

11;01.5

## Экспериментальная модель многолучевого устройства для наблюдения в радиосвете

© А.С. Дмитриев, М.М. Петросян, А.И. Рыжов

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

E-mail: chaos@cplire.ru

Поступило в Редакцию 10 марта 2021 г.

В окончательной редакции 10 марта 2021 г.

Принято к публикации 25 марта 2021 г.

Рассматривается возможность создания аналога биологического глаза в радиодиапазоне для наблюдения окружающего пространства в искусственном радиосвете. Как и в биологическом прототипе, в аналоге имеется система чувствительных элементов (сетчатка), фокусирующий элемент типа линзы и совокупность слабонаправленных антенн, на которые осуществляется первичный прием шумоподобного сверхширокополосного излучения. Предложено экспериментальное устройство рассматриваемого типа и показана работоспособность предлагаемого технического решения.

**Ключевые слова:** искусственное радиоосвещение, сверхширокополосные сигналы, динамический хаос, приемники радиосвета, многолучевые средства наблюдения.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.12.51066.18762

Системы наблюдения за окружающим пространством с применением микроволнового излучения в последнее время привлекают большое внимание в связи с задачами навигации в пространстве роботов различного назначения, мобильных беспилотных средств, контроля за передвижением объектов в ограниченном пространстве и т. д. Как правило, для этих целей используются активные системы, включающие в себя передатчик, подсвечивающий объект и приемник (или, как вариант, разнесенную систему приемников).

При этом активно используются элементы существующих узкополосных средств связи, например Wi-Fi [1,2], сверхширокополосные средства с импульсными сигналами [3], системы, использующие шумовые широкополосные сигналы [4].

Использование искусственного радиоосвещения [5,6] представляет собой альтернативную концепцию, в которой источники (лампы радиосвета) освещают сразу всю наблюдаемую зону, а системы наблюдения принципиально являются пассивными и производят наблюдение за окружающей обстановкой, не излучая сигналов. Это приводит к двум важным следствиям. Во-первых, такую систему нельзя обнаружить по собственному излучению, и тем самым стороннему наблюдателю сложно понять, ведется ли в этой зоне за какими-то объектами наблюдение. Во-вторых, наблюдение может одновременно вестись по многим направлениям без сканирования, т. е. с применением многолучевых систем, что увеличивает скорость обзора пространства пропорционально количеству используемых лучей.

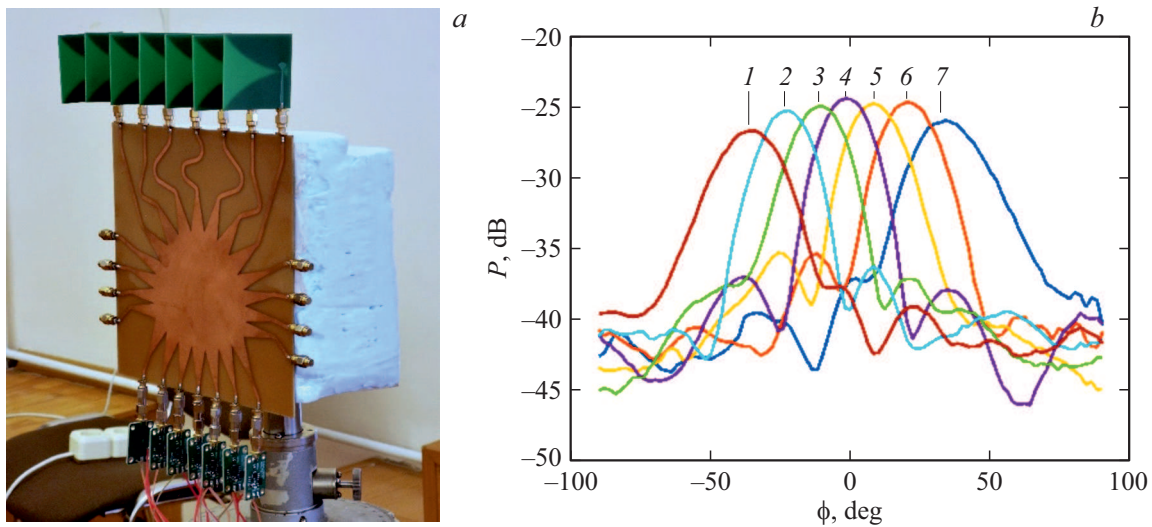
Одновременное наблюдение за значительной частью окружающего пространства широко используется в природе с помощью глаз животными в видимом диапазоне электромагнитного спектра (большинство живот-

ных) [7], инфракрасном диапазоне (змеи) [8] и ультрафиолетовом диапазоне (бабочки) [9].

В животном мире используются глаза разной структуры, но большинство типов глаз включает в себя линзовую систему и сетчатку, состоящую из множества чувствительных элементов: палочек и колбочек. Число этих чувствительных элементов колеблется от нескольких десятков у простейших животных до нескольких миллионов у высших животных.

Если следовать по пути имитации глаза для построения системы наблюдения, прежде всего следует создать чувствительный элемент — аналог колбочки. Такой элемент был разработан на основе логарифмического детектора [10]. Он обеспечивает прием и накопление энергии шумоподобного микроволнового излучения, подобно тому как это делается в радиометрах. При использовании этого элемента совместно с направленной приемной системой была показана возможность получения изображений в радиосвете. Это достигалось путем механического сканирования лучом высоконаправленной приемной системы в пространстве [11]. Предложенное решение позволило продемонстрировать принципиальную возможность наблюдения окружающей обстановки в радиосвете, но имело существенные ограничения для практических приложений, в частности связанные с низкой скоростью сканирования.

В настоящей работе описываются эксперименты с макетом устройства наблюдения за окружающим пространством, имитирующего глаз с хрусталиком и сетчаткой, в котором не используется механическое сканирование для получения пространственного разрешения. Макет устройства включает в себя аналог сетчатки, состоящий из  $N$  чувствительных элементов, линзовый элемент — аналог хрусталика, обеспечивающий фокусировку сигнала



**Рис. 1.** Экспериментальный макет устройства наблюдения в микроволновом диапазоне. *a* — общий вид; *b* — диаграммы направленности лучей 1–7 устройства.

лов, поступающих с определенного направления, и собственно приемные элементы в виде слабонаправленных антенн на входе линзы.

Разработанный макет предназначен для частотного диапазона 3–5 GHz. В качестве источников излучения использовались лампы радиосвета, в которых сверхширокополосный шумоподобный сигнал представляет собой динамический хаос микроволнового диапазона [5,6].

Аналог хрусталика глаза был реализован в виде радиолинзы. В радиодиапазоне известно несколько типов линз [12], которые могут быть использованы для концентрации приходящего излучения, в частности линза Люнеберга, идея которой очень напоминает функцию хрусталика. С ее помощью можно образовать устройство, похожее по принципу действия на глаз того типа, который характерен для млекопитающих.

Однако в сантиметровом диапазоне это довольно габаритное устройство. Поэтому для исследований в работе был выбран вариант построения приемной системы на основе линзы Ротмана [12,13].

На входах линзы размещались приемные элементы на основе антенн Вивальди (рис. 1, *a*). Число приемных элементов и формируемых лучей равно семи (рис. 1, *b*), сектор обзора  $60^\circ$ , частотный диапазон 3–5 GHz (соответствует диапазону источников радиосвета).

Топология линзы для заданных параметров была рассчитана в программном комплексе [14].

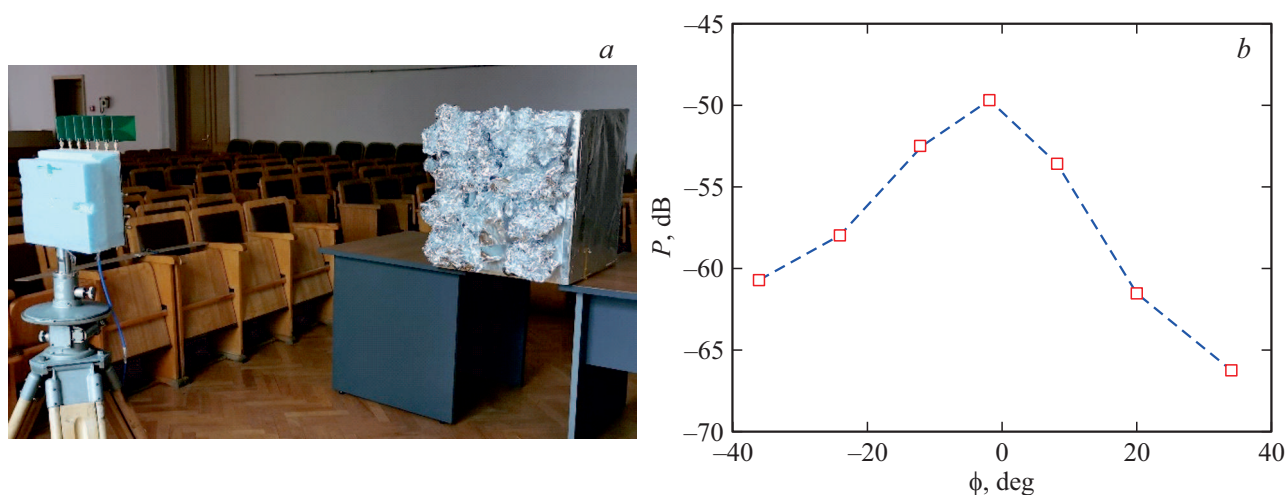
Наблюдение за предметами в окружающем пространстве при освещении радиосветом производилось следующим образом. На одной из стен помещения размещались две лампы радиосвета мощностью 2 mW каждая [5,6] таким образом, чтобы осуществлялось равномерное освещение помещения и прямые лучи от ламп не попадали в приемные элементы устройства. Наблюдаемый предмет располагался перед устройством на расстоянии от 1

до 3 m от него. Превышение плотности мощности искусственного радиосвещения над фоновым значением составляло 20–30 dB. Предполагалось, что отраженные от предмета лучи лампы радиосвета будут попадать в апертуру „глаза“ и давать отклик на одном или нескольких выходах системы. Наличие этих сигналов, сильно отличающихся по уровню от сигналов, принятых с направлений, где отражение от предмета отсутствует, будет свидетельствовать о том, в что в этом направлении находится отражающий предмет.

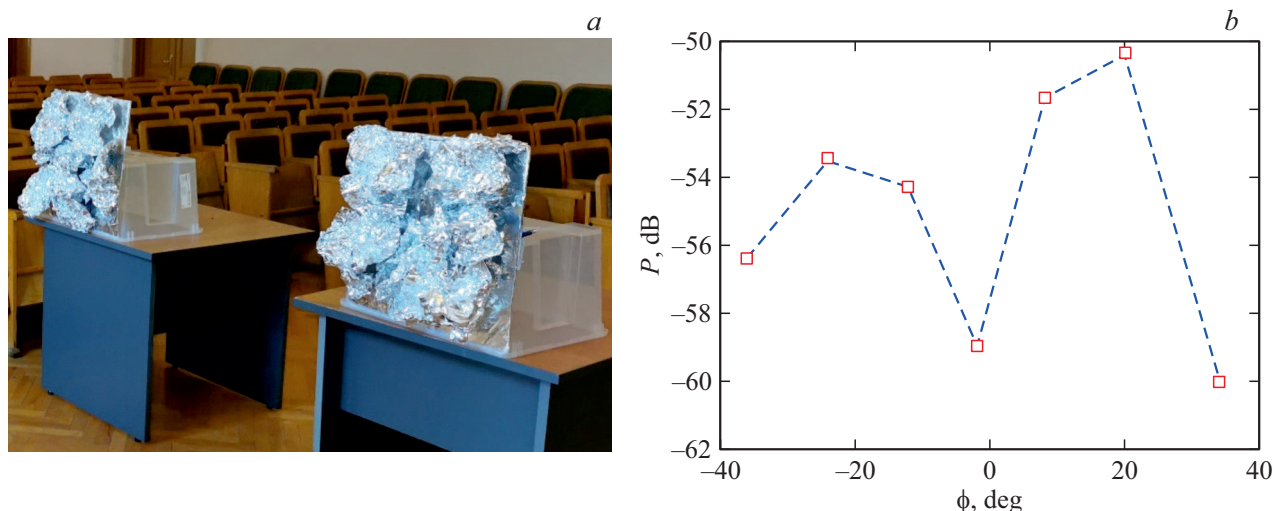
Были проведены две группы экспериментов, в которых в качестве отражающих предметов использовались рассеивающие металлические поверхности. В первом случае это был квадрат размером примерно  $0.7 \times 0.7$  m, расположенный на расстоянии 2 m от наблюдательного устройства и покрытый негладкой фольгой с характерными размерами неоднородности 3–4 cm, обеспечивающей диффузное отражение (рис. 2, *a*). Во втором случае в качестве наблюдаемых предметов использовались два разнесенных примерно на 1.5 m квадрата с негладкой фольгой размером  $0.5 \times 0.5$  m (рис. 3, *a*).

Результаты экспериментов представлены на рис. 2, *b* и 3, *b*. По оси абсцисс отложены значения углов в горизонтальной плоскости. Квадратами обозначены направления максимумов диаграммы направленности каждого из семи лучей и уровни приходящей с этих направлений мощности.

На рис. 2, *b* отраженные от единственного объекта (рис. 2, *a*) лучи попадают в основные лепестки трех диаграмм направленности приемной системы (2, 3 и 4), в остальные четыре диаграммы направленности сигнал попадает только через боковые лепестки, и уровень итогового сигнала с этих направлений значительно ниже. Уровень мощности сигналов, принимаемых со всех семи направлений, позволяет четко идентифицировать



**Рис. 2.** Эксперименты с одним отражающим объектом. *a* — взаимное расположение приемного устройства и объекта; *b* — значения принятой мощности сигнала для каждого из семи лучей.



**Рис. 3.** Эксперименты с двумя отражающими объектами. *a* — общий вид объектов; *b* — значения принятой мощности сигнала для каждого из семи лучей.

наличие предмета (ему соответствуют три центральные точки с максимальными значениями сигнала), а также грубо оценить его размер: угловое расстояние между третьей и пятой точками составляет примерно  $20^\circ$ , что при расстоянии 2 м от „глаза“ до предмета соответствует линейному размеру  $\sim 0.7$  м.

На рис. 3, *b* представлена картина, наблюдаемая при наличии в поле зрения приемного устройства двух рассеивающих предметов меньшего размера (рис. 3, *a*). В этом случае четко идентифицируется наличие обоих объектов: вторая и третья точки соответствуют первому объекту, пятая и шестая точки — второму объекту (рис. 3, *b*). Об их размерах можно лишь сказать, что они меньше, чем в первом случае.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность наблюдения объектов в радиосвете с помощью многолучевых систем, подобных по своим

свойствам глазам биологических объектов с малым числом чувствительных элементов. Отметим, что плотность мощности радиоосвещения в экспериментах была примерно на три порядка ниже, чем требуется при типичном уровне освещения в видимом диапазоне света.

### Финансирование работы

Работа выполнена по государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Muralidharan, Y. Mostofi, in *2016 IEEE Int. Conf. on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)* (Shanghai, China, 2016), p. 6385. DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472906
- [2] R.S. Campos, L. Lovisolò, M.L. de Campos, *Expert Syst. Appl.*, **41** (14), 6211 (2014). DOI: 10.1016/j.eswa.2014.04.011
- [3] P. Galajda, A. Galajdova, S. Slovak, M. Pecovsky, M. Drutarovsky, M. Sukop, I. BA Samaneh, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, **15** (4), 1 (2018). DOI: 10.1177/1729881418795767
- [4] С.И. Ивашов, А.С. Бугаев, *Радиотехника и электроника*, **58** (9), 935 (2013). DOI: 10.7868/S0033849413090052
- [5] А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, М.Ю. Герасимов, В.В. Ицков, *Радиотехника и электроника*, **61** (11), 1073 (2016). DOI: 10.7868/S0033849416110024
- [6] А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, *Письма в ЖТФ*, **42** (24), 49 (2016). DOI: 10.21883/pjtf.2016.24.44078.16439
- [7] К.Ю.М. Смит, *Биология сенсорных систем* (БИНОМ, М., 2013).
- [8] A.V. Sichert, P. Friedel, J.L. van Hemmen, *Phys. Rev. Lett.*, **97** (6), 068105 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.068105
- [9] R.H. Douglas, G. Jeffery, *Proc. Roy. Soc. B*, **281** (1780), 20132995 (2014). DOI: 10.1098/rspb.2013.2995
- [10] Ю.В. Гуляев, А.С. Дмитриев, В.В. Ицков, М.М. Петросян, А.И. Рыжов, А.В. Уваров, *Радиотехника и электроника*, **63** (9), 947 (2018). DOI: 10.1134/S0033849418090085
- [11] А.С. Дмитриев, В.В. Ицков, М.М. Петросян, М.Г. Попов, А.И. Рыжов, *Радиотехника и электроника*, **64** (9), 916 (2019). DOI: 10.1134/S0033849419080047
- [12] С.Е. Банков, *Интегральная СВЧ-оптика* (Физматлит, М., 2018), с. 534.
- [13] A. Rabinovich, N. Alexandrov, *Antenna a rrays and automotive applications* (Springer, N.Y., 2013), p. 180.
- [14] M. Pokorný, *Rotman lens design with HFSS* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50490-rotman-lens-design-with-hfss-link>