

11

Источники радиоосвещения на основе сверхширокополосных микрогенераторов хаотических колебаний

© А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова

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

Поступило в Редакцию 17 июля 2016 г.

Рассматривается задача освещения предметов и поверхностей искусственными некогерентными источниками микроволнового излучения с целью их последующего наблюдения с помощью радиометрической аппаратуры. Одной из основных проблем при реализации этой задачи является создание эффективных источников самого микроволнового излучения, подобных осветительным устройствам в видимом диапазоне света. Предлагается в качестве источников некогерентного широкополосного микроволнового излучения использовать генераторы сверхширокополосных хаотических колебаний. Описываются экспериментальный образец такого источника, реализованный в виде микрогенератора хаоса на основе кремниво-германиевого кристалла, и его характеристики.

Под радиоосвещением будем понимать искусственно созданное шумовое (шумоподобное) поле широкополосного (сверхширокополосного) некогерентного в пространстве и во времени излучения в радио- или микроволновом диапазоне длин волн. Радиоосвещение реализуется с помощью одного или нескольких источников широкополосного (сверхширокополосного) некогерентного микроволнового излучения. Попадая на близлежащие поверхности и предметы, микроволновое излучение частично поглощается в них, частично проходит через них и частично отражается. Тем самым, распространяясь далее, оно несет в себе информацию о среде, с которой взаимодействует. В этом отношении ситуация аналогична ситуации с обычным (видимым) светом. Разница в том, что это другой частотный диапазон и другие законы взаимодействия со средой, в которой происходит процесс. Кроме того, для обычного света имеется такой замечательный инструмент наблюдения, как глаз. Для извлечения информации об объектах, находящихся в зоне радиоосвещения (радиосвета) нужны специальные датчики или системы таких

датчиков. Аналогия между радиоосвещением и обычным освещением в видимом глазом диапазоне электромагнитного спектра достаточно глубокая [1]. В обоих случаях речь идет о некогерентном излучении с широким спектром, что исключает эффекты интерференции и сводит вопросы наблюдения к оценке мощностных (и, возможно, спектральных, как в случае цветного зрения) характеристик принимаемого сигнала. Принципиальной особенностью радиоосвещения по отношению к обычному свету является разница в характерном диапазоне частот (примерно на пять порядков) для света и радиосвета. Последнее означает существенно более низкую потенциальную разрешающую способность при использовании радиоосвещения по сравнению с видимым светом. Однако, очевидно, существует достаточно много ситуаций, когда это либо приемлемо, либо не имеет принципиального значения.

Наблюдения объектов с помощью некогерентного микроволнового излучения и других некогерентных сигналов в отличных от частот видимого света диапазонах частот давно и плодотворно используется, например, в космических исследованиях, при наблюдении Земли из космоса [2–4] и в медицинской диагностике [5,6]. При этом используется некогерентное микроволновое излучение, порождаемое естественными процессами, такими как собственное тепловое излучение физических тел в микроволновом диапазоне, или рассеяние микроволнового излучения, создаваемого мощными естественными источниками (например, Солнцем). Еще одним активно развивающимся направлением использования некогерентного микроволнового излучения для наблюдения объектов являются радиометрические системы с использованием шумовой подсветки [7,8]. В таких системах на радиометре размещается направленный источник искусственного некогерентного электромагнитного излучения, который подобно прожектору в оптическом диапазоне подсвечивает наблюдаемую область пространства. Наиболее перспективными для систем с подсветкой считаются миллиметровый и субмиллиметровый (терагерцовый) диапазоны частот. Таким образом, имеется большой массив информации, который может дать ответы как минимум на ряд исходных вопросов, связанных с радиоосвещением и присущими ему свойствами. Однако сама, достаточно очевидная, идея радиоосвещения с помощью локальных искусственных источников, подобных осветительным приборам в видимом диапазоне электромагнитного спектра, упоминается в литературе как некая экзотика (см., например, [1]).

Одной из причин такого положения является отсутствие эффективных источников некогерентного микроволнового излучения, которые могли бы быть использованы для радиоосвещения. Действительно, это должны быть устройства, которые излучают достаточно мощные по сравнению с тепловым излучением шумовые или шумоподобные широкополосные сигналы. В эксплуатации они должны быть простыми и похожими на источники обычного света типа ламп накаливания, люминесцентных ламп, светодиодных ламп и т. п. В противном случае речь о радиоосветительных приборах может идти только применительно к специальной исследовательской аппаратуре.

В микроволновой технике используются два типа источников шума: газоразрядные трубки и полупроводниковые $p-n$ -диоды в режиме лавинного пробоя. Их основным параметром является коэффициент избыточности шума (excess noise ratio — ENR), который определяется как отношение сгенерированной мощности шума к мощности шума резистора, согласованного с конкретной линией передачи, при температуре окружающей среды и измеряется в dB. Газоразрядные трубки имеют типичный ENR 15 dB, что примерно в 30 раз больше мощности теплового шума, создаваемого согласованным резистором при температуре окружающей среды 290 К. Таким образом, трубка генерирует шум, соответствующий температуре примерно $9 \cdot 10^3$ К. Значение ENR для диодных источников шума достигает 30 dB, и их шумовая температура имеет величину около $3 \cdot 10^5$ К, что соответствует спектральной плотности мощности $p \approx 4 \cdot 10^{-9}$ mW/MHz (-84 dBm/MHz). Дальнейшее повышение ENR может быть достигнуто за счет применения усилителей. Однако при существенном повышении выходной мощности требуется достаточно сложная и недешевая конструкция. Таким образом, ни один из этих типов источников шума не может рассматриваться как подходящее решение для источников радиоосвещения.

В данной статье в качестве источников для радиоосвещения предлагается использовать генераторы динамического хаоса, которые можно рассматривать как источники шумоподобных аналоговых сигналов в соответствующем диапазоне частот.

Эти устройства прошли долгий путь эволюции от вакуумных приборов, использующих естественное запаздывание в распределенных системах, к полупроводниковым устройствам с распределенными колебательными системами на основе микрополосков и далее к полупроводниковым устройствам с колебательными системами на элементах с

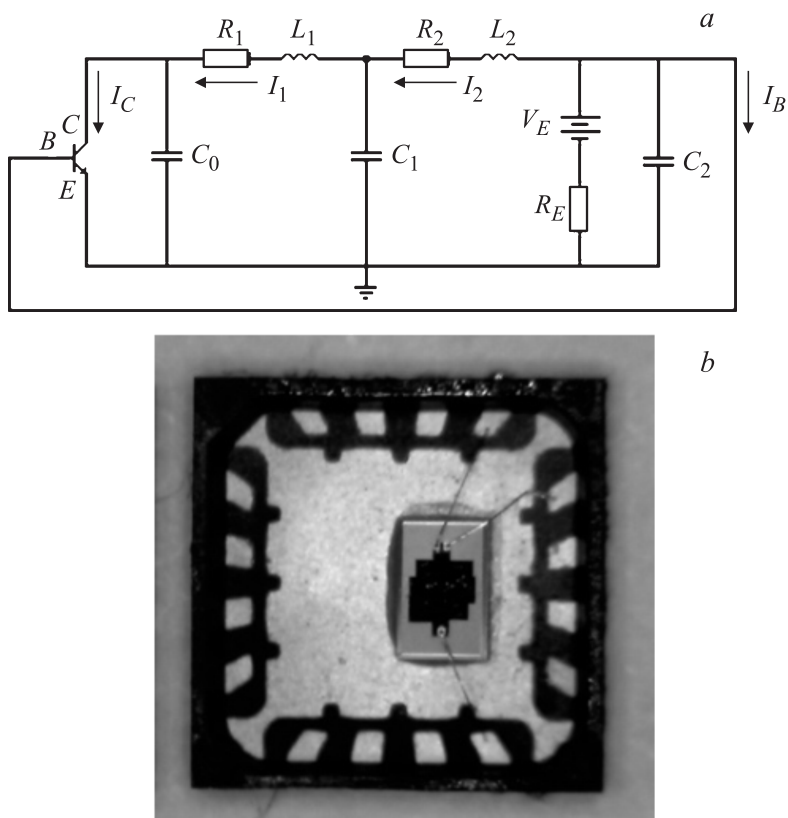


Рис. 1. Микрогенератор сверхширокополосных хаотических колебаний: *a* — автоколебательная система генератора; *b* — кремний-германиевый кристалл в корпусе; *c* — спектр мощности генерируемого сигнала.

сосредоточенными параметрами [9]. При этом речь идет об устройствах, генерирующих хаотические сигналы в заданном диапазоне радио- или микроволновых частот. Типичный генератор хаоса микроволнового диапазона с сосредоточенными параметрами реализуется на основе автоколебательной системы с 2.5 степенями свободы, активным элементом которой является биполярный транзистор (рис. 1, *a*).

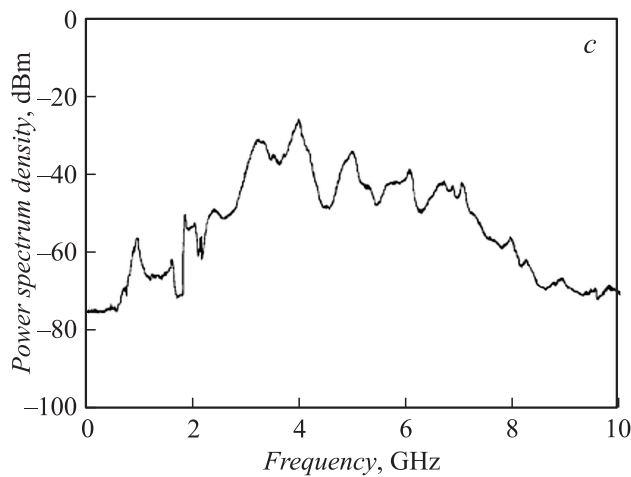


Рис. 1 (продолжение).

Математическая модель генератора представляет собой систему из 5 обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned}
 C_0 \dot{V}_{CE} &= I_1 - I_C, \\
 L_1 \dot{I}_1 &= V_1 - V_{CE} - R_1 I_1, \\
 C_1 \dot{V}_1 &= I_2 - I_1, \\
 L_2 \dot{I}_2 &= V_{BE} - V_1 - R_2 I_2, \\
 C_2 \dot{V}_{BE} &= (V_E - V_{BE})/R_E - I_2 - I_B,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где V_{CE} , V_{BE} — напряжения коллектор–эмиттер и база–эмиттер; V_1 — напряжение на емкости C_1 ; I_1 , I_2 , I_C , I_B — токи через индуктивность L_1 , индуктивность L_2 , коллектор C и базу B транзистора. Структура этой автоколебательной системы такова, что генерируются колебания в некоторой полосе частот. При этом генерация в требуемой полосе частот и хаотический характер колебаний обеспечиваются соответствующим выбором параметров автоколебательной системы [9]. На основе генераторов микроволнового хаоса работают сверхширокополосные

приемопередатчики для беспроводной связи и беспроводных сенсорных систем [10].

Следующим шагом в миниатюризации и повышении технологичности генераторов хаоса является создание генераторов хаоса на основе автоколебательных систем типа (1) в виде интегральных микросхем. Работы в этом направлении начались несколько лет назад. В частности, в монолитной интегральной схеме на основе SiGe были получены хаотические колебания в диапазоне 3–8 GHz с выходной мощностью $50 \mu\text{W}$ [11]. К настоящему времени в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН получены экспериментальные образцы микрогенераторов хаоса в диапазоне частот 3–7 GHz с интегральной мощностью излучения около $300 \mu\text{W}$ (рис. 1, *b, c*). В приборах используется кремний-германиевая технология $0.25 \mu\text{m}$. Площадь кристалла 1.6 mm^2 .

Создание генераторов динамического хаоса в виде микросхем принципиально меняет ситуацию в области производства: теперь источники некогерентных сверхширокополосных шумоподобных сигналов микроволнового диапазона можно изготавливать массово и с низкой себестоимостью. Поэтому появляется возможность расширить области их применения на новые задачи, и радиоосвещение — одна из таких задач.

Ближайшими аналогами источников микроволнового некогерентного сверхширокополосного излучения в видимом глазом диапазоне являются светодиоды с белым свечением. Подобно тому, как такие светодиоды являются эффективными источниками широкополосного некогерентного излучения в видимом диапазоне частот, микрогенераторы динамического хаоса являются эффективными источниками широкополосного некогерентного излучения в микроволновом диапазоне частот.

Действительно, светодиоды (с белым свечением) излучают некогерентный шумовой сигнал в полосе длин волн $\Delta\lambda = 650\text{--}450 \text{ nm}$. При этом полоса частот белого света с радиофизической точки зрения является сверхширокой, поскольку $\Delta f/f = \Delta\lambda/\lambda > 0.25$, где Δf — разница между верхней и нижней частотами в спектре излучения, а f и λ — средняя частота и средняя длина волны в спектре соответственно.

Аналогия микрогенератора хаоса по спектральным характеристикам со светодиодами белого свечения становится очевидной, если посмотреть на огибающую спектра мощности сигнала микрогенератора (рис. 1, *c*). Анализ характеристик модели микрогенератора показал, что

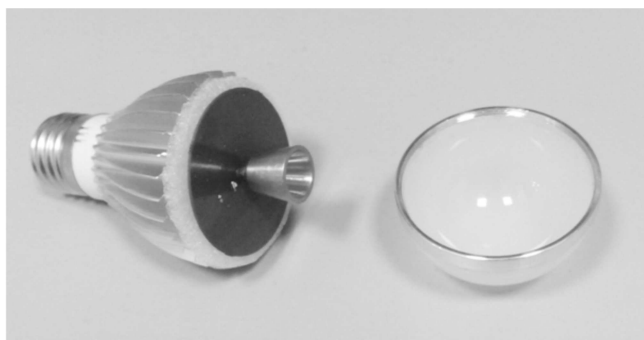


Рис. 2. Лампа для радиоосвещения с активным элементом на кремний-германиевом микрогенераторе хаотических колебаний.

реализация процесса имеет шумоподобный вид, автокорреляционная функция быстро падает, статистическое распределение мгновенных значений сигнала близко к гауссовскому. Таким образом, хаотический сигнал обладает характеристиками, обеспечивающими создание некогерентного освещения в микроволновом диапазоне частот.

Важным общим свойством микрогенераторов динамического хаоса и светодиодов является некогерентность генерируемого сигнала. Это свойство принципиально для применения микрогенераторов хаоса в качестве источников освещения, поскольку обеспечивает равномерную, без интерференции засветку окружающей среды при использовании как одиночного, так и множественных источников. Еще одной общей чертой светодиодов и микросхем генераторов хаоса (chaos emitted chip — СЕС) является сходство в электрических характеристиках: оба типа устройств являются низковольтными и могут применяться как поодиночке, так и в виде последовательных и параллельных сборок, в том числе в целях увеличения мощности или распределения излучения по пространству.

Например, по аналогии со светодиодной лампой может быть создана лампа для радиоосвещения с активным элементом в виде микросхемы. Экспериментальный образец радиоосветительной лампы представлен на рис. 2. Он разработан на основе описанной выше микросхемы генератора хаотических колебаний. Конструктивно лампа включает в себя плату с электронными компонентами, антенну и источник

вторичного питания, обеспечивающий преобразование сетевого переменного напряжения 220 V в напряжение постоянного тока 5 V. Верхняя металлизированная сторона платы вместе с конусным элементом образует дискополиконическую излучающую антенну [12]. Кроме того, на верхней стороне платы расположен индикаторный светодиод, отображающий состояние устройства (включено или выключено). Электронная часть лампы размещена в стандартном покупном корпусе для светодиодных ламп с радиопрозрачной пластмассовой полусферой и цоколем типа E27. Вторичный источник питания находится в цоколе лампы. Лампа излучает в широком диапазоне углов симметрично относительно продольной оси.

Создание радиоосвещения в помещении или на открытой площадке сводится к ввинчиванию лампы радиоосвещения в обычный патрон стандартного светильника и нажатию кнопки выключателя.

Детальное обсуждение аппаратуры для наблюдения радиоосвещенных объектов и самого процесса наблюдения выходит за рамки данной работы. Отметим только, что прототипами таких приборов могут быть традиционные радиометрические приемники [2–6] и датчики на основе логарифмических детекторов [10]. Последние обладают достаточно высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном. Так, например, приемник с логарифмическим детектором и ненаправленной антенной будет „чувствовать“ радиосвет лампы с мощностью излучения $300 \mu\text{W}$ на расстояниях от десятков сантиметров до нескольких сотен метров.

Авторы благодарят М.Е. Герасимова, В.В. Ицкова, В.А. Калошина и К.З. Нгуена за помощь в подготовке экспериментов. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

Список литературы

- [1] Polivka J., Fiala P., Machac J. // Prog. Electromagn. Res. 2011. V. 111. P. 311–330.
- [2] Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986.
- [3] Armand N.A., Polyakov V.M. Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment. N.Y.: CRC Press, 2005.

- [4] *Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И.* Спутниковый мониторинг Земли: микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: URSS, 2015.
- [5] *Гуляев Ю.В., Годик Э.Э.* // Вестник АН СССР. 1983. № 8. С. 118–125.
- [6] *Гуляев Ю.В.* Физические поля и излучения человека. Новые неинвазивные методы медицинской диагностики. М.: РБОФ „Знание“ им. С.И. Вавилова, 2009.
- [7] *Пелюшенко С.А., Ракуть И.В., Железняков Ю.А., Пелюшенко А.С.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 10–11. С. 890–898.
- [8] *Ивашиов С.И., Бугаев А.С.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 9. С. 935–942.
- [9] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.* Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012.
- [10] *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М.* // РЭ. 2006. Т. 51. № 10. С. 1193–1209.
- [11] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Никишов А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 23. С. 40–46.
- [12] *Калошин В.А., Мартынов Е.С., Скородумова Е.А.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 9. С. 1094–1098.