

Радиосвет: концепция и научно технические решения

А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, В.В. Ицков, М.М. Петросян

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*

Первая часть доклада посвящена задаче освещения предметов и поверхностей искусственными некогерентными источниками микроволнового излучения с целью их последующего наблюдения с помощью радиометрической аппаратуры. Одной из основных проблем при решении этой задачи является создание эффективных приборов самого микроволнового излучения, подобных осветительным устройствам в видимом диапазоне света. Предложено в качестве приборов некогерентного широкополосного микроволнового излучения использовать передатчики на основе генераторов динамического хаоса. В качестве примера описывается экспериментальный образец такого прибора – радиоосветительная лампа на базе микрогенератора хаоса и ее характеристики.

Во второй части доклада рассматривается задача создания приемника некогерентного микроволнового излучения от источников, реализованных на основе сверхширокополосных генераторов хаотических колебаний, и «освещаемых» этими источниками предметов и поверхностей. Предлагается структура устройства, описывается экспериментальный образец и показывается его способность регистрировать источники некогерентного микроволнового излучения с интегральной выходной мощностью и ~ 2 мВт на расстоянии более 100 метров.

Введение

Под радиоосвещением будем понимать локальное, искусственно созданное, шумовое (шумоподобное) поле широкополосного (сверхширокополосного) некогерентного в пространстве и во времени излучения в радио или микроволновом диапазоне длин волн. Радиоосвещение реализуется при помощи одного или нескольких устройств некогерентного 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.

Сходство между радиосветом и обычным светом достаточно глубокое [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 цветового зрения) характеристик принимаемого сигнала. Принципиальной особенностью радиосвета по отношению к обычному свету является громадная разница в характерной области частот (примерно на пять порядков) для света и радиосвета. Последнее означает существенно более низкую потенциальную разрешающую способность при использовании радиосвета по сравнению с видимым светом. Однако, очевидно, существует достаточно много ситуаций, когда это, либо приемлемо, либо не имеет принципиального значения.

В данной статье рассматривается задача создания эффективных источников радиоосвещения. Прием радиосвета затрагивается вкратце, только для оценки

потенциальной дальности действия радиоосветительных устройств. Подробный анализ этого вопроса требует специального рассмотрения и выходит за рамки данной статьи.

1. Источники радиоосвещения

Наблюдение объектов с помощью некогерентного микроволнового излучения и других некогерентных сигналов в диапазонах частот, отличных от частот видимого света, давно и плодотворно применяется, в радиоастрономии, 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). 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 искусственных 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 некогерентные сигналы. Устройства должны быть простыми в эксплуатации похожими в этом отношении на источники обычного света типа ламп накаливания, люминесцентных ламп, светодиодных ламп и т.п. В противном случае речь о радио осветительных приборах может идти только применительно к специальной исследовательской аппаратуре.

В микроволновой технике используются два типа источников шума: газоразрядные трубки и полупроводниковые *pn*-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 дБ. Газоразрядные трубки имеют типичный ENR ~ 15 дБ, 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 дБ (см., например, [7]), и их шумовая температура имеет величину около $3 \cdot 10^5$ К, что соответствует спектральной плотности мощности $p \approx 4 \cdot 10^{-9}$ мВт/МГц (-84 дБм/МГц). Интегральная мощность устройства в полосе 1000 МГц составляет $4 \cdot 10^{-6}$ мВт. Дальнейшее повышение ENR может быть достигнуто за счет применения усилителей. Однако при существенном повышении выходной мощности требуется достаточно сложная и не дешевая конструкция [8].

В последующих разделах будет показано, что приемлемая мощность для отдельного искусственного источника радиоизлучения лежит в диапазоне 0,1 – 1,0 мВт. Таким образом, ни один из упомянутых типов источников шума не может рассматриваться как подходящее решение для приборов радиоосвещения.

2. Передатчик микроволнового динамического хаоса как искусственный источник радиосвещения

В работах [22, 23] 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 [9-11], к полупроводниковым устройствам с распределенными колебательными системами на основе микрополосков, и, далее, к полупроводниковым устройствам с колебательными системами на элементах с сосредоточенными параметрами [12]. При этом речь идет об устройствах, генерирующих хаотические сигналы в заданном диапазоне радио или микроволновых частот.

Основные этапы исследований и разработок по созданию миниатюрных генераторов хаоса микроволнового диапазона, проводившихся в ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН с начала 2000 годов, представлены на рис. 1. До начала этих исследований микроволновые генераторы хаоса на основе полупроводниковых активных элементов существовали только в виде микрополосковых приборов. К 2008 г. удалось добиться значительного прогресса в создании устройств в виде генераторов хаоса на сосредоточенных параметрах. Это привело к упрощению конструкции, уменьшению размеров, повышению технологичности и снижению стоимости. Кроме того, появилась возможность в тиражировании таких устройств с объемами партий в сотни и тысячи штук.

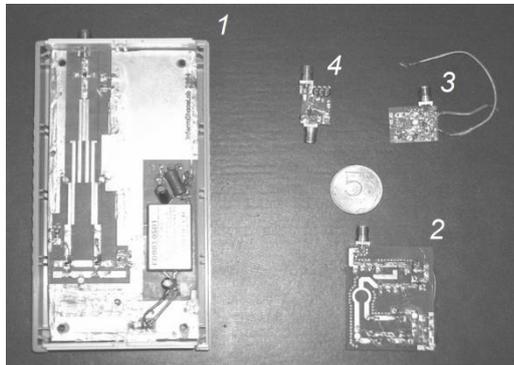


Рис. 1. Эволюция генераторов микроволнового хаоса: 1 – генератор на микрополосковой технологии 2003 г.; 2 – генератор на трех усилительных микросборках с элементами микрополосков 2005 г.; 3 – генератор с сосредоточенными элементами на трех усилительных микросборках; 4 – генератор с сосредоточенными элементами на одном биполярном транзисторе.

Типичный генератор хаоса микроволнового диапазона с сосредоточенными элементами реализуется на основе автоколебательной системы с 2,5 степенями свободы, активным элементом которой является биполярный транзистор (рис. 2).

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

$$\begin{aligned}
 C_0 \dot{V}_{КЭ} &= I_1 - I_K, \\
 L_1 \dot{I}_1 &= V_1 - V_{КЭ} - R_1 I_1, \\
 C_1 \dot{V}_1 &= I_2 - I_1, \\
 L_2 \dot{I}_2 &= V_{БЭ} - V_1 - R_2 I_2, \\
 C_2 \dot{V}_{БЭ} &= (V_Э - V_{БЭ}) / R_Э - I_2 - I_Б,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $V_{КЭ}$, $V_{БЭ}$ – напряжения коллектор-эмиттер и база-эмиттер,

V_1 – напряжение на емкости C_1 ;

I_1, I_2, I_K, I_B – токи через индуктивность L_1 , индуктивность L_2 , коллектор К и базу Б 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 [12]. На основе разработанных генераторов микроволнового хаоса создавались сверхширокополосные приемопередатчики для беспроводной связи и беспроводных сенсорных систем [13].

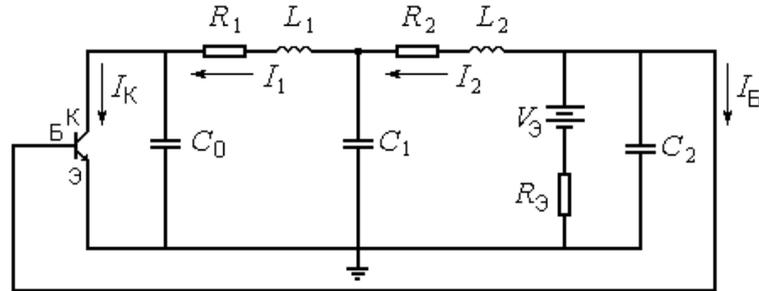


Рис. 2. Автоколебательная системы с 2.5 степенями свободы.

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 [14, 15]. При разработке микросхем за основу была взята автоколебательная система (1), в которую были введены дополнительные элементы (рис. 3). Типичная топология интегральной микросхемы источника хаоса с одним активным элементом показана на рис. 4. К настоящему времени, в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН совместно с ООО «Нанохаос» получены экспериментальные образцы микрогенераторов хаоса с интегральной мощностью излучения в полосе частот 3...7 ГГц около 300 мкВт (рис. 5). В приборах используется кремний-германиевая технология 0,25 мкм. Площадь кристалла – 1,6 мм².

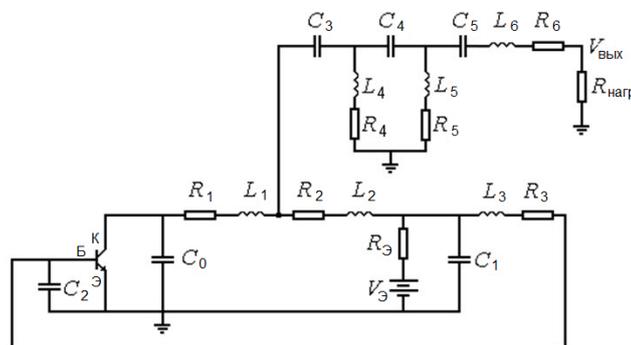


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема интегрального генератора хаоса.

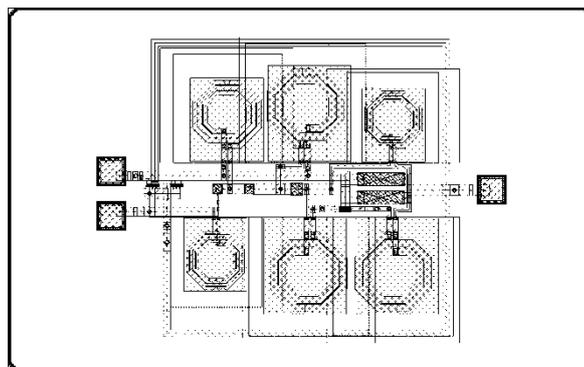
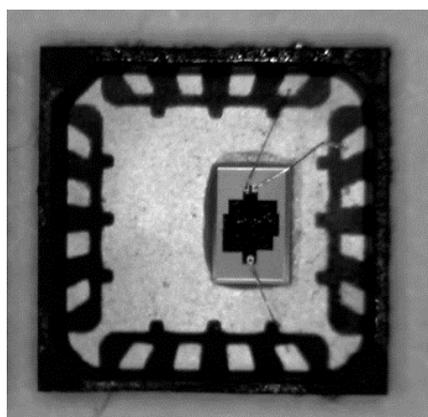
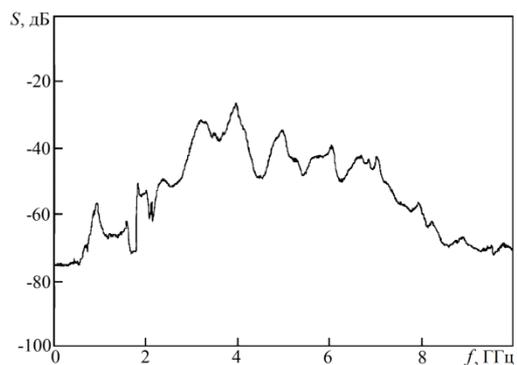


Рис. 4. Топология микросхемы.



а)



б)

Рис. 5. Микрогенератор сверхширокополосных хаотических колебаний: а – кремний-германиевый кристалл в корпусе; б – спектр мощности генерируемого сигнала.

Источники с такой выходной мощностью достаточно эффективно могут быть использованы в радио осветительных приборах.

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

Ближайшими аналогами источников микроволнового некогерентного сверхширокополосного излучения в видимом глазом диапазоне частот являются светодиоды с белым свечением. Для получения белого свечения применяется синий светодиод, излучение которого направляется на люминофор из желтого фосфора (рис. 6а). Свет белого спектра получается путем смешения синего света от самого светодиода и более длинноволнового излучаемого от люминофора (рис. 6б). В результате светодиод излучает некогерентный шумовой сигнал в полосе длин волн $\Delta\lambda = 450 - 650$ нм. 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.

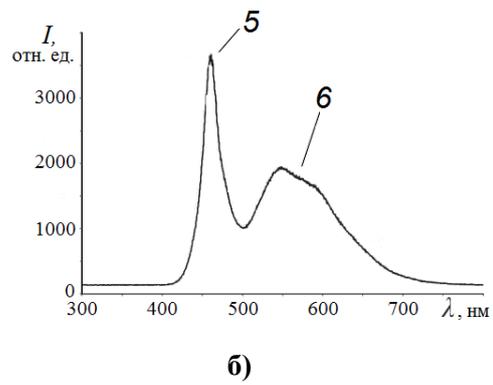
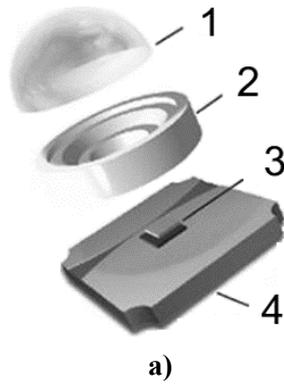


Рис. 6. Светодиод с белым свечением: а – структура, б – спектр излучения; 1 – линза, 2 – рефlector, 3 – светодиодная матрица и фосфор, 4 – основа; 5 – спектральная линия синего светодиода, 6 – линия переизлучения желтого фосфора.

Аналогия микрогенераторов хаоса, как источников радиосвета, со светодиодами белого свечения становится очевидной при сравнении спектра излучения светодиода (рис. 6б) и спектра мощности сигнала микрогенератора (рис. 5б – эксперимент и рис. 7а – моделирование). Такие характеристики как реализация процесса (рис. 7б), быстро спадающая автокорреляционная функция (рис. 7в) и близкое к гауссовскому статистическое распределение мгновенных значений сигнала (рис. 7г) также показывают, что хаотический сигнал обладает характеристиками, обеспечивающими создание некогерентного освещения в микроволновом диапазоне частот.

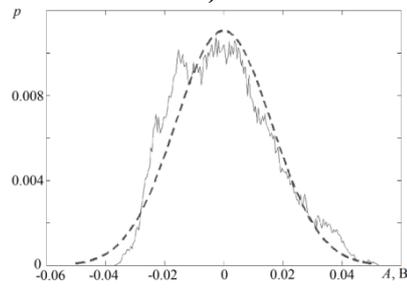
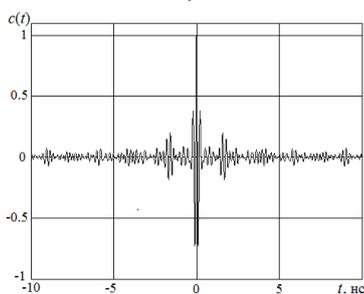
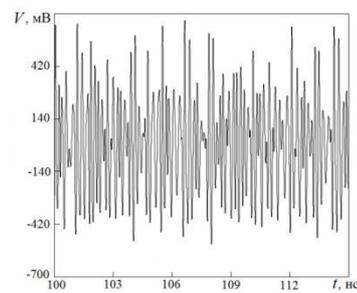
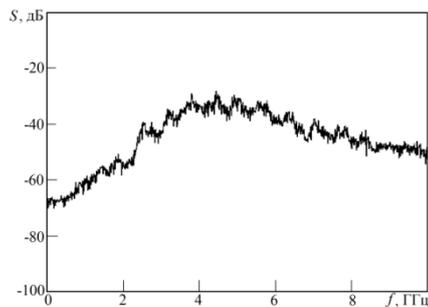


Рис. 7. Расчетные характеристики сигнала на выходе микрогенератора хаоса: а – фрагмент временной реализации; б – спектр мощности; в – автокорреляционная функция; г – распределение p мгновенных значений амплитуды A сигнала на выходе антенны (сплошная линия - моделирование, штриховая линия - гауссовское распределение).

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 важной общей чертой светодиодов и микросхем генераторов хаоса (chaos emitted chip – СЕС), является сходство в электрических характеристиках: оба устройства 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.

Из сказанного следует, что подобно тому, как светодиоды с белым свечением являются эффективными источниками широкополосного некогерентного излучения в видимом диапазоне частот, микрогенераторы динамического хаоса являются эффективными источниками широкополосного некогерентного излучения в микроволновом диапазоне частот.

3. Модели освещения в радиодиапазоне

Наличие локальных компактных источников радиоосвещения на основе сверхширокополосных генераторов динамического хаоса дает возможность целенаправленно рассмотреть вопрос о принципах использования этих источников. Ситуация здесь существенно отлична от освещения в видимом диапазоне частот, что связано как с физическими характеристиками излучения, так и с масштабными вопросами.

Рассмотрим типичные геометрические конфигурации расположения источников, объектов освещения или участка окружающей среды и наблюдательного (измерительного) прибора (системы). На рис. 8а показан пример «сцены» с расположенными на ней источниками радиосвета 1, 2, 3, объектом, рассеивающим и пропускающим радиоизлучение 4 и наблюдательным прибором 5. В этом примере в наблюдательный прибор поступает излучение непосредственно от источников 1 и 2, их же излучение, рассеянное на объекте 4 и излучение от источника 3, прошедшее через объект.

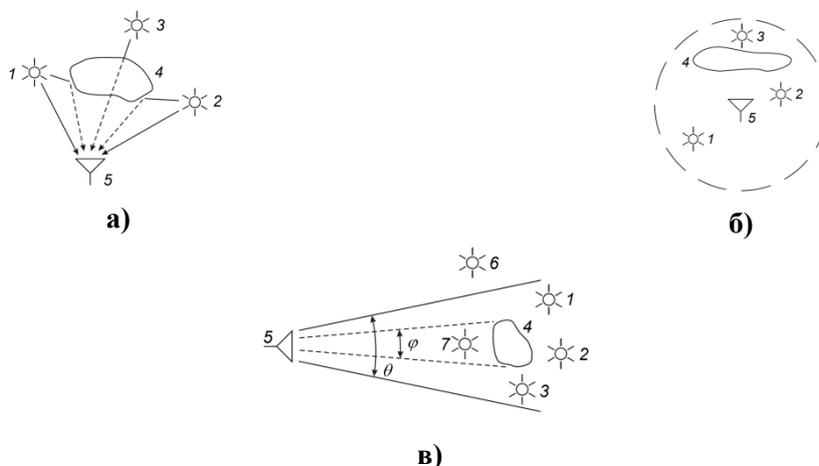


Рис. 8. Типичные геометрические конфигурации расположения источников, объектов освещения или участка окружающей среды и наблюдательного прибора: а – освещаемая сцена с расположенными на ней источниками радиосвета; б – вторая базовая модель освещения; в – третья базовая модель освещения; 1, 2, 3, 6, 7 – источники радиосвета, 4 – объект, рассеивающий и пропускающий излучение, 5 – наблюдательный прибор. θ – ширина диаграммы направленности антенны измерительного прибора; φ – угол, под которым видна радиоосвещаемая сцена из точки измерения.

В зависимости от взаимного расположения источников радиосвета, объекта, наблюдательного прибора, средней длины волны излучения λ и электрических размеров антенн источников радиосвета и наблюдательного прибора, можно выделить ряд типичных случаев «сцен».

Введем следующие предположения, не сказывающиеся на общности постановки задачи, но существенно сужающие круг рассматриваемых моделей. А именно, будем: 1) рассматривать только источники радиосвета с изотропным излучением в пространстве (одинаковым по всем направлениям) и 2) считать задачу скалярной, не принимая во внимание поляризацию излучения.

Весь интервал расстояний R от антенны наблюдательного прибора до сцены (фрагмента наблюдаемой среды) разделим на две зоны, мерами разделения которых являются средняя длина волны излучения λ и характерный линейный размер антенны L [16]:

1) ближняя зона и промежуточная зона (зона Френеля)

$$R \leq \frac{2L^2}{\lambda}; \quad (2)$$

2) дальняя или волновая зона (зона Фраунгофера)

$$R > \frac{2L^2}{\lambda}. \quad (3)$$

Заметим, что для изотропного излучателя связь между коэффициентом направленного действия – $D = 1$ и эффективной излучающей площадью S определяется соотношением

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} = 1 \Rightarrow S = \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (4)$$

В дальнейших оценках принимается, что раскрыв антенны наблюдательного прибора имеет круглую форму. В этом случае $S = \frac{\pi L^2}{4}$, и из (4) следует что $L = \frac{\lambda}{\pi}$.

Для наблюдательного прибора, обладающего антенной с изотропной диаграммой направленности практический интерес представляет только дальняя зона – зона Фраунгофера

$$R > \frac{2\lambda}{\pi^2} \approx \frac{\lambda}{5}. \quad (5)$$

При использовании ненаправленных антенны в измерительном приборе, мы всегда имеем дело с суммой прямого излучения от источников радиосвета, поля, прошедшего через объект и поля рассеянного объектами сцены (рис.8а). В типичных случаях все эти источники находятся в дальней зоне (5) антенны наблюдательного прибора, а их излучение, поступающее на антенну наблюдательного прибора, складывается в нем по мощности. Фактически здесь идет речь о передаче по схеме «точка – точка» при приеме излучения наблюдательным прибором от некоторого усредненного источника. При этом за оценку излучаемой мощности этого усредненного источника можно принять суммарную мощность источников (считая их точечными и находящимися примерно на одинаковом расстоянии от измерительного прибора). Если же расстояния до источников излучения существенно различаются, мощности поступающего в измерительный прибор излучения от разных источников должны быть взвешены с учетом расстояния. В любом из этих случаев существенно, что поступающее от всех источников излучение некогерентно и складывается по мощности.

За базовую модель освещения в рассмотренном случае (первую базовую модель) можно принять модель с одним источником радиосвета (без рассеивающего или

преломляющего объекта), излучение от которого непосредственно поступает на антенну измерительного прибора. Если мощность источника известна, то по ее доле, поступающей в наблюдательный прибор, можно оценивать расстояние до источника.

Пусть теперь антенна наблюдательного прибора имеет характерный размер L . Тогда ширина ее диаграммы направленности в дальней зоне $\theta \sim \lambda/L$, а размер разрешаемого элемента $\Delta \sim \frac{\lambda}{L}R$. Из условия (3) следует, что расстояние до объекта,

при котором реализуется условие дальней зоны быстро растет с увеличением размера антенны. Например, при $L = 5\lambda$, $R > 50\lambda$. Если $\lambda = 7,5$ см, то $R > 3,75$ м. Если же $L = 10\lambda$, то расстояние до дальней зоны увеличивается до 200λ или 15 метров. Линейный размер самой антенны 37,5 см в первом случае и 75 см во втором. Получается, что при таких разумных размерах антенн, может быть обеспечено наблюдение в зоне Френеля для небольших и средних размеров помещений: до 40 кв. метров в первом случае, и до 160 кв. метров во втором случае. Угловые разрешения антенны равны 12° и 6° в первом и втором случаях, что обеспечивает на границе с зоной Фраунгофера пространственное разрешение $\delta_1 = \theta_1 \cdot R = 75$ см и $\delta_2 = \theta_2 \cdot R = 37,5$ см, соответственно, для размеров антенн 5λ и 10λ . Внутри зоны Френеля разрешение будет улучшаться с уменьшением расстояния, вплоть до ближней зоны, достигая на расстоянии порядка размера антенны предельного значения $\sim \lambda$. Таким образом, при освещении пространств с площадями от десятков до сотен квадратных метров и рассмотренными характеристиками системы, площадь наблюдаемой сцены значительно превышает размер элемента разрешения, а это означает, что попадающая в элемент разрешения мощность не будет зависеть от расстояния (при одинаковой засветке).

Рассмотренная ситуация приводит ко второй базовой модели радиоосвещения, согласно которой освещенная «сцена» состоит с точки зрения измерительного источника из поверхностей (отражающих, пропускающих) размеры которых значительно превышают элемент разрешения антенны наблюдательного прибора. Кроме того, на «сцене» могут присутствовать сами источники радиосвета, излучение которых напрямую попадает на антенну наблюдательного прибора (рис. 8 б).

Третья модель освещения отвечает промежуточному случаю между 1-й и 2-й моделями. В этом случае вся освещенная сцена вместе с источниками радиоосвещения имеет угловые размеры относительно точки измерения, не превышающие ширину диаграммы направленности. Ситуацию иллюстрирует рис. 8 в, где θ – ширина диаграммы направленности антенны измерительного прибора; φ – угол, под которым видна радиоосвещаемая «сцена» из точки измерения. Заметим, что источники радиосвета в этой конфигурации могут находиться как в пределах сектора, соответствующего диаграмме направленности антенны наблюдательного прибора, так и вне его. Это важно, поскольку если излучение источников радиосвета попадает напрямую на антенну наблюдательного прибора, то его мощность превалирует.

4. Оценка дальности обнаружения источников радиосвета

Точечный источник радиосвета характеризуется излучаемой мощностью P и спектральной плотностью мощности $S(f)$ в полосе излучения Δf .

Мощность излучения, рассеиваемую освещенными объектами, будем оценивать с помощью уравнения радиолокации в варианте разнесенных передатчика и приемника. При этом в качестве передатчика будет выступать источник радиосвета с изотропной диаграммой направленности, в качестве приемника – наблюдательный прибор. За эффективную поверхность рассеяния будем принимать площадь проекции объекта на плоскость, перпендикулярную оси диаграммы направленности наблюдательного

прибора. При наличии нескольких осветительных устройств, падающая от них на объект мощность суммируется (излучение некогерентно).

Если источник радиосвета мощностью $P_{\text{ист}}$ освещает объект с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) – $S_{\text{об}}$, удаленную от него на расстояние R_1 , то при отсутствии потерь в среде распространения, $P_{\text{об}}$ – мощность радиоволны, отраженная объектом, определяется соотношением

$$P_{\text{об}} = \frac{P_{\text{ист}} S_{\text{об}}}{4\pi R_1^2}. \quad (6)$$

Поскольку $S_{\text{об}}$ характеризует изотропно рассеивающий объект, мощность излучения, поступающая на вход приемника (наблюдательного прибора) $P_{\text{нп}}$ удаленного от рассеивающего объекта на расстояние R_2 , будет равна

$$P_{\text{нп}} = \frac{P_{\text{об}}}{4\pi R_2^2} S_{\text{нп}} = \frac{P_{\text{ист}} G_{\text{нп}} S_{\text{об}} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2}, \quad (7)$$

где $G_{\text{нп}}$ – коэффициент усиления антенны наблюдательного прибора.

Максимальная дальность, на которой можно наблюдать радиоосвещенный объект (при фиксированном расстоянии источника света от объекта), определяется уравнением:

$$R_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ист}} G_{\text{нп}} S_{\text{об}} \lambda^2}{(4\pi)^3 (P_{\text{нп}})_{\text{мин}} R_1^2}}, \quad (8)$$

где $(P_{\text{нп}})_{\text{мин}}$ – мощность, характеризующая порог чувствительности наблюдательного прибора.

Интересно сравнить мощность, принимаемую наблюдательным прибором непосредственно от источника радиосвета и отраженную от объекта. Мощность, рассеиваемая объектом, связана с мощностью источника радиосвета в соответствии с формулой (6), т. е. эти мощности отличаются в $\frac{S_{\text{об}}}{4\pi R_1^2}$ раз. Например, если расстояние

между источником радиосвета и объектом 5 м, а эффективная площадь рассеяния равна 1 м^2 , то отраженная мощность более чем в 300 раз меньше мощности источника. Если же источник равномерно освещает поверхность площадью 100 м^2 , с того же расстояния, то мощность переотражаемого сигнала составляет уже $\sim 0,3$ от $P_{\text{ист}}$. Таким образом, суммарная переотражаемая мощность может меняться в широких пределах.

В связи с этим для оценки максимальной возможной дальности наблюдения сцены, освещенной радиосветом, целесообразно использовать максимальную дальность видения самого источника радиосвета, которую можно будет рассматривать как верхнюю границу возможной дальности наблюдения и для других моделей освещения.

5. Чувствительность наблюдательного прибора

Под порогом чувствительности приборов для измерения интенсивности флуктуационного электромагнитного излучения понимается шумовой сигнал на входе приемной системы, равный по своей амплитуде на выходе среднеквадратичному отклонению флуктуационного сигнала, обусловленного собственными шумами усилительного тракта.

Оптимальным устройством для приема шумоподобных сигналов различной физической природы, в том числе и электромагнитных излучений, является устройство, состоящее из идеального (не шумящего) усилителя, квадратичного детектора и интегратора (фильтра нижних частот), осуществляющего накопление сигнала [4].

Чувствительность такого радиометрического приемника равна

$$\Delta T = \sqrt{2}T_{\text{пр}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \quad (9)$$

Оценим дальность, на которой может наблюдаться источник радиосвета с помощью рассматриваемого приемника. Для этого воспользуемся стандартной процедурой расчета бюджета радиоканала M [17]:

$$M = P_{\text{ист}} + G_{\text{ист}} + G_{\text{пр}} - \left(\frac{E_6}{N_0} \right)_{\text{треб}} - S - (kT) - L_R - L_0, \quad (10)$$

где $G_{\text{ист}}$ – коэффициент усиления антенны источника в дБ;

$(E_6/N_0)_{\text{треб}}$ – требуемое отношение энергии бита на спектральную плотность в дБ;

S – скорость передачи данных в дБ/с;

kT – спектральная мощность теплового шума при температуре T в дБм,

k – постоянная Больцмана;

L_0 – потери мощности сигнала при расстоянии между источником радиосвета и наблюдательным прибором при расстоянии между ними 1 м;

L_R – дополнительное затухание принимаемого сигнала при увеличении расстояния между источником и приемником радиосвета с 1 м до R метров.

В рассматриваемом случае отношение $(E_6/N_0)_{\text{треб}}$ можно получить исходя из соотношения принимаемой мощности сигнала к мощности шума

$$\frac{P_{\text{пр}}}{N} = \frac{E_6 R}{N_0 W}, \quad (11)$$

где $P_{\text{пр}}$ – принимаемая мощность сигнала, N – мощность шума.

Пороговая принимаемая мощность сигнала равна

$$P_{\text{пр}} = k\Delta T\Delta f = k\sqrt{2}T_{\text{пр}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \Delta f \quad (12)$$

Отсюда можно получить отношение энергии бита к спектральной плотности шума

$$\frac{E_6}{N_0} = \frac{P_{\text{пр}} W}{NR} = \frac{P_{\text{пр}}}{N_0 R} \quad (13)$$

откуда

$$\frac{E_6}{N_0} = \frac{k\sqrt{2}T_{\text{пр}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \Delta f}{N_0 R} = \frac{\sqrt{2} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \Delta f}{R} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F}} \quad (14)$$

При полосе входного усилителя приемного устройства $\Delta f = 1$ ГГц и полосе фильтра низких частот $\Delta F = 10$ Гц отношение энергии бита на спектральную плотность равно 41,5 дБ.

Полагая $G_{\text{ист}} = G_{\text{пр}} = 0$ дБ, требуемое отношение энергии бита на спектральную плотность 41,5 дБ, скорость передачи, как величину обратную времени накопления 10 бит/с, $kT = -174$ дБм, желательный запас «прочности» по бюджету канала $M = 10$ дБ и $L_0 = 44$ дБ (при средней длине волны 7,5 см), получаем из уравнения (10), что $L_R = 90$ дБ. Это означает, что потенциально источник радиосвета с мощностью излучения 1 мВт можно увидеть с помощью наблюдательного прибора, имеющего ненаправленную антенну с расстояния больше чем 200 м.

6. Радио «осветительная» лампа

По аналогии со светодиодной лампой, может быть создана лампа для радиоосвещения с активным элементом в виде микросхемы. Идея такой лампы заключается в следующем.

Микрогенератор динамического хаоса вместе с антенной образуют источник шумоподобного сверхширокополосного излучения микроволнового излучения (рис. 9 а). Такой источник можно рассматривать как прототип лампы радиоосвещения. Далее этот прототип конструктивно трансформируется как по форме, так и по режиму эксплуатации в «лампочку» обычного формата, рассчитываемую на напряжение питания 220 В.

Экспериментальный образец лампы радиосвета ЛРС-2 был разработан на основе микросхемы генератора динамического хаоса, формирующей сигнал в диапазоне частот 3...7 ГГц (разд. 3). Излучаемая мощность лампы примерно 300 мкВт. Конструктивно лампа включает в себя плату с электронными компонентами и антенной (рис. 9 б) и источник вторичного питания, обеспечивающий преобразование сетевого переменного напряжения 220 В в напряжение постоянного тока 5 В. Верхняя металлизированная сторона платы вместе с конусным элементом образует диско-конусную излучающую антенну. Кроме того, на верхней стороне платы расположен индикаторный светодиод, отображающий состояние устройства (включено или выключено). Электронная часть лампы размещена в стандартном покупном корпусе с цоколем типа E27 для светодиодных ламп (рис. 9 в). Вторичный источник питания размещен в цоколе лампы.

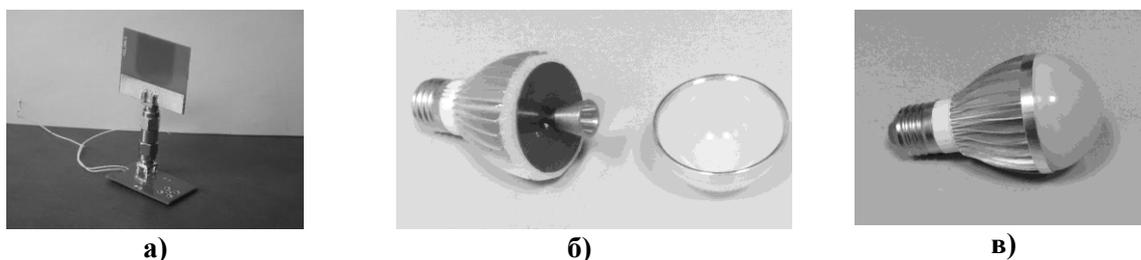


Рис. 9. Лампочка радио «освещения»: а – прототип лампочки в виде генератора хаоса с подключенной антенной; б – конструкция излучающего устройства с антенной* (слева), колба (справа); в – устройство в сборе в виде стандартной осветительной лампочки.

Создание радиоосвещения в помещении или на открытой площадке сводится к ввинчиванию лампы радиоосвещения в патрон стандартного светильника, подключенного к обычной электросети, и нажатии кнопки выключателя.

Другими вариантами источников радиосвета могут быть приборы, использующие в качестве источников питания различные низковольтные источники постоянного тока, например, например, от 12 вольтовой автомобильной сети, от 5 вольтовых USB разъемов ноутбуков и планшетов и т.д.

7. Экспериментальная ячейка приемника радиосвета

Выше предложены малогабаритные источники радиоосвещения в микроволновом диапазоне частот, использующие для создания шумоподобного сверхширокополосного (СШП) излучения – аналога света в видимом диапазоне – генераторы хаотических колебаний. Наличие одного или нескольких источников, конструктивно выполненных в виде, сходном с обычными световыми приборам (лампа накаливания, светодиодная лампа), позволяет «освещать» в микроволновом диапазоне частот отдельные помещения, комплекс помещений, или часть открытого пространства.

При этом возникает вопрос: как применить это излучение для наблюдения за окружающим миром?

Очевидно, что мы не можем создавать приемные устройства для радиосвета, сопоставимые по числу чувствительных элементов и компактности с глазом человека или высших животных, поскольку размеры чувствительных устройств определяются длиной волны используемого электромагнитного излучения, а она у видимого света и радиосвета различается примерно на пять порядков.

А какие возможности все-таки имеются?

В природе «глаза» у живых существ на самом деле бывают очень разные по структуре и по сложности, причем простейшие из них содержат буквально единицы чувствительных элементов [18]. Элементарный глаз – светочувствительное пятно или «глазок» – встречается у простейших беспозвоночных животных, например, у эвглены, и способен воспринимать наличие света и его интенсивность, но не формировать изображение. Добавление к чувствительному элементу сканирующей линзы уже позволяет маленькому веслоногому рачку *Cornelia* уже формировать и изображение. Наличие линеек чувствительных элементов, включающих небольшое число элементов в сочетании со сканирующими линзами обеспечивает дальнейшее расширение возможностей светочувствительных систем беспозвоночных животных. Еще одним примером использования природой систем «зрения» с относительно небольшим числом элементов являются инфракрасные детекторы некоторых видов змей – лицевые и губные ямки. Активация рецепторов ямок требует изменения потока инфракрасного излучения. Это может достигаться либо в результате движения излучающего тепло объекта в "поле зрения" относительно более холодного окружения, либо при сканирующем движении головы змеи. В [19] показано, что при наличии поля сенсорных клеток примерно 40×40 элементов на ямке змее удается восстанавливать входной сигнал с угловым разрешением 2.5° .

По аналогии с рассмотренными примерами использования малоэлементных светочувствительных систем в живой природе можно ожидать, что создание даже простейших приемников радиосвета, состоящих из нескольких, или даже одного элемента (аналогов палочек, колбочек), позволит конструктивно использовать радиоосвещение для наблюдения за окружающим миром.

Ниже рассматривается задача создания простого приемника ячейки радиосвета, формулируются требования к нему, предлагается структура и схемотехническое решение, реализуется и исследуется экспериментальный макет устройства.

Приемник радиосвета должен «уметь» измерять полную мощность приходящего СШП шумоподобного излучения. При этом от него требуется достаточно высокая чувствительность и большой динамический диапазон измеряемой интенсивности сигнала. Существенным параметром является также степень инерционности приемника или время накопления сигнала. Этот параметр тесно связан с чувствительностью приемника: чем больше накопление, тем меньший по мощности приходящий сигнал может быть зафиксирован. С другой стороны, степень инерционности приемника напрямую связана с возможностью его применения в мобильных условиях и лимитирует максимальную возможную скорость передвижения наблюдаемого объекта.

Исходя из этого сформулируем требования к приемнику радиосвета:

- полоса частот принимаемого сигнала должна соответствовать полосе частот излучаемого сигнала;
- время накопления сигнала $0.001 - 0.1$ с, что позволит использовать приемник в ситуациях с относительными скоростями движения объектов от 1000 до 10 м/с;
- динамический диапазон по мощности принимаемого сигнала – не менее 40 дБ, что позволит обеспечить работоспособность при изменении диапазона расстояний в

свободном пространстве между приемником и источником сигнала не менее, чем в 100 раз.

Ближайшими по своим свойствам устройствами, которые можно использовать в качестве прототипов приемников радиосвета, являются радиометрические приемники [2-5] и энергетические приемники, используемые в прямохаотических системах связи [20].

Радиометрические приемники, как правило, имеют очень хорошие (с точки зрения требований к приемникам радиосвета) характеристики по чувствительности, но им свойственны узкий динамический диапазон и значительная инерционность.

Энергетические приемники применяются для цифровой передачи данных. Они регистрируют быстро изменяющиеся поступающие сигналы (т.е. малоинерционные) и имеют большой динамический диапазон, но значительно уступают радиометрам по чувствительности.

Предлагаемая ячейка приемника радиосвета сочетает в себе полезные свойства радиометрических и энергетических приемников. Структура ячейки приемника представлена на рис. 10, а её внешний вид на рис. 11а. Печатная антенна (A) имплементирована в плату устройства, ее размеры и форма согласованы с полосой излучаемого источником радиосвета сигнала. По существу, антенна представляет собой несимметричный сверхширокополосный диполь, одной частью которого является лепесток в форме части (сегмента) круга, а второй - остальная часть металлизированной платы. Лепесток через микрополоску соединен с переключателем (S), который в свою очередь через фильтр (F) соединен со входом малошумящего усилителя (LNA). Диаграмма направленности антенны имеет вид тора с провалом вдоль продольной оси антенны (рис. 11 б). В плоскости перпендикулярной плоскости приемника диаграмма всенаправленна с неравномерностью < 2 dB.

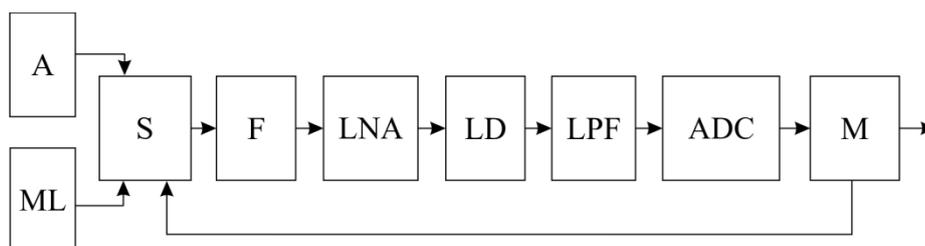


Рис. 10. Структура ячейки приёмника радиосвета: A – антенна, ML – согласованная нагрузка, S – переключатель, F – фильтр, LNA – малошумящий усилитель, LD – логарифмический детектор, LNF – фильтр нижних частот, ADC – аналогово-цифровой преобразователь, MC – микроконтроллер.

Для увеличения динамического диапазона в ячейке вместо типичного для радиометрических приемников квадратичного детектора используется логарифмический детектор с малошумящим полосовым усилителем на входе. Сигнал с выхода фильтра нижних частот детектора подается на вход аналого-цифрового преобразователя (ADC) и обрабатывается микроконтроллером. Использование ADC вместо порогового устройства - основное аппаратное отличие рассматриваемой приемной ячейки от приемников сверхширокополосных радиоимпульсов в средствах прямохаотической связи [20].

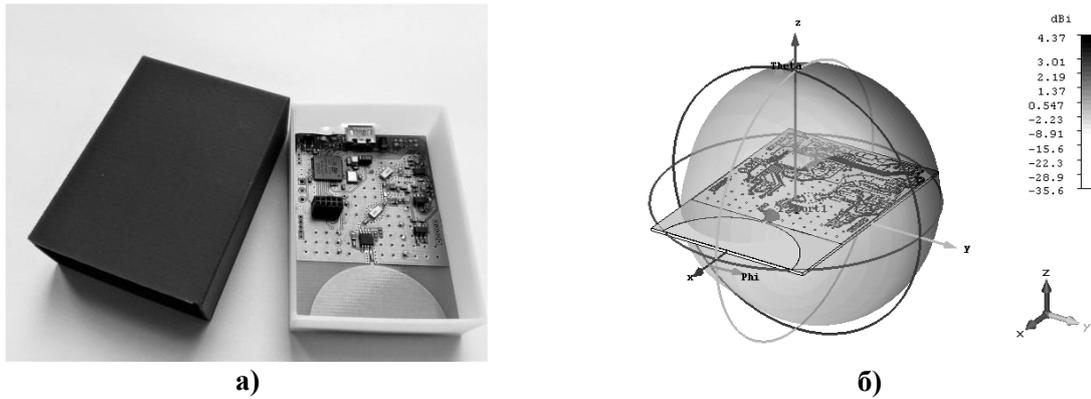


Рис. 11. Ячейка приёмника радиосвета: (а) внешний вид устройства, размер печатной платы 50x35 мм, масса < 10 г; (б) диаграмма направленности антенны устройства.

Микроконтроллер осуществляет накопление сигнала для увеличения отношения сигнал/шум (SNR). С этой целью сигнал с выхода фильтра нижних частот (LPF) оцифровывается через интервалы времени $\Delta\tau$, превышающее время корреляции T_{cor} шумов на входе фильтра ($T_{cor} \sim 1/\Delta f$), и полученные отсчеты суммируются в цикле от 1 до N . После этого цикл накопления завершается, выводится результат, обрабатывается полученное значения суммарного сигнала и цикл повторяется. Таким образом, выдача значения сигнала на отображающее устройство производится через каждые $N\Delta\tau$ сек. При этом уровень сигнала на выходе ячейки повышается по отношению к уровню сигнала на выходе LPF фильтра (что соответствует однократному измерению – отсчету) в N раз, теоретически чувствительность приемника увеличивается в \sqrt{N} раз, а дальность приема в свободном пространстве увеличивается в $\sqrt[4]{N}$ раз. Однако растет и время наблюдения (в N раз). Отсюда при выборе параметров функционирования устройства необходимо выбирать между повышением чувствительности приемной ячейки за счет накопления и возрастанием при этом ее инерционности. Использование микроконтроллера позволяет выбрать разумный компромисс при решении каждой конкретной задачи. Так, например, при визуальном наблюдении за силой сигнала время накопления может быть того же порядка, что и при смене последовательных кадров в телевизионном изображении (25 – 100 кадров в секунду), а для фиксации достаточно медленных изменений принимаемого излучения оно может достигать одной или нескольких секунд.

В экспериментальной ячейке используется LNA с усилением ~ 20 дБ в полосе частот 8 GHz (от 3 до 11 ГГц), что при совместном использовании с логарифмическим детектором AD8317 (чувствительность ~ -60 dB в полосе частот 0.1 – 10 ГГц, динамический диапазон 55 dB, полоса частот на выходе LPF детектора 10 МГц) позволяет на выходе LPF получить чувствительность -70 дБм при динамическом диапазоне приема 45 дБ. Максимальная частота дискретизации отсчетов по времени с дальнейшим использованием для обработки в микроконтроллере определяется возможностями ADC. В приемнике используется собственный 12 разрядный ADC микроконтроллера STM32L, производящего обработку сигнала. Максимальная частота дискретизации отсчетов у него составляет 10^6 отсчетов в секунду. Таким образом, минимально возможное время между отсчетами 1 μ s, что в 10 раз больше, чем характерное время автокорреляции шумовой компоненты на выходе фильтра детектора. В устройстве используется однократная компенсация мощности собственных шумов и фонового излучения. С этой целью перед началом измерений сигнала производится оценка значения напряжения на выходе детектора при

выключенном источнике, которая вычитается в микроконтроллере из значения сигнала, получаемого в процессе измерений. Для этого ко входу переключателя вместо антенны подключается согласованная нагрузка

В проведенных с ячейкой экспериментах по оценке влияния накопления на реальную чувствительность приемника использовалась частота дискретизации 100 тыс. отсчетов в секунду. В качестве источника использовалась лампа радиосвета с полосой частот 3-5 GHz и излучаемой мощностью 2 мВт [21].

В безэховой камере сначала измерялось фоновое значение сигнала (уровень собственных шумов) при заданном накоплении N . Затем при этом же накоплении измерялся суммарный уровень измеренного сигнала от источника радиосвета и фона. Путем измерения чувствительности приемника при изменении N , были получены данные по реальному выигрышу по чувствительности при накоплении. На рис. 12 а представлены результаты сравнения уровня сигнала в относительных единицах и логарифмическом масштабе для случая без накопления (пунктирная кривая) и с накоплением $N = 10^4$ (сплошная кривая) время накопления 0.1 с. В левой части графиков показан уровень сигналов на выходе ячейки, соответствующий фону. В правых частях графиков показан уровень сигналов после включения источника радиосвета. Превышение уровня накопленного сигнала над уровнем сигнала без накопления составляет 40 дБ, что точно соответствует $10 \lg N$ при $N = 10^4$. Превышение сигнала над шумом (SNR) составляет 18 дБ без накопления сигнала и 32 дБ в случае с накоплением. Разница в выигрыше по SNR за счет накопления 14 дБ, что на 6 дБ меньше, чем теоретическая при таком накоплении. Недобор по чувствительности связан с неполной компенсацией фонового шума и наблюдается также при других уровнях накопления (рис. 12 б). Тем не менее, даже такое «неидеальное» накопление позволяет значительно увеличить дальность работы приемника. Это было подтверждено в экспериментах по определению максимальной дальности, при которой виден источник. При отсутствии накопления эта дальность в условиях измерений составляла около 25 метров. Применение накопления с $N = 10^4$ позволило увеличить ее до более чем 120 метров.

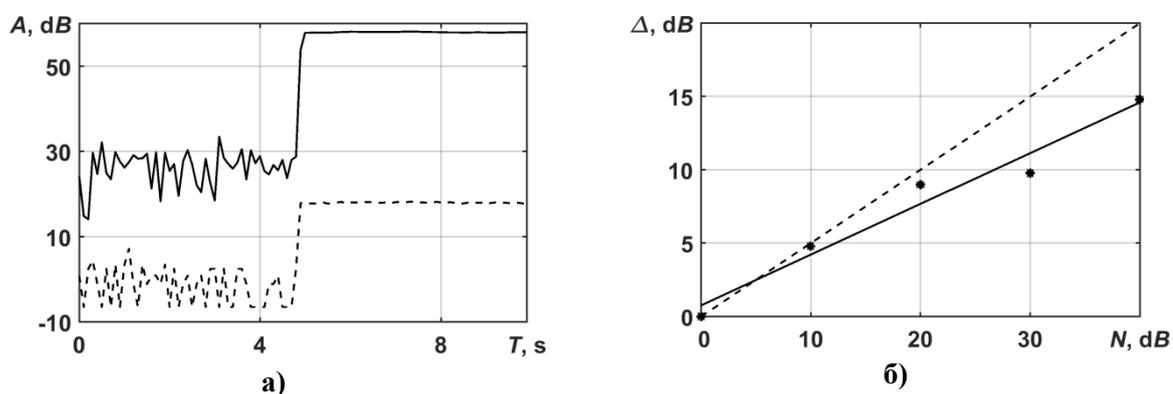


Рис. 12. Влияние накопления на характер работы приёмника: (а) сигнал на выходе без использования накопления (пунктирная кривая) и с накоплением $N = 10^4$ (сплошная кривая); (б) зависимость выигрыша для отношения сигнал/шум (SNR) от накопления N .

Таким образом, предложенная ячейка обладает значительно большей чувствительностью, чем высокоскоростные энергетические приемники. При этом в пересчете на яркостную температуру чувствительность составляет $\sim 12^\circ$ К, что значительно ниже, чем чувствительность типичных микроволновых радиометров (0.1 – 1° К). Однако, как расчеты, так и эксперименты показывают, что при радиоосвещении

достаточно типичной является ситуация, при которой динамического диапазона и чувствительности предложенной ячейки вполне достаточно для наблюдения локально освещенных в микроволновом диапазоне объектов и части пространства при мощности источников излучения в единицы милливатт.

Выводы

Разработка высокоэффективных миниатюрных источников широкополосного некогерентного микроволнового излучения на основе динамического хаоса дает возможность создавать искусственное радиосвечение. Вместе с использованием современных методов приема сверхширокополосных сигналов это позволит создать новый класс аппаратуры для инфокоммуникационной инфраструктуры массового применения.

Такая аппаратура будет всепогодной и сможет применяться в условиях полярной ночи на Крайнем Севере, при швартовке судов в тумане, для ориентирования самолетов при посадке и т. д.

Анализ возможных вариантов построения аппаратуры для наблюдения радиоосвещенных объектов показал, что прототипами таких приборов являются традиционные радиометрические приемники [2-6] и датчики на основе логарифмических детекторов [13, 20]. Последние, даже при комнатной температуре, обладают достаточно высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном.

Рассмотрена задача создания приемника некогерентного микроволнового излучения от источников, реализованных на основе сверхширокополосных генераторов хаотических колебаний, и «освещаемых» этими источниками предметов и поверхностей. Предложена структура устройства, описан экспериментальный образец и показана его способность регистрировать источники некогерентного микроволнового излучения с интегральной выходной мощностью и ~ 2 мВт на расстоянии более 100 метров. Компактность и простота предложенного приемника радиосвета (масса устройства ~ 10 г) позволяют использовать его как самостоятельно, например, в датчиках движения в отсутствие прямой видимости, так и для создания многоэлементных устройств, обеспечивающих пространственное разрешения при наблюдении за окружающей средой.

Литература

1. Polivka J., Fiala P., Machac J. // Progress in Electromagnetics Research. 2011. V. 111. P. 311.
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. Boca Raton: CRC Press, 2005.
4. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т 1. М.: ИКИ РАН, 2014.
5. Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. // Вестн. АН СССР. 1983. №.8. С. 118.
6. Гуляев Ю.В. Физические поля и излучения человека. Новые неинвазивные методы медицинской диагностики. М.: РБОФ "Знание" им. С. И. Вавилова, 2009.
7. Серия шумовых диодов Noisecom. NC100/200/300/400 http://evitek.ru/catalog/noisecom/istochniki-shuma/shumovye-diody/seriya-shumovyh-diody-noisecom-_16294.html.
8. Безруков В.А. // Современная электроника. 2011. №.7. С. 28.
9. Кислов В. Я., Залогин Н. Н., Мясин Е. А. // РЭ. 1979. Т. 24. № 6. С. 1118.

10. Безручко Б. П., Кузнецов С. П., Трубецков Д. И. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. № 3. С. 180.
11. Анисимова Ю. В., Дмитриев А. С., Залогин Н. Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. № 8. С. 387.
12. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. Генерация хаоса. М.: Техносфера, 2012.
13. Дмитриев А. С., Клецов А. В., Лактюшкин А. М. и др. // РЭ. 2006. Т. 51. № 10. С. 1193.
14. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Никишов А. Ю. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 23. С. 40.
15. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Никишов А. Ю. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 9. С. 82.
16. Панченко Б.А. Антенны. М.: Горячая линия – Телеком. 2015. 122 с.
17. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практические применения. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
18. Смит К.Ю.М. Биология сенсорных систем. М.: БИНОМ. 2013. 583 с. (Smith C.U.M. Biology of Sensory Systems. Wiley. 2009. 554 p.)
19. Sichert A.V., Friedel P., Leo van Hemmen J. // PRL. 2006. V. 97. P. 068105.
20. Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Мохсени Т.И., Попов М.Г. // РЭ. 2016. Т. 61. № 8. С. 765-772.
21. <http://anamezon.ru/radiosviet>
22. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., М.Ю. Герасимов М.Ю., В.В. Ицков В.В. // РЭ. 2016. Т. 61. № 11. С. 1–11.
23. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 24. С. 49-57.