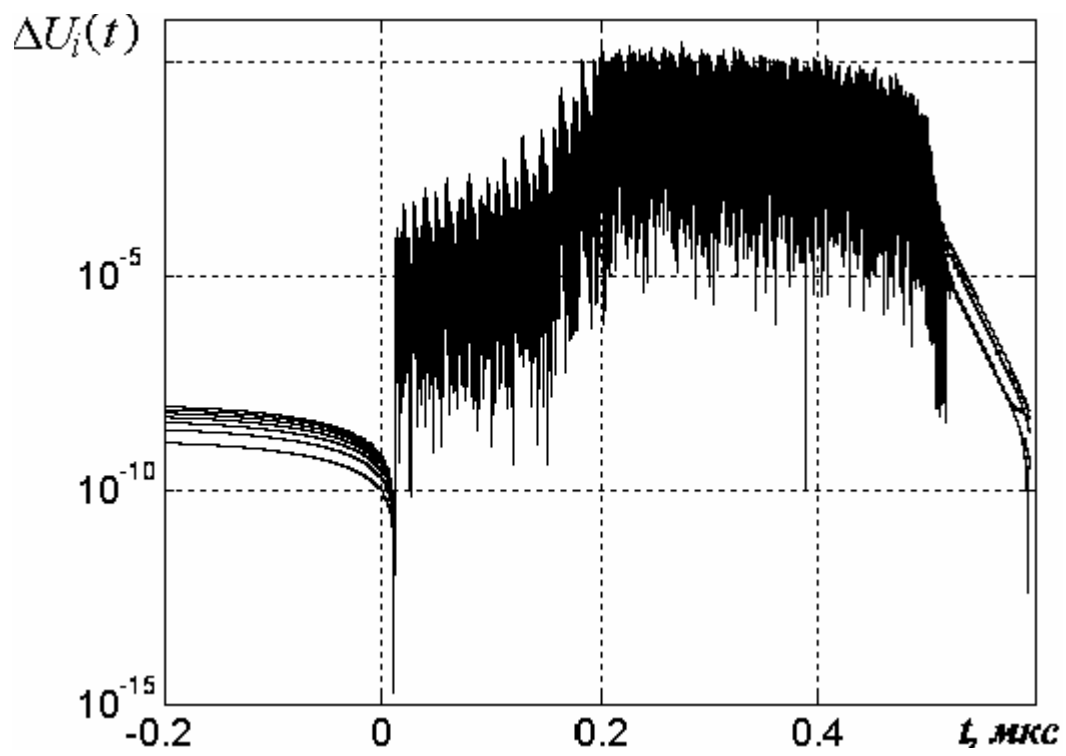












КОНТАКТЫ

Лев Викторович Кузьмин, лаб.341, ИРЭ РАН, Моховая 11-7, Москва, 125009.

Т. 203-78-30. Местный т. 250. Эл. почта: chaos@cplire.ru