



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 1  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(1)

Научная статья  
УДК 621.396.96

DOI: 10.18500/0869-6632-003130  
EDN: GZLVNY

## Модель построения двумерных изображений источников радиосвета с использованием корреляционного приёма

М. М. Петросян, А. И. Рыжов 

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

Поступила в редакцию 20.06.2024, принята к публикации 17.07.2024,  
опубликована онлайн 9.10.2024, опубликована 31.01.2025

**Аннотация.** Целью данной работы является создание модели построения двумерных изображений источников радиосвета, где приём основан на корреляционной обработке сигналов, поступающих с разнесённых в пространстве антенн. Здесь под радиосветом понимается сверхширокополосное шумоподобное микроволновое излучение. **Методы.** Для достижения этой цели в работе предлагается способ построения изображения и осуществляется его апробация при помощи компьютерного моделирования системы построения изображений. **Результаты.** Показано, как при помощи методов корреляционной обработки сигнала можно построить двумерные изображения источников радиосвета на примере компьютерного моделирования. Были получены изображения источников радиосвета, где возможно наблюдать на одном изображении два источника с разницей в уровне излучаемого сигнала 12 дБ. **Заключение.** Разработана компьютерная модель корреляционного приёмника радиосвета, позволяющая оценить влияние количества антенн на итоговое изображение, а также получать изображения нескольких источников радиосвета. Результаты проведённого компьютерного моделирования могут быть использованы для создания макета реальной системы построения изображений в радиосвете на основе корреляционной обработки.

**Ключевые слова:** сверхширокополосный, динамический хаос, радиосвет, корреляционный приём, изображения, моделирование.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00070).

**Для цитирования:** Петросян М. М., Рыжов А. И. Модель построения двумерных изображений источников радиосвета с использованием корреляционного приёма // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 1. С. 69–81. DOI: 10.18500/0869-6632-003130. EDN: GZLVNY

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Model of 2D-imaging system using correlation-based reception for image synthesis of radio light sources

M. M. Petrosyan, A. I. Ryzhov✉

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia

E-mail: chaos@cplire.ru, ✉mef.box@gmail.com

Received 20.06.2024, accepted 17.07.2024, available online 9.10.2024, published 31.01.2025

**Abstract.** The purpose of this work is to create a model of a system for constructing 2D images of radio light sources, where reception is based on correlation processing of signals coming from receiving antennas placed apart in space. In this article radio light refers to ultrawideband noise-like microwave radiation. *Methods.* To achieve this goal, a method for constructing an image is proposed and its implementation is tested using computer modeling of an imaging system. *Results.* It is shown how, using correlation signal processing methods, it is possible to construct 2D images of radio light sources using the example of computer modeling. Images of radio light sources were obtained, where it is possible to observe in one image two sources with a difference in the level of the emitted signal of 12 dB. *Conclusion.* A computer model of a correlation-based radio light receiver has been developed, which makes it possible to evaluate the influence of the number of antennas on the final image, as well as to obtain images of several radio light sources. The results of the computer simulation can be used to create a model of a real imaging system for radio light based on correlation processing.

**Keywords:** ultrawideband, dynamic chaos, radio light, correlation receiver, image, modeling.

**Acknowledgements.** The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00070).

**For citation:** Petrosyan MM, Ryzhov AI. Model of 2D-imaging system using correlation-based reception for image synthesis of radio light sources. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(1):69–81. DOI: 10.18500/0869-6632-003130

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

### Введение

Различные диапазоны излучения в электромагнитном спектре давно представляют интерес с точки зрения получения изображений, предоставляющих возможность получить информацию об окружающем нас мире, которая при использовании только видимого глазом диапазона (света) была бы просто недоступна. Это справедливо как для частот выше частот видимого диапазона (ультрафиолетовое и рентгеновское излучение), так и для частот более низких (инфракрасный, терагерцевый и микроволновой диапазоны) [1]. В случае источников излучения видимого света (например, солнца) наиболее характерными и важными его чертами является некогерентность и шумоподобность, что позволяет глазу получать изображения без эффектов интерференции, проявляющихся в случае с когерентным излучением. Эти черты также можно наблюдать, например, в радиодиапазоне в радиометрии [2], где используется свет от естественных источников и исследуется космическое пространство при помощи радиотелескопов, при зондировании поверхности Земли с помощью микроволнового излучения [3] или в медицине [4].

Одни из первых исследований, где проводились параллели между микроволновыми шумоподобными колебаниями и светом, представлены в работах [5–7]. Здесь важно отметить, что длительное время подобные исследования осложнялись из-за отсутствия компактных, недорогих и эффективных источников шумоподобного широкополосного излучения в микроволновом диапазоне.

Этот диапазон практически интересен, так как длина волны излучения позволяет проникать через препятствия, непрозрачные для излучения видимого диапазона, при этом имеется возможность работать с относительно малогабаритными устройствами. Важно также отметить фактор

доступности существующих и широко распространённых технологий (например, Wi-Fi), которые могут быть использованы для создания изображений в подсветке микроволнового диапазона [8, 9].

Возвращаясь к вопросу источников шумоподобного широкополосного излучения в микроволновом диапазоне, необходимых для развития направления построения изображений по аналогии со светом, отметим, что такие устройства были разработаны в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН [10] на основе динамического хаоса, и Дмитриевым А. С. было предложено использовать эти источники по аналогии с видимым светом для получения информации об окружающей среде.

В настоящей работе речь пойдёт о способе получения изображений с использованием радиосвета [11]. Радиосвет представляет собой сверхширокополосное (СШП) шумоподобное микроволновое излучение, обладающее по аналогии со светом в видимом диапазоне свойством некогерентности. Это позволяет размещать в интересующей области несколько источников излучения — ламп радиосвета — и по отражению их излучения от различных объектов получать информацию об окружающем пространстве.

Ранее были проведены исследования, касающиеся генерации [10] радиосвета, создания приёмного элемента [12], получения изображений объектов внутри помещения, освещённого радиосветом [13], а также использования многолучевой системы приёма на основе линзы Ротмана [14]. Эти работы были направлены на поиск решения, которое позволило бы ускорить процесс получения изображений, отойдя от пути механического сканирования, но при этом сохранив по возможности компактность и масштабируемость. Перспективным решением задачи построения изображения с использованием радиоосвещения с точки зрения скорости получения изображения и масштабируемости системы приёма является создание приёмника на основе корреляционной обработки сигнала, что было продемонстрировано для одномерного случая в работе [15].

В работе ставится задача расширить результаты, полученные в [15], и провести моделирование построения двумерных изображений ламп радиосвета при использовании корреляционного приёма с пространственным разрешением с целью оценки перспективности создания реального макета такой системы приёма.

## 1. Методы построения двумерного изображения

Итак, задача заключается в формировании изображений на основе приёма широкополосных сигналов, полученных от разнесённых в пространстве антенн. Ранее в работе [15] уже было показано, что при использовании корреляционных методов обработки сигналов можно получить одномерные отклики приёмной системы на источники радиосвета. В частности, было продемонстрировано, что ширина основного лепестка отклика в этом случае может быть оценена соотношением  $\theta_{-3dB} \approx c/(\Delta f D)$ , где  $c$  — скорость света,  $\Delta f$  — ширина полосы сигнала и  $D$  — расстояние между антеннами. Для ширины полосы 5 ГГц и расстояния 1 м  $\theta_{-3dB} \approx 3^\circ$ , что можно рассматривать как потенциально достижимое пространственное разрешение подобной системы приёма. Здесь и далее под откликом будем понимать скалярное произведение фрагментов сигналов, принятых от удалённых друг от друга антенн. Пусть две антенны расположены параллельно поверхности. Тогда отклик приёмной системы будет нести информацию о пространстве в азимутальной плоскости. На рис. 1 представлена пара таких приёмников радиосвета, расположенных в трёхмерном пространстве. Перемещение источника радиосвета в азимутальной плоскости по углу  $\varphi$  будет приводить к изменению разницы времени распространения сигнала от него до двух приёмных антенн, что будет выражаться в изменении уровня скалярного произведения сигналов, поступающих на приёмники  $A_1$  и  $A_2$ . Если же перемещать источник по углу места  $\theta$  относительно оси, соединяющей пару приёмных элементов, то разница во времени распространения сигнала не будет зависеть от изменения угла  $\theta$ .

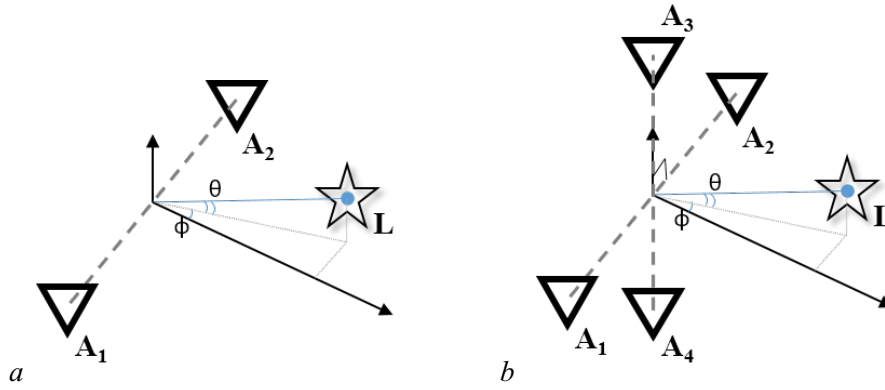


Рис. 1. Расположение приёмных элементов для случая: *a* – двух антенн; *b* – четырёх антенн  
 Fig. 1. Receiving antennas placement: *a* – 2 antennas; *b* – 4 antennas

Так, для схемы, представленной на рис. 1, *a*, отклик системы (взаимную корреляцию сигналов с выходов антенн) можно представить следующим образом:

$$R(\tau) = \langle s(t), s(t + \tau - (\tau_{A1}(\phi, \theta) - \tau_{A2}(\phi, \theta))) \rangle. \quad (1)$$

Для пары приёмных элементов  $A_1, A_2$  значение  $R(\tau)$  отклика будет одинаковым для любых значений  $\theta$ .

Следовательно, чтобы сформировать двумерное изображение необходимо иметь минимум три антенны, расположенные не на одной линии. Для простоты рассмотрим случай, показанный на рис. 1, *b*. Здесь для пары антенн  $A_3$  и  $A_4$ , линия соединения которых перпендикулярна линии соединения антенн  $A_1$  и  $A_2$ , перемещение источника излучения по углу места  $\theta$  будет приводить к изменению относительной задержки, что также будет сказываться и на уровне корреляции.

Следующий вопрос, который необходимо решить для задачи построения двумерного изображения – как именно комбинировать отклики, получаемые от всех пар приемных устройств, чтобы в результате можно было сформировать изображение.

На рис. 2 показаны примеры изображения двумерных откликов. Рассмотрим отклики, полученные для пар приёмных антенн  $A_1, A_2$  и  $A_3, A_4$ . В связи с тем, что каждая пара приемников привносит информацию только для одного направления, то, как можно увидеть, при формировании изображения по двум координатам  $\phi, \theta$  получается одномерный отклик, растянутый вдоль прямой, перпендикулярной к прямой, соединяющей антенны. Пусть  $R_{12}(\tau) = R_{12}(\tau(\phi, \theta)) = R_{12}(\phi, \theta)$  – отклик для антенн  $A_1$  и  $A_2$ , а  $R_{34}(\tau) = R_{34}(\tau(\phi, \theta)) = R_{34}(\phi, \theta)$  – отклик для антенн  $A_3$  и  $A_4$ . Рассмотрим две точки на этих изображениях: одна соответствует положению источника излучения в пространстве  $(R_S(\phi_S, \theta_S))$ , квадрат на рис. 2), а другая – точке, где такого источника нет  $(R_0(\phi_0, \theta_0))$ , круг на рис. 2), причём  $\theta_0 = \theta_S$ . Для упрощения рассмотрим случай, когда боковые лепестки откликов равны нулю. Пусть  $P$  – мощность поступающего от источника радиосвета сигнала. Тогда

$$\begin{cases} R_{12}(\phi_S, \theta_S) = P, \\ R_{34}(\phi_S, \theta_S) = P, \\ R_{12}(\phi_0, \theta_0) = 0, \\ R_{34}(\phi_0, \theta_0) = P. \end{cases} \quad (2)$$

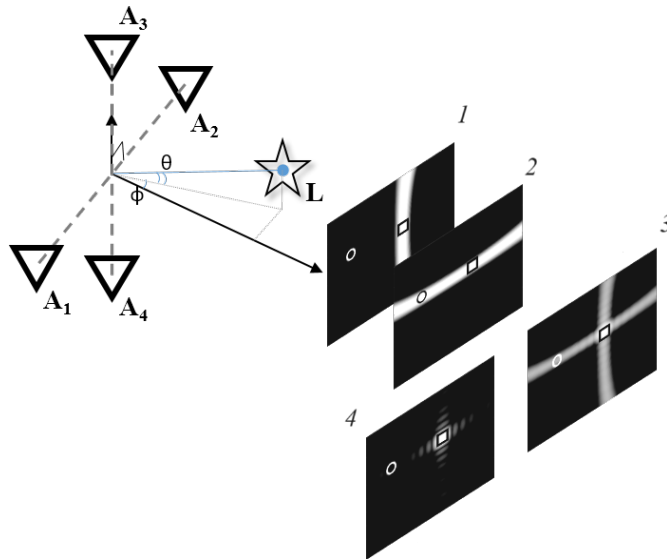


Рис. 2. Пример построения изображения на основе комбинации двумерных откликов. 1 – визуализация отклика  $R_{12}$ , 2 – визуализация отклика  $R_{34}$ , 3 – визуализация итогового отклика  $R$  как среднего арифметического для  $R_{12}$  и  $R_{34}$ , 4 – визуализация итогового отклика  $R$  как среднего геометрического для  $R_{12}$  и  $R_{34}$

Fig. 2. An example of image building based upon combination of 2D responses. 1 – visualisation of response  $R_{12}$ , 2 – visualisation of response  $R_{34}$ , 3 – visualisation of final response  $R$  as mean for  $R_{12}$  and  $R_{34}$ , 4 – visualisation of final response  $R$  as geometric mean for  $R_{12}$  и  $R_{34}$

Итоговый отклик может быть получен разными способами. Например, можно рассмотреть вычисление среднего значения:  $R(\phi, \theta) = 1/2(R_{12}(\phi, \theta) + R_{34}(\phi, \theta))$ , или среднего геометрического:  $R(\phi, \theta) = \sqrt{R_{12}(\phi, \theta)R_{34}(\phi, \theta)}$ . В каждом из этих вариантов в точке, соответствующей положению источника излучения, яркость будет равняться мощности поступающего излучения  $R_S(\phi_S, \theta_S) = P$ , и отличие будет проявляться в точке на изображении, где источники излучения отсутствуют. В случае среднего арифметического яркость в этой точке будет  $R_0(\phi_0, \theta_0) = P/2$ , то есть всего на 3 дБ слабее по сравнению с точкой расположения источника излучения, вследствие чего по соответствующим направлениям динамический диапазон не будет превышать 3 дБ. Во втором случае для точки  $(\phi_0, \theta_0)$ , где корреляция отсутствует на одном из изображений откликов, в результате перемножения уровень яркости в этих точках будет нулевым:  $R_0(\phi_0, \theta_0) = \sqrt{R_{12}(\phi_0, \theta_0)R_{34}(\phi_0, \theta_0)} = 0$ , то есть динамический диапазон системы в этом случае устремится в бесконечность. Однако в реальности динамический диапазон будет ограничиваться боковыми лепестками корреляционной функции, уровень которых будет спадать быстрее при увеличении ширины полосы частот сигнала. Стоит отметить, что на практике наличие боковых лепестков хотя и сказывается на динамическом диапазоне системы, но он всё ещё остаётся выше, чем в первом случае расчёта итогового отклика, что будет показано далее в работе.

## 2. Описание математической модели

Перейдем теперь к описанию модели построения двумерных изображений в радиосвете при использовании корреляционного приёма с пространственным разрешением. Ранее в работе [15] была решена задача получения одномерных откликов приёмной системы, основывающейся на корреляционной обработке сигналов, получаемых от двух слабонаправленных антенн, на источнике радиосвета. Эта модель была взята за основу и доработана для моделирования трехмерной

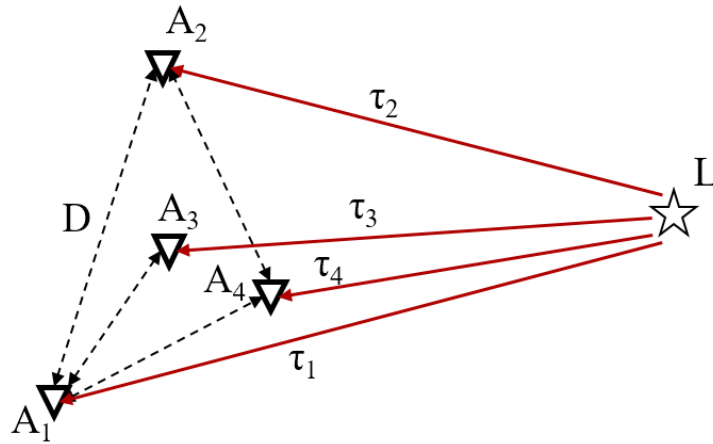


Рис. 3. Схема корреляционного приема радиосвета в трехмерном пространстве для четырёх антенн. А — антенна, L — лампа радиосвета,  $\tau$  — время распространения электромагнитного излучения от лампы до приемных антенн

Fig. 3. Correlation-based reception scheme depicted in 3D space for 4 antennas. A — antenna, L — radio light lamp,  $\tau$  — propagation time of electromagnetic radiation from radio light lamp to receiving antennas

конфигурации, приведенной на рис. 3. В качестве приемного устройства для моделирования использовалась преимущественно система, состоящая из четырех антенных элементов (см. рис. 3). С учётом того, как для каждой пары антенн формируется двумерный отклик, антенны необходимо устанавливать таким образом, чтобы увеличивать суммарную информацию, получаемую системой. Для системы с четырьмя антеннами выбрана конфигурация, приведенная на рис. 3: три антенны расставлены на гранях правильного треугольника со стороной, равной  $D$ , и четвертая антенна находится в его центре. Все антенны располагаются в одной плоскости.

Для исследования влияния числа приемных антенн на двумерный отклик системы корреляционного приёма в условиях работы, в том числе с несколькими источниками излучения, а также для оценки перспективности создания реального макета такой системы приёма была разработана модель в программной среде MATLAB, которая реализует схему, представленную на рис. 3. Модель работает следующим образом. В программе в качестве входных параметров задаются трехмерные координаты лампы радиосвета и принимающих антенн коррелятора. Осуществляется расчет задержек в распространении сигнала от точек расположения лампы радиосвета до принимающих антенн.

В качестве хаотического сигнала лампы радиосвета используется генератор случайных чисел с нормальным распределением. Мы можем так сделать в модели для упрощения расчётов, так как для использующейся далее обработки сигнала в первую очередь важна непрерывность и равномерность спектра сигнала, а также ширина полосы. Для формирования сигнала в нужной полосе применяется полосовой фильтр, далее сигнал нормируется по мощности (рис. 4). Полоса сигнала выбрана 2 ГГц, так как ранее были разработаны лампы радиосвета с такой полосой на основе сверхширокополосного генератора хаотического сигнала [16], и в дальнейшем они будут использоваться для испытаний будущего макета системы приёма.

Далее таким образом формируются широкополосные сигналы лампы радиосвета ( $S_{Ln}$ ,  $N$  — число лампы) в заданной полосе частот для каждой лампы, копии которых суммируются для всех приемных антенн  $S_{AM}$  ( $M$  — число антенн) с задержками, соответствующими их относительным положениям

$$S_{AM}(t) = \sum_{n=1}^N S_{Ln}(t - \tau_{AMLn}). \quad (3)$$

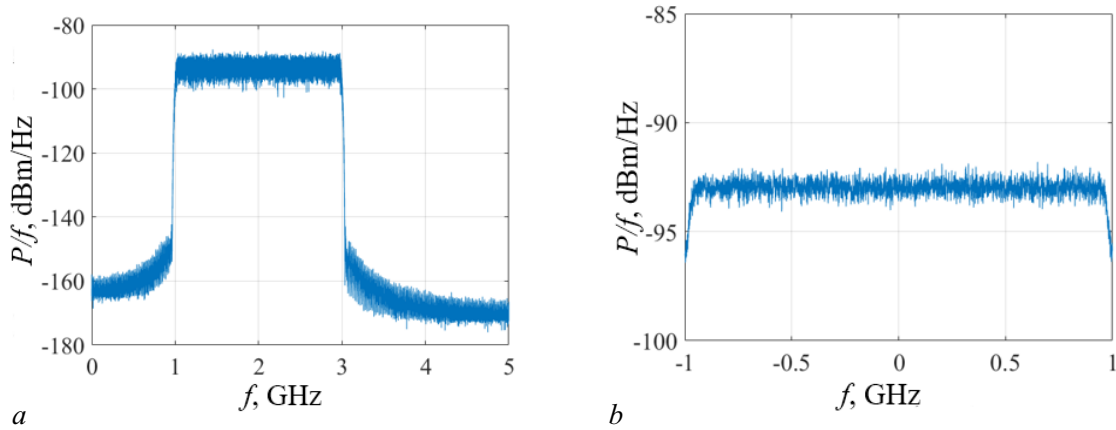


Рис. 4. Спектральная плотность мощности лампы радиосвета с полосой 2 ГГц: *a* — на несущей частоте; *b* — при переносе частоты в область видеочастот

Fig. 4. Power spectrum density of radio light lamp with bandwidth 2 GHz: *a* — passband; *b* — baseband

Для вычисления задержек при распространении сигнала до антенн в точке приёма пространство разбивается на воксели (объёмный пиксель, представляет собой куб). Затем рассчитываются значения времени распространения сигнала от всех центров вокселей заданной области пространства до всех приемных антенн.

Далее производится корреляция сигналов для всех пар антенн для каждого заданного вокселя пространства. Для оптимизации процесса расчёта задержек между сигналами, равных  $\tau(\phi, \theta)$ , и для осуществления перемножения с усреднением применяется теорема Парсеваля и свойство Фурье-преобразования:

$$s(t + \tau) \leftrightarrow S(\omega)e^{-k\omega\tau}. \quad (4)$$

Для дискретного случая расчёта корреляции сигналов, поступающих от пары антенн  $i$  и  $j$ , для заданной точки пространства имеем следующее значение отклика:

$$R_{ij}(\phi, \theta) = 1/K \sum_{k=0}^{K-1} S_{Ai}(k) \underline{S_{Ai}(k + \tau_{\phi, \theta})} = 1/K^2 \sum_{n=0}^{K-1} S_{Ai}(n) \underline{S_{Ai}(n)} e^{i2\pi n \tau_{\phi, \theta}/K}, \quad (5)$$

где  $K$  — число отсчетов, для которых производится корреляция, или уровень накопления сигнала,  $n$  — номер отсчета в Фурье-пространстве. Это действие производится для всех пар антенн. Наконец, мы можем рассчитать итоговую интенсивность точки на изображении, перемножив и возведя в степень, обратно пропорциональную числу уникальных пар антенн  $H$ , полученные отклики:

$$I(\phi, \theta) = \left( \prod_{i,j} R_{ij}(\phi, \theta) \right)^{1/H}. \quad (6)$$

### 3. Результаты моделирования

В соответствии с математической моделью, представленной в предыдущем разделе, было проведено моделирование системы построения изображения, где расположение лампы радиосвета и приёмных антенн показано на рис. 3. Основные параметры модели следующие: ширина полосы источника излучения равна 2 ГГц, средняя длина волны излучения 15 см, длина стороны



правильного треугольника при расположении антенн, согласно рис. 3,  $D = 1.5$  м, накопление сигнала  $K = 10^5$ . Расстояние между антенной источника излучения и плоскостью приемной системы равнялось 100 м. Значения углов  $\phi$ ,  $\theta$  менялись в диапазоне  $[-50^\circ, 50^\circ]$  для каждого с шагом  $0.25^\circ$ .

Сначала рассмотрим, как выглядят всевозможные изображения при использовании различных пар антенн для схемы, приведённой на рис. 3. На рис. 5 приведены изображения для рассматриваемых пар антенн, сверху рисунка указаны номера антенн, образующих пару, и они соответствуют номерам на схеме, приведённой на рис. 3.

Всего здесь приведено 4 антенны, следовательно, число всевозможных неупорядоченных пар среди них  $C_2^4 = 6$ . Источник излучения располагался в точке с координатами. Корреляция сигналов, принимаемых антеннами, и интенсивность на изображении рассчитывалась согласно формулам (5) и (6) соответственно, и затем нормировалась, после чего разным значениям ставился в соответствие различный цвет согласно шкале, приведённой на изображениях.

Далее изучим, как влияет различное число антенн в приёмнике на итоговое изображение. Для случая наличия одной или двух приёмных антенн, они располагались напротив источника радиосвета; в случае трёх антенн — они располагались так же, как антенны  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_4$  на рис. 3, а четыре антенны соответствуют конфигурации на рис. 3. Изображения, полученные в результате проведённого компьютерного моделирования, представлены на рис. 6.

Здесь можно наблюдать, что для случая двух антенн (рис. 6, а) не хватает информации для определения местоположения источника излучения. Когда в систему приёма была добавлена ещё одна антенна, то уже стало возможно определять, где находится лампа радиосвета, однако на изображении присутствуют ярко выраженные артефакты, которые могут серьёзно сказаться на результате для случая работы с несколькими источниками излучения. Наконец, для случая

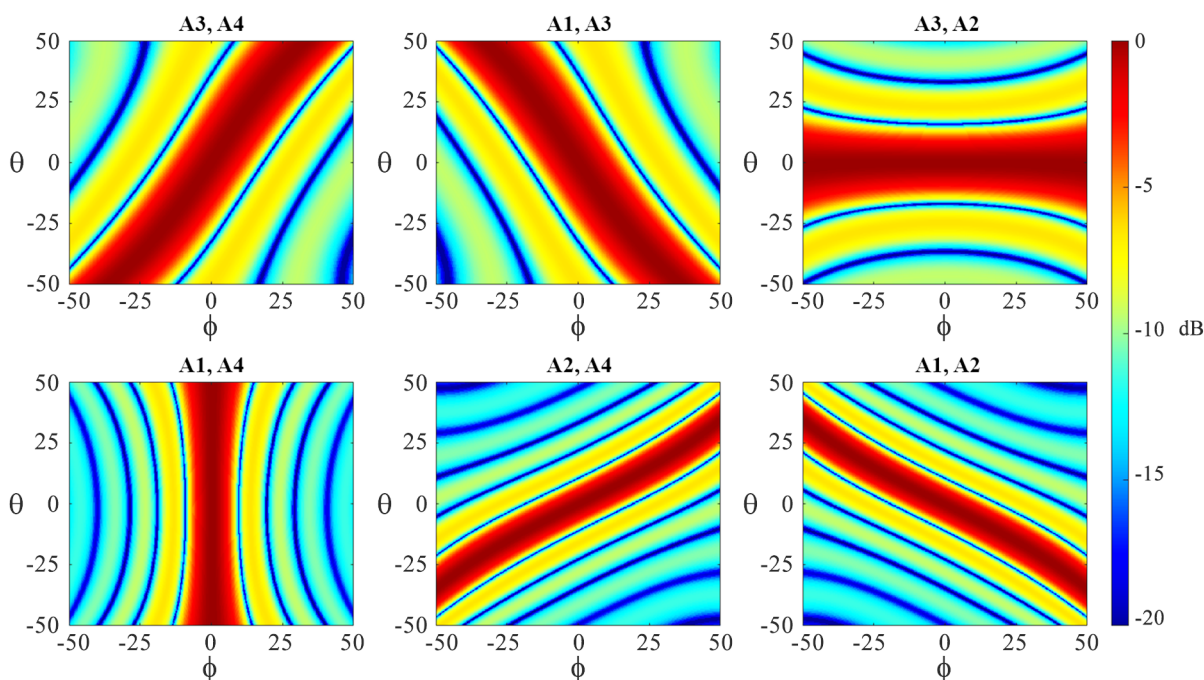


Рис. 5. Изображения, полученные для всевозможных различных пар антенн. Номера антенн соответствуют схеме, приведённой на рис. 3 (цвет онлайн)

Fig. 5. Images that were obtained for all the possible different antenna pairs. Antenna numbers correspond to the numbers shown in fig. 3 (color online)



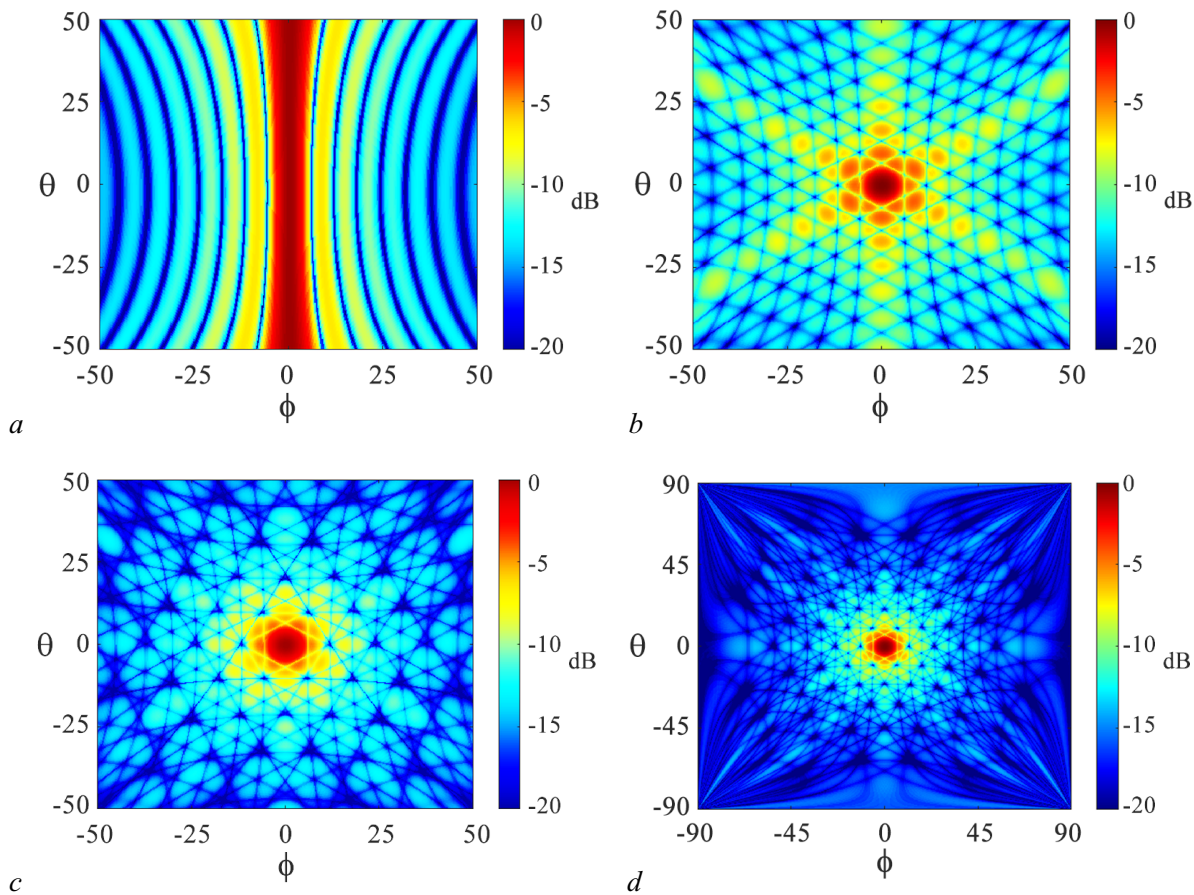


Рис. 6. Отклик корреляционного приемника радиосвета при использовании: *a* — двух антенн; *b* — трех антенн; *c* — четырех антенн; *d* — четырех антенн для расширенной области с углами  $\phi$ ,  $\theta$  в диапазоне  $[-90^\circ, 90^\circ]$  (цвет онлайн)  
 Fig. 6. Response of correlation-based radio light receiver while using: *a* — 2 antennas; *b* — 3 antennas; *c* — 4 antennas; *d* — 4 antennas and the scanning area for  $\phi$ ,  $\theta$  was increased to  $[-90^\circ, 90^\circ]$  (color online)

четырёх антенн мы можем наблюдать значительно более чистое изображение с минимумом эффектов, вызванных наличием боковых лепестков в автокорреляционной функции (рис. 6, *c*). Для наглядности на рис. 6, *d* приведено изображение также для конфигурации с четырьмя антеннами, однако здесь область сканирования для углов  $\phi$ ,  $\theta$  была увеличена до  $[-90^\circ, 90^\circ]$  для каждого направления.

Из представленных результатов видно, что увеличение числа приемных антенн уменьшает шумы в системе за счёт понижения уровня боковых лепестков в результирующем отклике. Однако с практической точки зрения важно минимизировать число антенн при создании реальной системы. Поэтому на основе полученных результатов моделирования было принято решение в дальнейшем работать с четырьмя приёмными антеннами.

Следующим шагом была работа с двумя источниками радиосвета, для чего было проведено соответствующее моделирование. Приёмные антенны и лампы радиосвета в модельном эксперименте располагались в соответствии с рис. 3, однако здесь источники излучения расположены в точках с координатами  $(-25^\circ, 0^\circ)$  и  $(0^\circ, 25^\circ)$ . В этом эксперименте ставилась задача определить, при какой максимальной разнице в уровне излучения ламп радиосвета на изображении можно будет наблюдать два источника излучения. Для этого мощность одного из источников радиосвета оставалась постоянной, а мощность другого изменялась. Результаты приведены на рис. 7.

По этим изображениям видно, что второй источник излучения можно наблюдать вплоть до уровня ослабления сигнала на 8 дБ, тогда как при ослаблении на 12 дБ сигнал становится неразличим с «отблесками» соседнего источника излучения.

Понижение уровня боковых лепестков для итогового значения корреляционной функции будет способствовать увеличению эффективного динамического диапазона системы. Этого можно добиться, например, за счёт добавления весовых коэффициентов в частотной области изображения. Согласно теореме Виннера–Хинчина между корреляционной функцией и полосой частот сигнала есть взаимно-однозначное соответствие в виде преобразования Фурье. По этой причине можно добиться изменения корреляционной функции, если менять форму сигнала в частотной области [16].

В качестве примера такой функции была взята оконная функция Кайзера [17] для изменения весовых коэффициентов в частотной области. Её применение позволяет понизить уровень боковых лепестков корреляционной функции за счёт расширения основного лепестка. На рис. 8 приведены изображения, полученные после дополнительной обработки с её применением. В результате произведенного преобразования видно, что основные лепестки стали шире, но при этом боковые лепестки снизились настолько, что вторую лампу радиосвета можно обнаружить даже при понижении её излучаемой мощности на 12 дБ относительно первой (рис. 7, *d* и рис. 8, *d*).

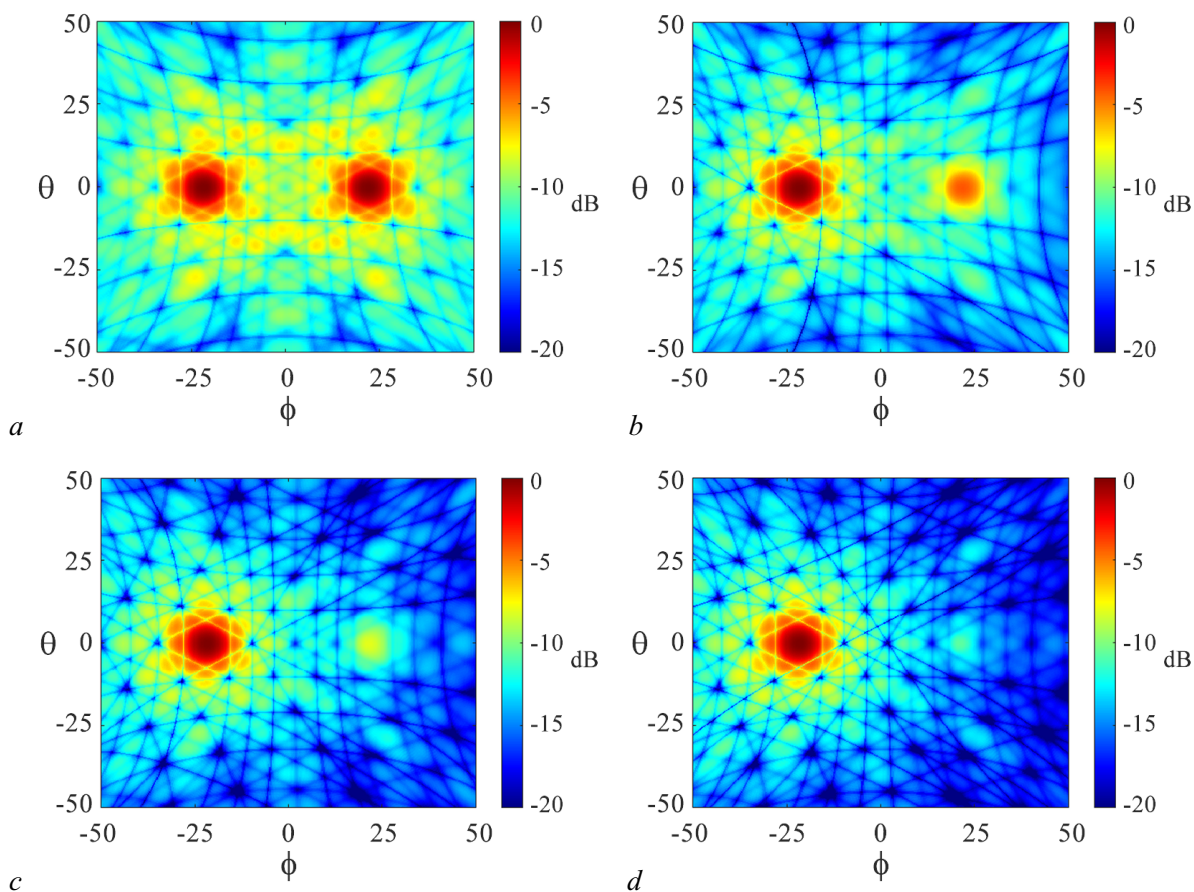


Рис. 7. Отклик приёмной системы на наличие двух ламп радиосвета при ослаблении сигнала правой лампы относительно левой на: *a* – 0 дБ; *b* – 4 дБ; *c* – 8 дБ; *d* – 12 дБ (цвет онлайн)

Fig. 7. Response of correlation-based radio light receiver to the presence of two radio light lamps where one of them was attenuated relatively to the other by: *a* – 2 дБ; *b* – 4 дБ; *c* – 8 дБ; *d* – 12 дБ (color online)

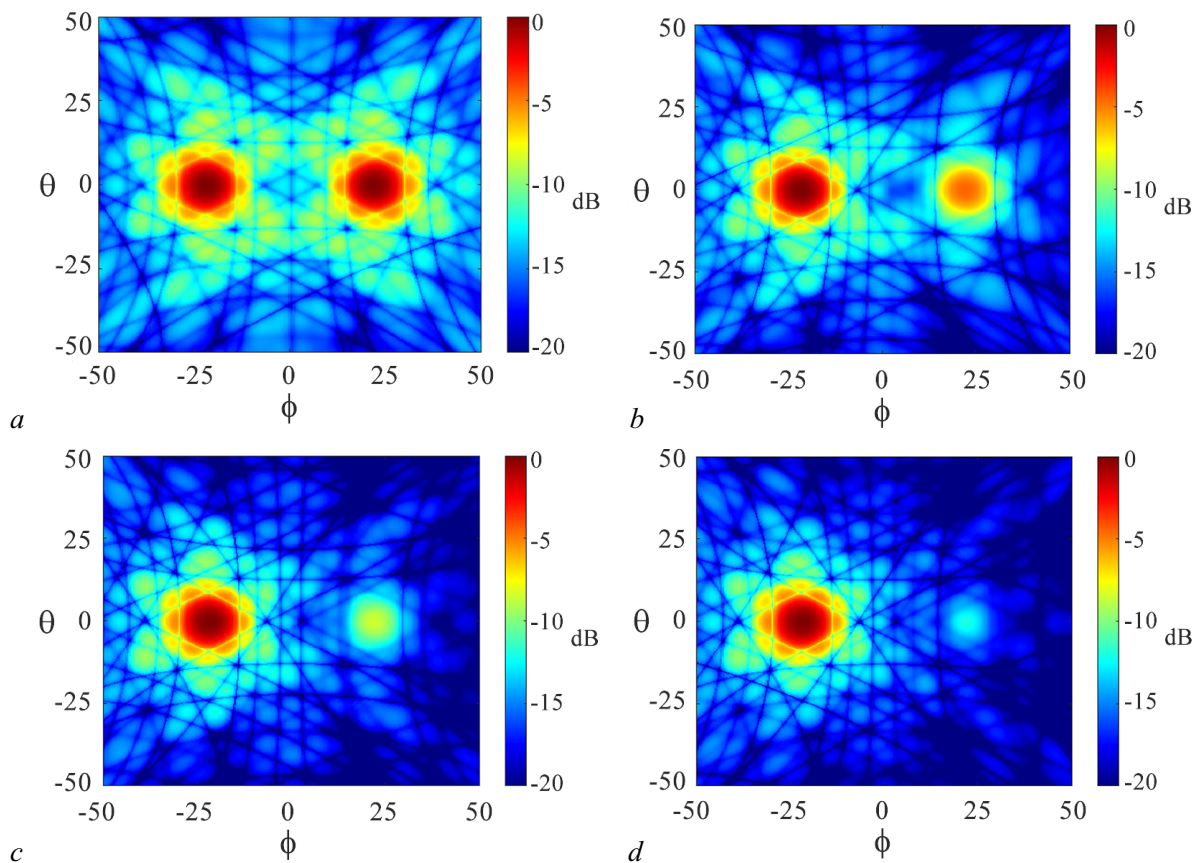


Рис. 8. Отклик приёмной системы после применения оконной функции Кайзера на наличие двух ламп радиосвета при ослаблении одной из ламп относительно другой на:  $a - 0$  дБ;  $b - 4$  дБ;  $c - 8$  дБ;  $d - 12$  дБ (цвет онлайн)

Fig. 8. Response of correlation-based radio light receiver after the Kaiser window function was applied to the presence of two radio light lamps where one of them was attenuated relatively to the other by:  $a - 0$  dB;  $b - 4$  dB;  $c - 8$  dB;  $d - 12$  dB (color online)

### Заключение

Рассмотрена проблема синтеза двумерных изображений источников радиосвета, в основе чего лежит корреляционная обработка сигналов, поступающих с разнесённых в пространстве антенн. В работе представлен метод построения изображений источников сверхширокополосного микроволнового излучения, а также предложена математическая модель для синтеза изображений на основе корреляционной обработки. В результате проведенного моделирования показано, что для работы системы построения изображений достаточно иметь четыре антенны, а также были получены изображения источников радиосвета. Продемонстрирована возможность наблюдения на одном изображении двух источников радиосвета с разницей в уровне излучаемого сигнала 12 дБ. В целом полученные результаты могут быть использованы для создания реального макета такой системы приёма и позволяют сделать вывод о его перспективности.

### Список литературы

1. Спиридонов О. П. Свет. Физика. Информация. Жизнь. М.: Ленанд, 2014. 218 с.
2. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
3. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

4. Гуляев Ю. В. Физические поля и излучения человека: Новые неинвазивные методы медицинской диагностики. М.: РБОФ «Знание» им. Вавилова, 2009. 28 с.
5. Polivka J., Fiala P., Machac J., Medvedeva T. M. Microwave noise field behaves like white light // Progress in Electromagnetics Research. 2011. Vol. 111. P. 311–330. DOI: 10.2528/PIER10041304.
6. Polivka J. Microwave radiometry and applications // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1995. Vol. 16. P. 1593–1672. DOI: 10.1007/BF02274819.
7. Polivka J. Microwave noise radiators // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1997. Vol. 18. P. 2403–2410. DOI: 10.1007/BF02678400.
8. Pallaprolu A., Korany B., Mostofi Y. Analysis of Keller cones for RF imaging // 2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23). San Antonio, TX, USA, 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/RadarConf2351548.2023.10149785.
9. Korany B., Karanam C. R., Mostofi Y. Adaptive near-field imaging with robotic arrays // P2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Sheffield, UK, 08-11 July 2018. N.-Y.: IEEE, 2018. P. 134. DOI: 10.1109/SAM.2018.8448565.
10. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В. Источники радиоосвещения на основе сверхширокополосных микрогенераторов хаотических колебаний // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 24. С. 49–57. DOI: 10.21883/pjtf.2016.24.44078.16439.
11. Dmitriev A. S., Efremova E. V., Ryzhov A. I., Petrosyan M. M., Itskov V. V. Artificial radio lighting with sources of microwave dynamic chaos // Chaos. 2021. Vol. 31, № 6. 063135. DOI: 10.1063/5.0053504.
12. Гуляев Ю. В., Дмитриев А. С., Ицков В. В., Петросян М. М., Рыжов А. И., Уваров А. В. Ячейка приемника радиосвета // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63, № 9. С. 947–952. DOI: 10.1134/S0033849418090085.
13. Дмитриев А. С., Ицков В. В., Петросян М. М., Попов М. Г., Рыжов А. И. Искусственное радиоосвещение в закрытом пространстве // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 9. С. 916–925. DOI: 10.1134/S0033849419080047.
14. Дмитриев А. С., Петросян М. М., Рыжов А. И. Экспериментальная модель многолучевого устройства для наблюдения в радиосвете // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, № 12. С. 38–41. DOI: 10.21883/PJTF.2021.12.51066.18762.
15. Petrosyan M. M., Ryzhov A. I. Correlation-based reception method of radio light with spatial resolution and its implementation // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Vol. 68, № 9. P. 1015–1023. DOI: 10.1134/S106422692309022X.
16. Романюк Ю. А. Основы обработки сигналов: Учеб. пособие. М.: МФТИ, 1989. 92 с.
17. Kaizer J. F. Nonrecursive digital filter design using the I0-Sinh Window function // Proceedings of the 1974 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'74), San Francisco, Calif, USA, 1974. P. 20–23.

## References

1. Spiridonov O.P. Light. Physics. Information. Life. М.: Lenand; 2014. 218 p. (in Russian).
2. Shutko A.M. UHF-Radiometry of Water and Soil Surfaces. М.: Nauka; 1986. 190 p. (in Russian).
3. Sharkov E.A. Radiothermal Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Vol. 1. М.: IKI RAS; 2014. 544 p. (in Russian).
4. Gulyaev Yu.V. Physical Fields and Radiation of Human Body: New Non-Invasive Methods of Medical Diagnostics. М.: RBOF “Znanie” Im. Vavilova; 2009. 28 p.
5. Polivka J., Fiala P., Machac J. Microwave noise field behaves like white light. Progress in Electromagnetics Research. 2011;111:311–330. DOI: 10.2528/PIER10041304.
6. Polivka J. Microwave radiometry and applications. International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1995;16:1593–1672. DOI: 10.1007/BF02274819.
7. Polivka J. Microwave noise radiators. International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1997;18:2403–2410. DOI: 10.1007/BF02678400.

8. Pallaprolu A, Korany B, Mostofi Y. Analysis of Keller cones for RF imaging. 2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23). San Antonio, TX, USA, 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/RadarConf2351548.2023.10149785.
9. Korany B, Karanam CR, Mostofi Y. Adaptive near-field imaging with robotic arrays. 2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Sheffield, UK, 08-11 July 2018. N.-Y.: IEEE; 2018. P. 134. DOI: 10.1109/SAM.2018.8448565.
10. Dmitriev AS, Efremova EV. Radio-frequency illumination sources based on ultrawideband microgenerators of chaotic oscillations. Tech. Phys. Lett. 2017;43(1):42–45. DOI: 10.1134/S106378501612018X.
11. Dmitriev AS, Efremova EV, Ryzhov AI, Petrosyan MM, Itskov VV. Artificial radio lighting with sources of microwave dynamic chaos. Chaos. 2021;31(6):063135. DOI: 10.1063/5.0053504.
12. Gulyaev YuV, Dmitriev AS, Itskov VV, Petrosyan MM, Ryzhov AI, Uvarov AV. Cell of radio-light receiver. Journal of Communications Technology and Electronics. 2018;63(9):1009–1014. DOI: 10.1134/S1064226918090085.
13. Dmitriev AS, Itskov VV, Petrosyan MM, Popov MG, Ryzhov AI. Artificial radio illumination in a closed space. Journal of Communications Technology and Electronics. 2019;64(9):987–996. DOI: 10.1134/S1064226919080047.
14. Dmitriev AS, Petrosyan MM, Ryzhov AI. Experimental model of a multibeam device for observation in radio light. Tech. Phys. Lett. 2021;47:597–600. DOI: 10.1134/S1063785021060201.
15. Petrosyan MM, Ryzhov AI. Correlation-based reception method of radio light with spatial resolution and its implementation. Journal of Communications Technology and Electronics. 2023;68(9):1015–1023. DOI: 10.1134/S106422692309022X.
16. Romanuk YuA. Signal Processing Foundations: Textbook. M.: MIPT; 1989. 92 p.
17. Kaizer JF. Nonrecursive digital filter design using the I0-Sinh Window function. Proceedings of the 1974 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'74), San Francisco, Calif, USA, 1974. P. 20–23.



*Петросян Манвел Мгерович* — родился 1993 году в Ванадзоре (Республика Армения). Окончил Ереванский государственный университет (2014). Кандидат физико-математических наук в области радиофизики (2016, МФТИ). Научный сотрудник лаборатории информационных и коммуникационных технологий на основе динамического хаоса в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7  
 Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
 E-mail: chaos@cplire.ru  
 ORCID: 0000-0003-2502-5987  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 994954



*Рыжов Антон Игоревич* — родился в Москве (1986). Окончил Московский физико-технический институт (2010). Кандидат физико-математических наук в области радиофизики (2016). Старший научный сотрудник лаборатории информационных и коммуникационных технологий на основе динамического хаоса в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Имеет более 40 научных публикаций.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7  
 Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
 E-mail: mef.box@gmail.com  
 ORCID: 0000-0001-6725-7984  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 746678