

11;15

Экспериментальная ячейка приемника радиосвета

© Ю.В. Гуляев¹, А.С. Дмитриев^{1,2}, В.В. Ицков^{1,2},
М.М. Петросян^{1,2}, А.И. Рыжов¹, А.В. Уваров²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

² Московский физико-технический институт
(Государственный университет), Долгопрудный, Россия
E-mail: chaos@cplire.ru

Поступило в Редакцию 9 ноября 2017 г.

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 м.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46859.17115

Естественное тепловое некогерентное микроволновое излучение интенсивно используется в космических исследованиях, при наблюдении Земли из космоса [1–3] и в медицинской диагностике [4]. По своей структуре тепловое микроволновое излучение сходно со светом в видимом глазом диапазоне электромагнитного спектра [5]. В обоих случаях речь идет о некогерентном шумовом 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. Для создания искусственного освещения в видимом диапазоне частот применяются различные осветительные приборы: лампы накаливания, люминесцентные лампы, светодиодные источники и др. Искусственно созданное шумовое (шумоподобное) поле широкополосного (сверхширокополосного) некогерентного в пространстве и во времени излучения

в радио- или микроволновом диапазоне длин волн по аналогии с освещением в видимом глазом диапазоне при помощи специальных приборов будем называть радиоосвещением [5–7].

В [6,7] предложены малогабаритные источники радиоосвещения в микроволновом диапазоне частот, использующие для создания сверхширокополосного шумоподобного 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.

Какие же возможности все-таки имеются?

В природе глаза у живых существ на самом деле бывают очень разные по структуре и сложности, причем простейшие из них содержат буквально единицы чувствительных элементов [8]. 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 позволяет маленькому веслоногому рачку *Copilia* 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 [9] 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.

В настоящей работе рассматривается задача создания простого приемника ячейки радиосвета, формулируются требования к нему, предлагается структура и схмотехническое решение, реализуется и исследуется экспериментальный макет устройства.

Приемник радиосвета должен „уметь“ измерять полную мощность приходящего сверхширокополосного 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

6* Письма в ЖТФ, 2018, том 44, вып. 21

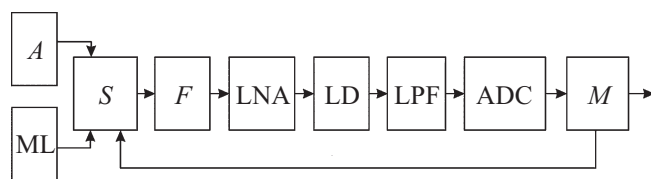


Рис. 1. Структура ячейки приемника радиосвета. A — антенна, ML — согласованная нагрузка, S — переключатель, F — фильтр, LNA — малошумящий усилитель, LD — логарифмический детектор, LPF — фильтр нижних частот, ADC — аналого-цифровой преобразователь, M — микроконтроллер.

радиометрические приемники [1–4] и энергетические приемники, используемые в прямохаотических системах связи [10].

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. 1, а ее внешний вид — на рис. 2, *a*. 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 другой — остальная часть металлизированной платы. Лепесток через микрополосок соединен с переключателем (S) и далее через фильтр (F) со входом малошумящего усилителя (LNA). Диаграмма направленности антенны имеет вид тора с провалом вдоль продольной оси антенны (рис. 2, *b*). В плоскости, перпендикулярной плоскости приемника, диаграмма всенаправленна с неравномерностью < 2 dB.

Для расширения динамического диапазона в ячейке вместо типичного для радиометрических приемников квадратичного детектора

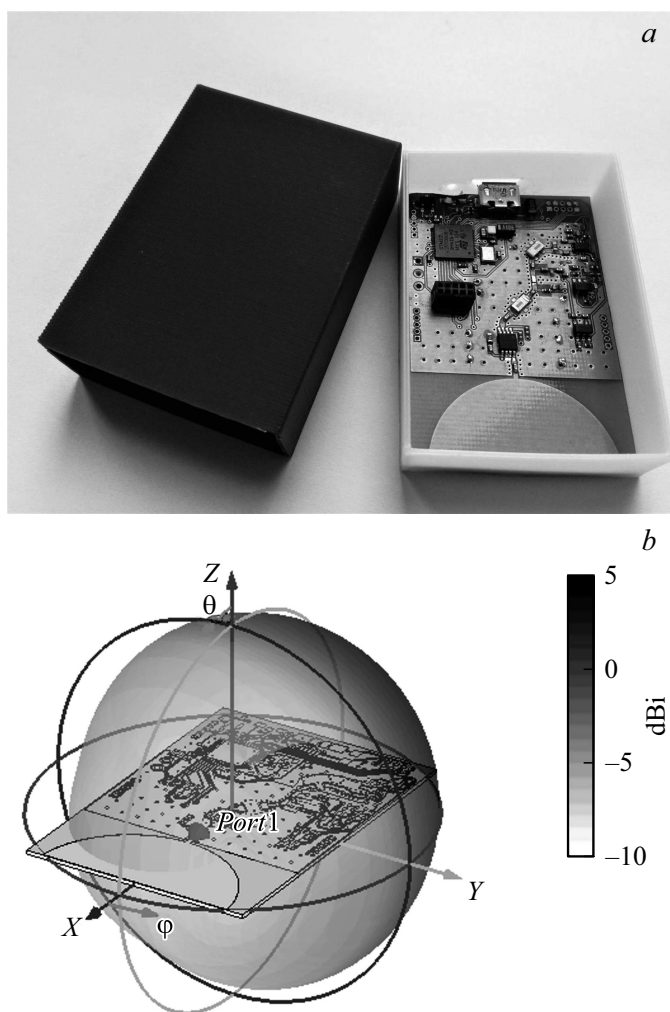


Рис. 2. Ячейка приемника радиосвета. *a* — внешний вид устройства (размер печатной платы 50×35 mm, масса < 10 g), *b* — диаграмма направленности антенны устройства.

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 [10].

Микроконтроллер осуществляет накопление сигнала для увеличения отношения сигнал/шум (SNR). С этой целью сигнал с выхода фильтра нижних частот (LPF) оцифровывается через интервалы времени Δt , превышающего 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 значение суммарного сигнала и цикл повторяется. Таким образом, выдача значения сигнала на отображающее устройство производится через каждые $N\Delta t$ секунд. При этом уровень сигнала на выходе ячейки повышается по сравнению с уровнем сигнала на выходе фильтра LPF (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 следует, что 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 dB в полосе частот 8 GHz (от 3 до 11 GHz), что при совместном использовании с логарифмическим детектором AD8317 (чувствительность ~ -60 dB в полосе частот 0.1 – 10 GHz, динамический диапазон 55 dB, полоса частот на выходе LPF детектора 10 MHz) позволяет на выходе LPF получить чувствительность -70 dBm 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 у него составляет 10^6 отсчетов в секунду. Таким образом, минимально возможное время между отсчетами $1 \mu\text{s}$, 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 производится оценка значения напряжения на выходе детектора, для чего к переключателю вместо антенны подключается согласованная нагрузка. При последующих измерениях с подключенной антенной эта оценка вычитается из значения сигнала на выходе детектора. В проведенных с ячейкой экспериментах по оценке влияния накопления на реальную чувствительность приемника использовалась частота дискретизации 10^5 отсчетов в секунду. В качестве источника использовалась лампа радиосвета с полосой частот 3–5 GHz и излучаемой мощностью 2 mW [11].

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 в чувствительности при накоплении. На рис. 3, *a* представлены результаты сравнения уровня сигнала в относительных единицах и логарифмическом масштабе для случая без накопления (штриховая кривая) и с накоплением $N = 10^4$ (сплошная кривая), время накопления 0.1 s. Слева показан уровень сигналов на выходе ячейки, соответствующий фону, справа — 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 теоретической при таком накоплении. Недобор по чувствительности связан с неполной компенсацией фонового шума и наблюдается также при других уровнях накопления (рис. 3, *b*). Тем

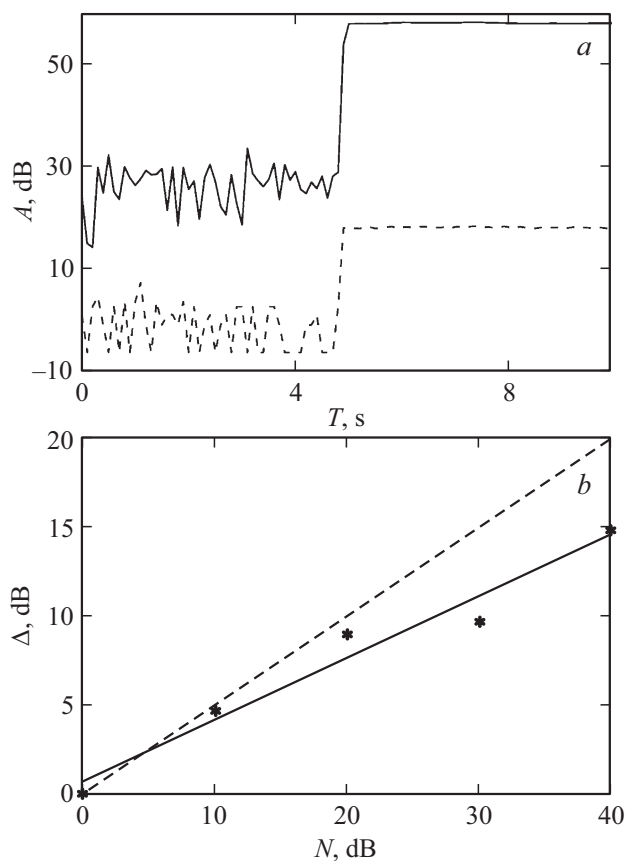


Рис. 3. Влияние накопления на характер работы приемника. a — сигнал на выходе приемника без использования накопления (штриховая кривая) и с накоплением $N = 10^4$ (сплошная кривая), b — теоретическая (штриховая линия) и экспериментальная (сплошная линия) зависимости выигрыша для отношения сигнал/шум (SNR) от накопления N .

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 м. Применение накопления с $N = 10^4$ позволило увеличить ее до 120 м.

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

В заключение отметим, что 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 разрешение при наблюдении за окружающей средой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 1619-00084).

Список литературы

- [1] Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
- [2] Armand N.A., Polyakov V.M. Radio propagation and remote sensing of the environment. N.Y.: CRC Press, 2005. 437 p.
- [3] Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016. 336 с.
- [4] Гуляев Ю.В. Физические поля и излучения человека. Новые неинвазивные методы медицинской диагностики. М.: Фонд „Знание“ им. С.И. Вавилова, 2009. 28 с.
- [5] Polivka J., Fiala P., Machac J. // Prog. Electromagn. Res. 2011. V. 111. P. 311–330.

- [6] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 24. С. 49–57.
- [7] *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю., Ицков В.В.* // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1–11.
- [8] *Smith C.U.M.* Biology of sensory systems. Wiley, 2009. 554 p. [*Смит К.Ю.М.* Биология сенсорных систем. М.: БИНОМ, 2013. 583 с.].
- [9] *Sichert A.V., Friedel P., Leo van Hemmen J.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 068105.
- [10] *Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Мохсени Т.И., Попов М.Г.* // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 8. С. 765–772.
- [11] <http://anamezon.ru/radiosviet>