

06:09

Генератор микроволновых хаотических колебаний на мощном биполярном транзисторе

© С.В. Савельев

Филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, Фрязино, Московская область
E-mail: saveliyev@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2012 г.

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 $1.3 \cdot 10^{-3}$ W/MHz.

Необходимость создания источников динамического хаоса микроволнового диапазона длин волн основана на возможности как использования его в качестве 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 путем 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 распределенных 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 обратно пропорциональны 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 данной 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 усилительного каскада f отвечает условию $2\pi f \in [0, 6\omega_N; \omega_N]$, где ω_N — частота отсечки коэффициента усиления.

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, согласующим входной и выходной импедансы транзистора

с 50-Ω 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 $U_{BC} = 17.5 \text{ V}$, напряжение на эмиттере $U_{BE} = 0$. Далее значение U_{BE} понижалось и при $U_{BE} = -0.8 \text{ V}$ 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} понижались до $-1.15 - -1.2 \text{ V}$, 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 свидетельствовало 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 $U_{BE} = -1.26 - -1.29 \text{ V}$ 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 .

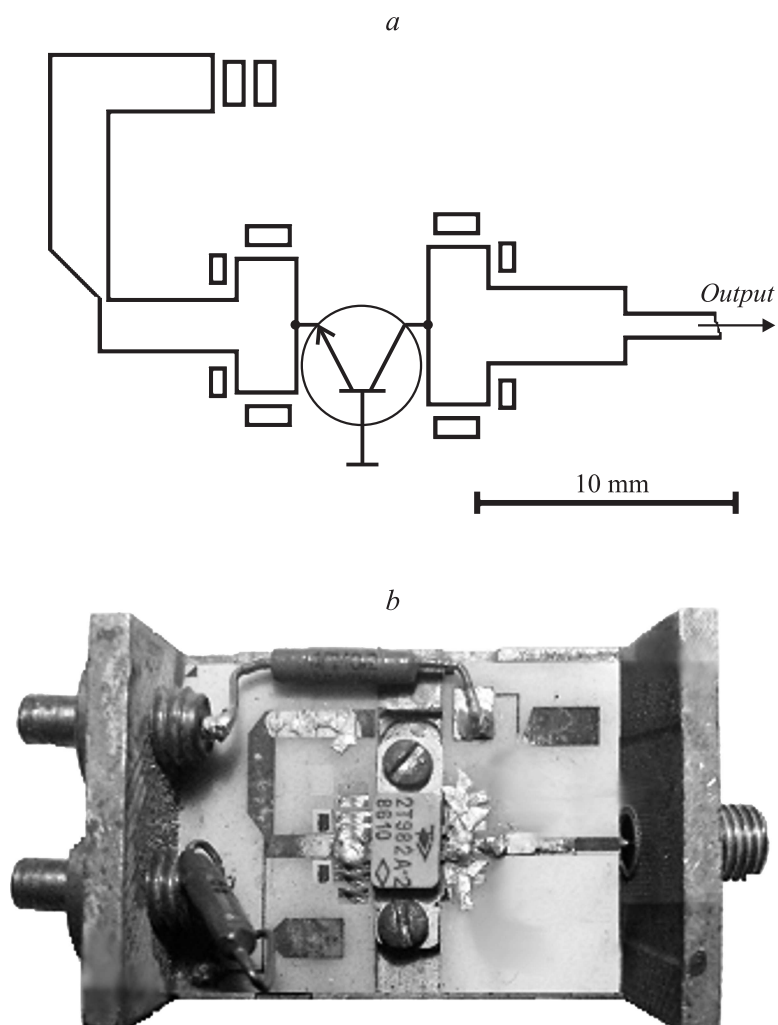


Рис. 1. *a* — топология согласующих элементов транзистора 2Т982 А-2 для центральной частоты 5.35 GHz; *b* — генератор микроволнового хаоса.

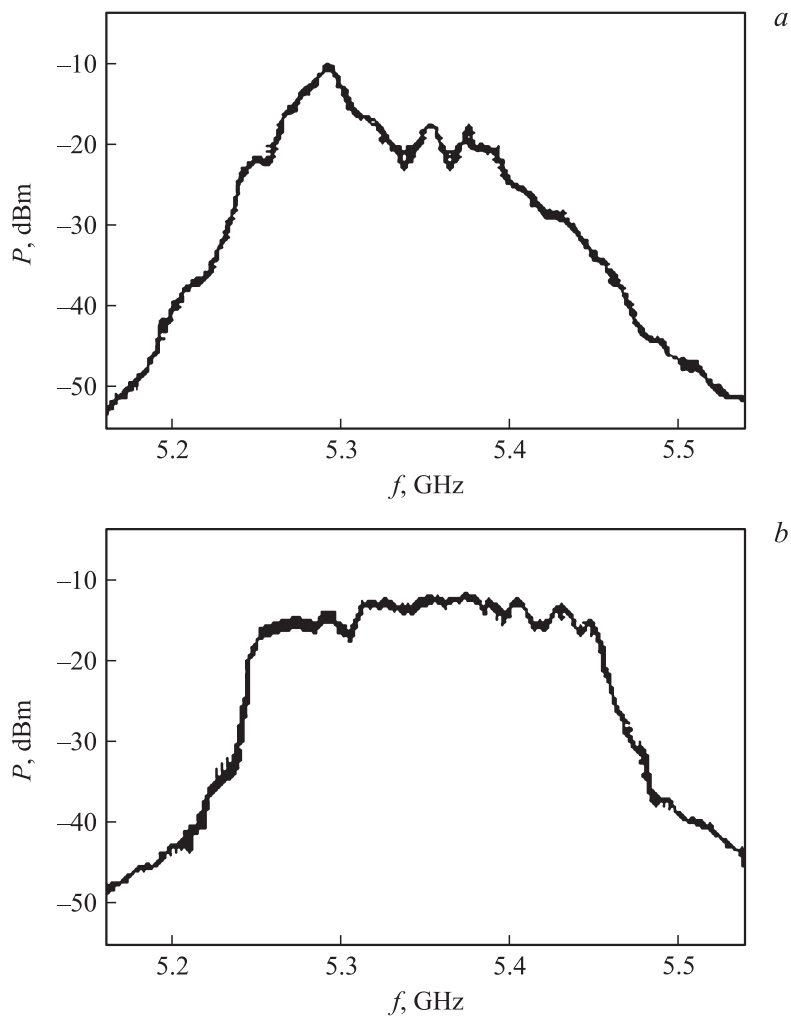


Рис. 2. *a* — спектр мощности генератора после первой итерации; *b* — окончательный спектр мощности сигнала микроволнового генератора хаоса.

На рис. 2, *a* 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 генераторами 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 трех описанных выше итераций.

На рис. 2, *b* представлен спектр мощности генератора микроволнового хаоса с центральной частотой $f = 5.35$ GHz и усредненной спектральной плотностью генерируемых колебаний $1.3 \cdot 10^{-3}$ W/MHz. Интегральная мощность 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, *b* 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 проведенных 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.

Список литературы

- [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. Т. 35. В. 23. С. 40–46.
- [3] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Кн. 1. Ч. 2. С. 190. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey: Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, 1981).
- [4] *Савельев С.В.* // РЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 850–858.