

Генератор микроволнового хаоса

С. В. Савельев

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова российской академии наук; Фрязино, пл. Введенского, 1; e-mail: savelyev@ms.ire.rssi.ru.

Предложена, реализована и исследована хаотическая автоколебательная система на основе мощного биполярного транзистора 2Т 982 А-2. В экспериментах была получена устойчивая генерация хаотических колебаний в диапазоне частот 5,26 – 5,44 GHz со спектральной плотностью $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/MHz}$.

The chaotic self-oscillatory system on the basis of the powerful bipolar A-2 transistor 2T 982 is offered, realized and investigated. In experiments steady generation of chaotic fluctuations in the range of frequencies of 5,26 - 5,44 GHz with a spectral density of $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/MHz}$ was received.

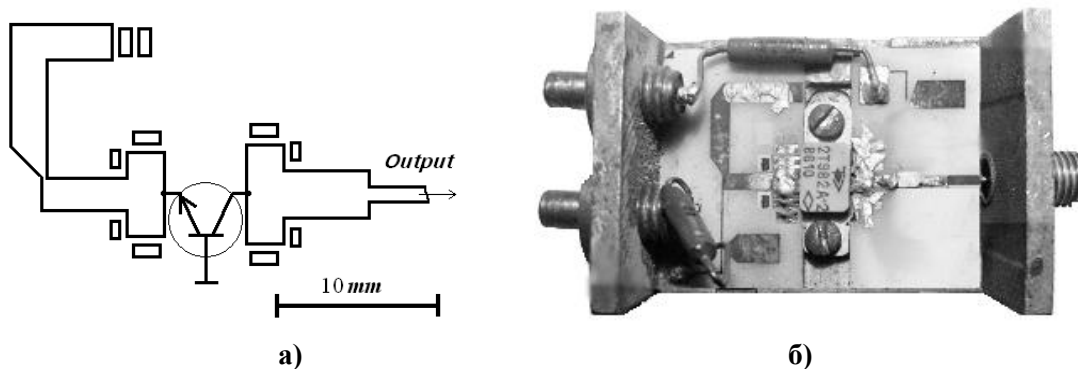
Необходимость создания источников динамического хаоса микроволнового диапазона длин волн основана на возможности использования его как носителя информации, например [1], так и более специализированного его применения - в системах скрытой радиолокации и радиопротиводействия.

В первом случае задача может быть решена с помощью твердотельных источников микроволнового хаоса на сосредоточенных элементах [2] работающих в режиме слабых токов, когда значения параметров активного элемента не зависят от рабочего тока. Здесь задача построения генераторов хаоса решается путём моделирования электронных систем с помощью готовых программных пакетов, например Cadence IC или Electronic WorkBench 5.12. При этом основополагающие спектральные характеристики выходных хаотических сигналов таких генераторов обычно не превышают следующих значений: интегральная мощность не более 1 mW, спектральная плотность 10^{-6} W/MHz при КПД не более 1%.

Во втором случае требования к источникам динамического хаоса иные. Они обуславливают необходимые значения спектральных характеристик выходного сигнала, которые составляют: спектральная плотность не менее 10^{-3} W/MHz при интегральной мощности не менее 100 mW по порядку величины, КПД не менее 10%. Анализ существующей элементной базы показывает, что такие значения параметров выходного сигнала генераторов динамического хаоса в микроволновом диапазоне, возможно получить только используя мощные транзисторы, предназначенные для работы в распределённых системах построенных по планарной технологии, которые работают в режиме большого тока. Такой режим характеризуется значимой зависимостью значений параметров транзисторов от тока. Так коэффициент усиления и импедансы транзистора в первом приближении обратнопропорциональны силе тока [3]. Кроме того, для мощных транзисторов характерен большой разброс значений параметров от экземпляра к экземпляру. Например, для мощного отечественного транзистора 2Т 982 А-2 разброс по партии транзисторов для коэффициента усиления составляет 30%, для входного и выходного импедансов – 35%. Именно эти обстоятельства являются препятствием для использования готовых программных пакетов для моделирования электронных систем на базе мощных транзисторов.

В настоящей работе демонстрируется возможность создания генераторов динамического хаоса на основе регенеративных усилительных каскадов. В работе [4], где регенеративный усилительный каскад на мощном транзисторе 2Т 982 А-2 в режиме автогенерации моделируется как генератор с выделенной инерционностью,

представлены теоретические предпосылки возможности генерации микроволнового хаоса. Показано, что такой регенеративный усилительный каскад может переходить в автогенераторный хаотический режим вблизи верхней рабочей частоты транзистора, когда центральная рабочая частота усилительного каскада f отвечает условию $2\pi f \in [0,6\omega_N; \omega_N]$, где ω_N – частота отсечки коэффициента усиления.



а) б)
Рис.1. Топология и внешний вид генератора

Верхняя рабочая частота транзистора 2Т 982 А-2 равна 7,5 GHz. Работа по созданию генератора микроволнового хаоса проводилась в частотном диапазоне с центральной частотой $f = 5,35$ GHz, как близкой к верхней граничной частоте, так и характеризующейся достаточным коэффициентом усиления транзистора с точки зрения возможности перехода усилительного каскада в автогенераторный режим для широкого диапазона напряжений питания.

Транзистор 2Т 982 А-2 конструктивно предназначен для работы в схеме с общей базой, эмиттер и коллектор которого подключены к выполненным по планарной микрополосковой технологии элементам топологии согласующие входной и выходной импедансы транзистора с 50-омными подводящими линиями. Топология выполнена на подложке из поликора толщиной 1 mm.

Задача синтеза генератора сводилась к экспериментальному нахождению напряжений питания транзистора и топологии согласующих элементов, при которых реализовывался выходной хаотический сигнал с максимальной спектральной плотностью генерируемых колебаний в полосе усиления транзистора при наименьшей изрезанности огибающей спектра мощности с заранее заданной центральной частотой. Процесс проходил в несколько этапов.

На первом этапе использовалась топология согласующих элементов транзистора для регенеративного усилительного каскада с центральной частотой f , рис. 1, а. Напряжения питания составляли паспортные величины: напряжение на коллекторе $U_{BC} = 17,5V$, напряжение на эмиттере $U_{BE} = 0$. Далее значение U_{BE} понижалось и при $U_{BE} = -0,8$ V усилительный каскад переходил в автогенераторный режим на центральной частоте усилительного каскада. После этого U_{BC} понижалось до 12 V. С точки зрения процессов происходящих в транзисторе, это вызывало увеличение времени рассасывания неосновных носителей в высокоомном коллекторном слое транзистора [3], а значит увеличение инерционности в выходной цепи автогенератора. В системе возникал двухчастотный режим автогенерации в полосе усилительного каскада на частотах f и f_2 , так что $f > f_2$. Далее значения U_{BE} понижалось до -1,15 – -1,2 V, что сопровождалось увеличением рабочего тока транзистора, а значит увеличением инерционности в коллекторной цепи транзистора. В спектре мощности возникала сетка частот с эквидистантной расстановкой составляющих на комбинации f и f_2 , что говорило о повышении степени нелинейности автоколебательного процесса. При дальнейшем понижении U_{BE} система демонстрировала ряд бифуркаций периода

колебаний по закону натурального ряда, что согласуется с результатами, полученными в [4], и при $U_{BE} = -1,26 - -1.29$ V переходила к хаотическим колебаниям со сплошным спектром. Последующая настройка сводилась к выравниванию формы огибающей спектра мощности с помощью последовательного подключения настроечных площадок в топологии согласующих элементов и варьирования напряжений питания U_{BC} и U_{BE} при контроле спектральной плотности колебаний. Подключение настроечных площадок, изменяющих первоначальные значения комплексной проводимости согласующих элементов транзистора, и изменение напряжений питания приводило к изменению центральной частоты генератора, которая отличалась от f .

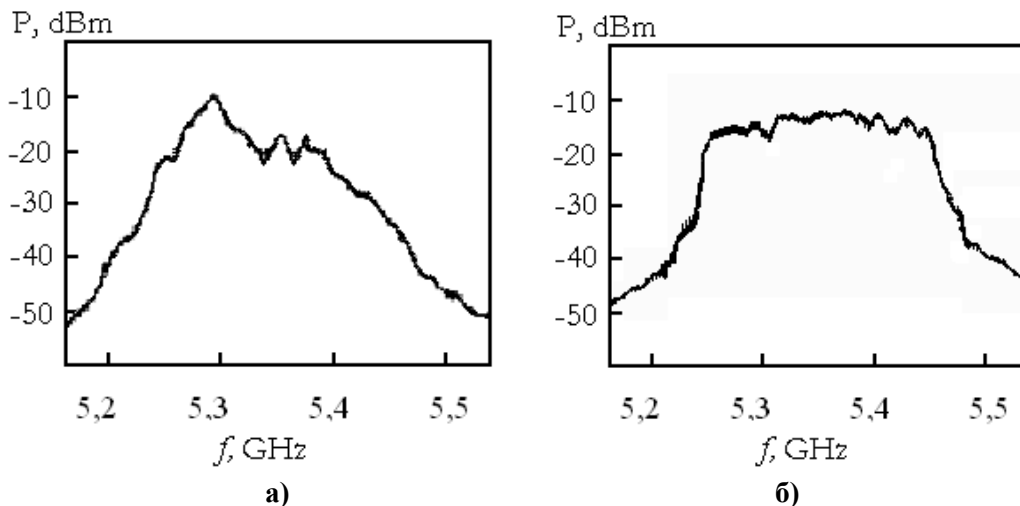


Рис. 2. Спектры мощности генератора шума

На рис. 2, а показан характерный хаотический спектр мощности после первой итерации синтеза генератора при интегральной мощности 390 mW, где видно, что центральная частота генерируемого хаоса ниже заданной. Поэтому второй этап синтеза генератора микроволнового хаоса включал в себя перерасчет топологии согласующих элементов транзистора с поправкой на разницу между центральной частотой хаотического сигнала получившейся после первой итерации и заданной частотой f . После этого транзистор включался в новую рассчитанную топологию и процесс настройки повторял описанный выше. Для синтеза генератора микроволнового хаоса с заранее заданными характеристиками обычно достаточно три описанные выше итерации.

На рис 2, б представлен спектр мощности генератора микроволнового хаоса с центральной частотой $f = 5,35$ GHz и усреднённой спектральной плотностью генерируемых колебаний $1,3 \cdot 10^{-3}$ W/MHz. Интегральная мощностью микроволнового хаотического сигнала составляла 230 mW, что при напряжениях питания $U_{BC} = 7,3$ V, $U_{BE} = -1,28$ V и потребляемом токе 270 mA давало значение коэффициента полезного действия генератора 10%.

На рис. 1, б показана фотография генератора микроволнового хаоса с указанными выше характеристиками и со спектром мощности в диапазоне примерно 5,26 – 5,44 GHz. Неравномерность огибающей спектра мощности не превышает 3 dBm в указанном диапазоне частот.

Таким образом, в процессе проведённых исследований на базе мощного отечественного транзистора 2Т 982 А-2 реализован генератор хаотических колебаний микроволнового диапазона с относительной шириной спектра мощности 3,4% и спектральной плотностью генерируемых колебаний $1,3 \cdot 10^{-3}$ W/MHz.

Литература

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Никишов А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2009. Том 35. Вып. 23. С. 40-46.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва. «Мир». 1984. Книга 1. Изд. № 20/2918. Ч. 2, гл. 3, с. 190. (S.M. Sze. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey. Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill. 1981.)
4. Савельев С.В. // РЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 850 – 858.