

Генерация сверхширокополосных хаотических колебаний микроволнового диапазона в кольцевых автоколебательных системах с несколькими активными элементами

А.Ю. Никишов

*Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН
Московский Физико-технический Институт
nikishov@cplire.ru*

В работе предложена структура кольцевой автоколебательной системы, позволяющая получать сверхширокополосный хаотический сигнал микроволнового диапазона с равномерной спектральной плотностью мощности. Показано, что переход к хаосу происходит через возбуждение двухчастотных колебаний, образование в фазовом пространстве инвариантного тора и последующего его разрушения. Результаты моделирования и экспериментальной реализации приведены в работе на примере системы с тремя активными элементами, реализованными на основе КМОП-структур, которая позволяет получать устойчивую генерацию хаотических колебаний в диапазоне частот от 2.8 до 3.8 ГГц.

In work the structure of ring self-oscillatory system allows receiving a ultrawideband chaotic signal of a microwave range with uniform spectral power density is proposed. It is shown that transition to chaos occurs through excitation of double-frequency oscillations, formation in phase space of the invariant torus and its subsequent destruction. Results of modeling and experimental realization are resulted in work on an example of system with three active elements realized on the CMOS-structures, which allows receiving steady generation of chaotic oscillations in a range of frequencies from 2.8 to 3.8 GHz.

Введение

Начиная с середины 80-х годов двадцатого столетия различными научными коллективами, как в России, так и за рубежом ведутся активные исследования в области применения явления динамического хаоса для обработки и передачи информации [1-4].

На сегодняшний день хаотические сигналы являются одним из типов сигналов, которые могут применяться в качестве носителя информации в сверхширокополосных средствах связи. Они рекомендованы стандартом IEEE 802.15.4a, вышедшем летом 2007 года, для применения в сверхширокополосных беспроводных персональных сетях связи (UWB WPAN – Ultra Wide Band Wireless Personal Area Networks).

В качестве практически реализуемой коммуникационной схемы, в работе [4] была предложена модель прямохаотической схемы передачи информации, в которой хаотический сигнал генерируется непосредственно в микроволновом диапазоне и модулируется информационным сигналом.

Очевидно, что важнейшей частью систем передачи информации на основе динамического хаоса являются источники хаотических колебаний.

Несмотря на то, что имеются десятки динамических систем, демонстрирующих хаотическое поведение, создать на их основе источник хаотического сигнала пригодный для использования в коммуникационных системах не так просто.

На сегодняшний день хаотическими автоколебательными системами (АКС), используемыми в коммуникационных приложениях на основе динамического хаоса, и являющимися наиболее перспективными с точки зрения создания их в виде компактных, малопотребляющих устройств, а тем более реализации в виде интегральных микросхем, что стало давно стандартным подходом в современной электронике, являются твердотельные одностранзисторные генераторы хаотических,

колебаний выполненные на основе сосредоточенных элементов, и кольцевые АКС на нескольких активных элементах.

При этом источники хаоса первого типа довольно хорошо изучены, а принципы их построения, методы конструктивной оптимизации (включая возможность реализации в интегральном исполнении на кремний – германиевой технологии с биполярным транзистором в качестве активного элемента) и способы управления спектром генерируемых колебаний хорошо освещены в работе [5].

Что касается кольцевых АКС на нескольких активных элементах (в данном случае под активным элементом подразумевается малошумящий усилитель микроволнового диапазона), то на сегодняшний день они изучены меньше, а наиболее удачной экспериментальной реализацией такого источника хаоса является микрополосковый генератор хаоса кольцевой структуры на основе трёх чип-усилителей, а также его модификация в виде исполнения на сосредоточенных элементах, предложенная и описанная в [6].

Однако АКС подобной структуры являются перспективными с точки зрения создания на их основе интегральных микросхем, на технологиях, в которых отсутствуют достаточно мощные (то есть обладающие большой крутизной в микроволновом диапазоне частот) как в кремний – германиевых или арсенид – галлиевых, транзисторы. Прежде всего, речь идёт о КМОП технологии. Это связано с тем, что для возбуждения колебаний в однотранзисторных генераторах, требуется мощность, которую в рассматриваемых АКС можно было бы распределить на несколько активных элементов, при этом за счёт правильного выбора рабочей точки можно увеличить эффективность транзисторов в их составе в несколько раз.

Поэтому в данной работе предложена структура такой хаотической АКС микроволнового диапазона, позволяющая получать сверхширокополосный хаотический сигнал микроволнового диапазона с равномерной спектральной плотностью мощности в диапазоне частот 2.8-3.8 ГГц. Представлены результаты моделирования системы, установлен факт генерации хаотических колебаний, проанализированы бифуркационные явления. Исследована экспериментальная реализация АКС в виде монолитной интегральной схемы, реализованной по КМОП технологии и, показаны базовые колебательные режимы устройства. Сделан вывод, что в эксперименте, как и в моделях, переход к хаосу происходит через возбуждение двухчастотных колебаний, образование в фазовом пространстве тора и последующего его разрушения.

Структура

Блок схема предложенной хаотической АКС (рис. 1) включает в себя три одинаковых двухкаскадных усилителя и частотно избирательную систему (ЧИС), замкнутые в кольцо обратной связи. В данном случае были выбраны три активных элемента, поскольку при таком количестве, как показало моделирование, система работает в оптимальном режиме (существуют хаотические сверхширокополосные колебания при приемлемом КПД и выходной мощности). При меньшем количестве, не выполняются условия для возбуждения хаотических колебаний, при большем – потребление системы увеличивается, а КПД понижается.

Первый каскад усилителя выполнен по схеме с общим истоком и с отрицательной обратной связью, второй каскад по схеме с общим стоком. При этом первый каскад усиливает входной сигнал, а второй имеет коэффициент усиления порядка единицы, меньший уровень насыщения по сравнению с первым каскадом и играет роль ограничителя. ЧИС, состоящая из одного RC и двух LC звеньев, вместе с частотными характеристиками усилителей ограничивает спектр сигнала требуемой полосой частот.

Вывод сигнала из петли генерации хаотических колебаний осуществляется через буферный усилитель.

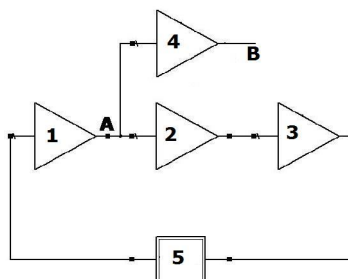


Рис. 1. Блок схема автоколебательной системы. 1, 2, 3 – усилители; 4 – буферный усилитель; 5 – частотно-избирательная система; А – точка вывода сигнала из кольца обратной связи; В – выход

Моделирование

Исследование автоколебательной системы включало в себя: установление факта генерации хаотических колебаний в определенных зонах значений параметров, изучение бифуркационных явлений, а также нахождение условий генерации хаотических колебаний с требуемыми спектральными свойствами.

Для изучения динамики системы была разработана схемотехническая модель, соответствующая блок-схеме, представленной на рис. 1. Моделирование производилось в специализированном пакете Advanced Design System (ADS).

В качестве наблюдаемой переменной использовалось напряжение $U(t)$ сигнала на выходе системы (точка В на рис. 1).

Исследование показало, что для выбранных значений параметров, при напряжении питания усилителей $U_a = 1.4 \text{ V}$ в системе возбуждаются колебания на частоте около 4 GHz (рис. 2а). При напряжении питания $U_a \sim 1.5 \text{ V}$ происходит возбуждение второй собственной частоты в области 1 GHz (рис. 2б). С дальнейшим увеличением напряжения в спектре мощности возникают комбинационные частоты (рис. 2в), а затем при $U_a = 1.8 \text{ V}$ происходит переход к колебательному режиму с непрерывным спектром мощности (рис. 2г), соответствующему динамическому хаосу. Развитие колебаний в модели суммировано на диаграмме режимов (рис. 3). На ней вдоль оси U откладываются максимумы сигнала $U(t)$ при адиабатически медленном изменении параметра U_a . Из диаграммы, в частности, видно, что зона хаотических колебаний как минимум охватывает диапазон изменения напряжений от 1.8 до 2.0 V, что свидетельствует о достаточно высокой устойчивости режима хаотических колебаний к изменению этого параметра. Перестройка резонансов, происходящая с увеличением напряжения питания, находит своё отражение в увеличении числа спектральных составляющих колебаний. Таким образом, возбуждение хаотических колебаний происходит в данном случае на основе разрушения двухчастотного автоколебательного режима. Описанный процесс иллюстрирует общий принцип генерации хаотических колебаний микроволнового диапазона в рассматриваемой автоколебательной системе.

Возможность возникновения двухчастотных колебаний в системе обусловлена следующим. Из фазово-частотной характеристики (ФЧХ) следует, что в диапазоне от 0 до 10 ГГц две частоты (0.7 и 4 ГГц) имеют набег фазы $2\pi n$, где n – целое число. На каждой из этих частот возможно возбуждение автоколебаний при выполнении баланса амплитуд согласно условию Найквиста-Михайлова. Анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) показывает, что при напряжении питания 1.4 В коэффициент усиления становится больше единицы в окрестности 4 ГГц, вследствие чего на этой

частоте возникает первый автоколебательный режим. В дальнейшем, при напряжении 1.6В коэффициент усиления становится положительным в районе 0.7 ГГц, возникают колебания на этой частоте и в системе возникает двухчастотный автоколебательный режим. Основная мощность генерируемых колебаний лежит в диапазоне от 3.6 до 4.6 ГГц и составляет в полосе -4 дБм при потребляемом токе 25 мА.

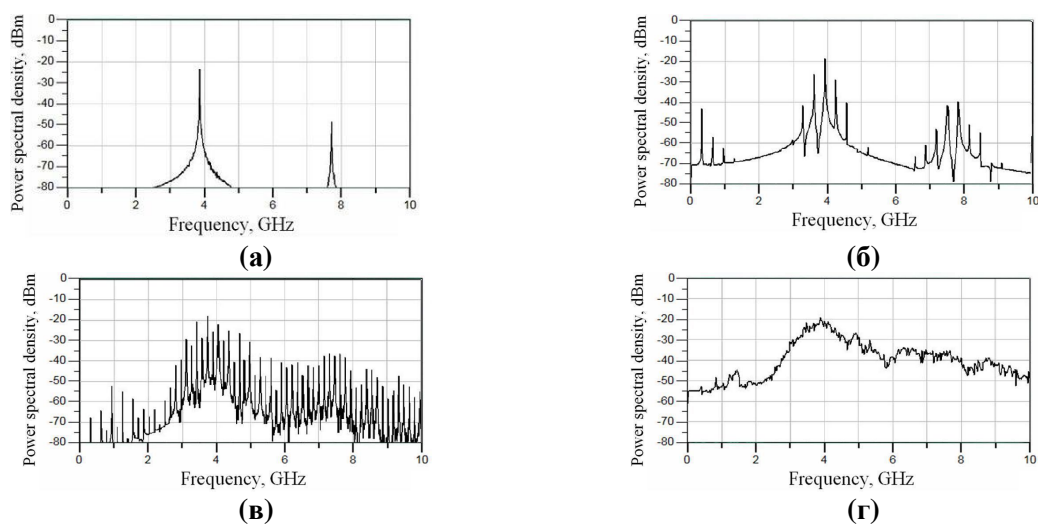


Рис. 2. Спектральная плотность мощности колебаний при напряжении питания: (а) 1.4 В; (б) 1.5 В; (в) 1.6 В; (г) 1.8 В

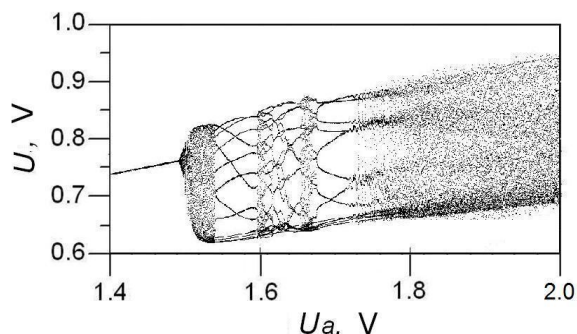


Рис. 3. Диаграмма колебательных режимов. U_a – напряжение питания усилителей, U – максимумы сигнала $U(t)$.

Эксперимент

На основании положительных результатов моделирования создан экспериментальный макет генератора хаотических колебаний. Автоколебательная система реализована в виде интегральной микросхемы, изготовленной на КМОП технологии 180 нм.

Размер топологии генератора составил менее 1 мм^2 . Выходная нагрузка составляла 50 Ом. Настройка режимов осуществлялась путём изменения напряжения питания, которое варьировалось от 0 до 3.5 Вольт. Наблюдаемыми характеристиками, на основании которых делалось заключение о работоспособности устройства и делалось сопоставление с результатами моделирования, являлись спектральная плотность мощности и интегральная мощность выходного сигнала генератора.

Экспериментальное исследование показало, что при напряжении 1.5 В в осцилляторе возникают одночастотные колебания в районе 3.3 ГГц (рис. 3а). При увеличении напряжения питания возбуждаются двухчастотные колебания (вторая

частота в районе 500 МГц), которые сменяются многочастотным режимом (рис. 3б, в). При напряжении порядка 2.1 В возникают хаотические колебания с равномерным спектром мощности в диапазоне частот 2.8 – 3.8 ГГц и центральной частотой в районе 3.3 ГГц (рис. 3г). Интегральная выходная мощность составляет -6 дБм.

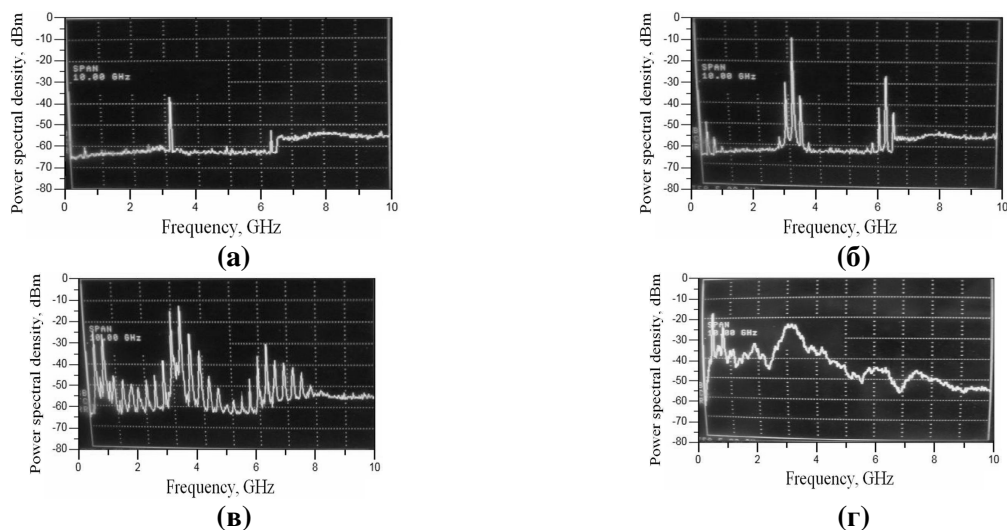


Рис. 10. Спектральная плотность мощности колебаний для напряжения питания: (а) 1.5V; (б) 1.8V; (в) 2 V; (г) 2.1V

Заключение

Таким образом, в процессе проведенных исследований впервые разработана и реализована автоколебательная структура на КМОП структуре, в которой получена генерация хаотических колебаний микроволнового диапазона (2.8–3.8 GHz).

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы. Во-первых, в эксперименте наблюдаются режимы колебаний, качественно идентичные колебательным режимам, которые наблюдались при моделировании. Это означает, что теоретические выводы о бифуркационных явлениях и механизмах перехода к хаосу в системе, сделанные на основании результатов моделирования, подтверждаются экспериментально. Во-вторых, возникновение хаотических колебаний происходит в устройстве путём разрушения двухчастотного автоколебательного режима.

Литература

1. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А. и др. "Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах", Радиотехника, 2000, № 3, с.9-20.
2. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас и др., "Сверхширокополосная прямохаотическая передача информации в СВЧ-диапазоне", Письма в ЖТФ, 2003, т. 29, вып.2, с. 70-76.
3. Spec. Is. on applications of nonlinear dynamics to electronic and information engineering // Proc. IEEE. 2002. V. 90. N5.
4. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
5. Ефремова Е.В. "Твердотельные источники хаоса микроволнового диапазона на основе автоколебательных систем с сосредоточенными параметрами". Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, 17 окт. 2008 г.
6. Никишов А.Ю., Панас А.И. // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. №1. С. 54–62.