

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС В РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 621.396.96

### СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОСВЕТЕ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМА

© 2025 г. М. М. Петросян, А. И. Рыжов\*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

*\*E-mail: mef.box@gmail.com*

Поступила в редакцию 24.05.2024 г.

После доработки 17.06.2024 г.

Принята к публикации 24.06.2024 г.

Рассмотрена задача создания системы построения двумерных изображений в радиосвете на основе корреляционного приема, где под радиосветом понимается сверхширокополосное шумоподобное микроволновое излучение. Разработана математическая модель, при помощи которой были получены изображения ламп радиосвета, также результаты моделирования были использованы для создания реального макета системы приема. Проведены эксперименты с макетом системы построения двумерных изображений в радиосвете на основе корреляционного приема, при помощи которого были получены изображения двух источников радиосвета с разницей в уровне излучения 12 дБ.

**Ключевые слова:** сверхширокополосный, динамический хаос, радиосвет, корреляционный прием, изображения

**DOI:** 10.31857/S0033849425020054, **EDN:** GMHUYH

#### ВВЕДЕНИЕ

Использование электромагнитного излучения микроволнового диапазона для построения изображений является интересным объектом изучения для различных исследователей. Это вызвано тем, что, с одной стороны, работая в этом диапазоне, можно получать информацию об объектах, располагающихся за препятствиями для видимого диапазона (стены, межэтажные перекрытия, деревья и др.) [1, 2]. В то же время, с другой стороны, длина волны излучения не слишком велика, что позволяет получить достаточную разрешающую способность для обнаружения небольших объектов, а также работать с относительно малогабаритными источниками и приемниками излучения. Кроме того, нужно отметить фактор доступности используемой аппаратуры и технологий, что позволило создать системы построения изображений, например, на основе Wi-Fi приемопередатчиков [3–5]. Рассмотрим подробнее некоторые работы.

В работе [3] была показана возможность получения изображений граней металлических объектов

при помощи Wi-Fi, а также был исследован вопрос влияния граней этих объектов на их видимость на синтезируемых изображениях. В качестве приемной системы использовалась антенная система, которая формировалась путем механического перемещения приемной Wi-Fi антенны в области. Система работала в диапазоне 2.4...5.32 ГГц.

В статье [6] авторы исследуют задачу получения изображения от отражающих объектов, находящихся за диэлектрической стеной. С целью улучшения качества получаемых изображений при фиксированном небольшом числе антенн (четыре) предлагается производить механическое сканирование металлическим цилиндром. Было проведено моделирование для полосы 1.5...2.5 ГГц. При этом приемопередающие антенны располагались равноудаленно через 50 см друг от друга вдоль линии, параллельной поверхности стены. Показано улучшение качества получаемых изображений при использовании механического сканирования цилиндрическим зеркалом.

В следующей работе [7] исследуется вопрос эффективного расположения антенн в ММО СШП радарах с точки зрения увеличения динамического диапазона получаемого изображения. В качестве зондируемого сигнала применялся сигнал с шириной полосы 6 ГГц и несущей частоте 6 ГГц. Было показано, что при применении 16 передающих и 8 приемных антенн модифицированное спиралевидное расположение антенн позволяет достичь динамического диапазона 19 дБ.

В целом анализ этих и других работ, рассматривающих вопросы построения изображений при помощи электромагнитного излучения микроволнового диапазона, показывает, что чаще всего используются многоэлементные приемные системы с СШП зондирующими сигналами [1, 2, 5, 7] и системы на основе сканирования интересующей области узконаправленными антеннами [3, 4, 6, 8]. Стоит отметить, что эти методы объединяет то, что в них передатчики прямо или косвенно получают информацию о зондирующем сигнале, в то время как в предлагаемом ниже способе на приемной стороне необходимо лишь знать полосу источника излучения.

В данной работе речь пойдет о еще одном способе получения изображений в микроволновом диапазоне, который основывается на использовании радиосвета [9]. 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 [9] радиосвета, создания приемного элемента [10], получения изображений объектов внутри помещения, освещенного радиосветом [11], а также использования многолучевой системы приема на основе линзы Ротмана [12]. 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.

Так в работе [13] был предложен способ построения изображения в радиосвете на основе корреляционной обработки сигнала и была продемонстрирована его физическая реализация для одномерного случая. Настоящая работа является ее прямым продолжением, и здесь решается вопрос создания макета системы построения двумерных изображений в радиосвете на основе корреляционного приема, а также получения изображений двух источников широкополосного микроволнового излучения и оценка максимальной разницы в интенсивности между ними, которая может быть зафиксирована на изображении.

## 1. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Прежде чем переходить к описанию процесса моделирования и создания макета системы приема радиосвета на основе корреляционного приема, рассмотрим способ построения изображения на основе приема широкополосных сигналов, полученных от разнесенных в пространстве приемных элементов. В предыдущей работе [13], посвященной этой тематике, было показано, как корреляционный метод обработки сигналов может быть применен для получения одномерных откликов приемной системы на источники радиосвета. В частности, было показано, что ширина основного лепестка отклика в этом случае может быть оценена по соотношению  $\Psi_{-3\text{дБ}} \approx c/(\Delta f D)$ , где  $c$  — скорость света,  $\Delta f$  — ширина полосы сигнала и  $D$  — расстояние между антеннами. Для ширины полосы 5 ГГц и расстояния 1 м  $\Psi_{-3\text{дБ}} \approx 3^\circ$ . Это может являться оценкой потенциально достижимого пространственного разрешения подобной системы приема (рис. 1).

Введем полярные координаты, где  $\varphi$  — угол в азимутальной плоскости, а  $\theta$  — угол места. Для одномерного случая, когда система приема состоит из двух антенн (антенны  $A_1$  и  $A_2$ ), такой отклик даст нам информацию об окружающем пространстве в азимутальной плоскости. В силу того, что отклик приемной системы представляет собой скалярное перемножение сигналов, полученных с приемников  $A_1$  и  $A_2$ , то изменение положения источника по углу места не будет влиять на получаемый отклик

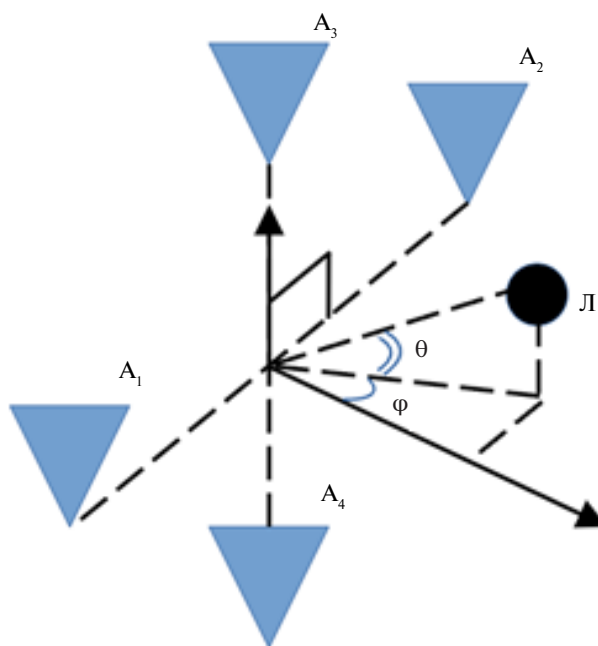


Рис. 1. Расположение антенн в системе приема.

т.к. это не будет сказываться на относительном изменении задержки в распространении сигнала

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

где  $R(\tau)$  — взаимная корреляция сигналов с выхода антенн.

Следовательно, чтобы сформировать двумерное изображение необходимо иметь минимум три антенны, расположенных не на одной линии.

Для наглядности рассмотрим случай, когда наша система приема состоит из четырех антенн, расположенных крест-накрест (горизонтальная пара антенн  $A_1$  и  $A_2$  и вертикальная пара  $A_3$  и  $A_4$ ).

Далее возникает вопрос, как именно объединять результаты, получаемые от всевозможных различных пар антенн в системе приема для построения итогового изображения.

Пусть  $R_{12}(\tau) = R_{12}(\tau(\varphi, \theta)) = R_{12}(\varphi, \theta)$  — корреляция для антенн  $A_1$  и  $A_2$ , а  $R_{34}(\tau) = R_{34}(\varphi, \theta)$  — корреляция для антенн  $A_3$  и  $A_4$ . Рассмотрим две точки на этих изображениях: одна соответствует положению источника излучения в пространстве ( $R_{12}(\varphi_{\text{и}}, \theta_{\text{и}})$ ), а другая — точке, где такого источника нет ( $R_0(\varphi_0, \theta_0)$ ) причем  $\theta_0 = \theta_{\text{и}}$ . Предположим, что боковые лепестки откликов равны нулю, т.е. рассмотрим наилучший случай с точки зрения минимума шумов на изображении. Пусть  $P$  — мощность поступающего от источника радиосвета сигнала. Тогда

$$\begin{aligned} R_{12}(\varphi_{\text{и}}, \theta_{\text{и}}) &= P, \\ R_{34}(\varphi_{\text{и}}, \theta_{\text{и}}) &= P, \\ R_{12}(\varphi_0, \theta_0) &= 0, \\ R_{34}(\varphi_0, \theta_0) &= P. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим два способа получения итогового отклика: вычисление среднего значения:  $R(\varphi, \theta) = \frac{1}{2}(R_{12}(\varphi, \theta) + R_{34}(\varphi, \theta))$  и среднего геометрического,  $R(\varphi, \theta) = \sqrt{(R_{12}(\varphi, \theta) R_{34}(\varphi, \theta))}$ . В обоих случаях в точке, где находится источник излучения, яркость будет равняться мощности поступающего излучения  $R_{12}(\varphi_{\text{и}}, \theta_{\text{и}}) = P$ , разница же будет выражаться в точке, где источники радиосвета отсутствуют. В первом случае яркость в этой точке составит  $R_0(\varphi_0, \theta_0) = \frac{P}{2}$ , что на 3 дБ меньше, чем в точке расположения источника излучения. Из этого следует, что по направлениям соответствующих пар сечений динамический диапазон не будет превышать 3 дБ. Иными словами, на изображении будет наблюдаться крест, центр которого будет соответствовать месту расположения источника излучения, а интенсивность боковых лучей будет лишь на 3 дБ слабее точки с источником излучения). Во втором случае для точки  $(\varphi_0, \theta_0)$ , где корреляция отсутствует, в результате перемножения уровень

яркости будет нулевым:  $R_0(\varphi_0, \theta_0) = 0$ , т.е. динамический диапазон системы в этом случае устремиться в бесконечность. Однако в реальном случае динамический диапазон системы приема будет ограничиваться боковыми лепестками корреляционной функции, уровень которых зависит от ширины полосы частот сигнала и формы полосы частот. Чем шире будет полоса частот, тем быстрее относительно углов  $\varphi, \theta$  будут спадать боковые лепестки. Несмотря на это ограничение, второй способ расчета итогового отклика выглядит предпочтительнее по причине отсутствия жесткого ограничения на динамический диапазон, и, как будет показано далее в работе, динамический диапазон системы построения изображений.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для того, чтобы перейти к созданию макета приемной системы радиосвета на основе корреляционного приема, сначала было необходимо провести предварительное моделирование такой системы приема, основная цель которого — определиться с оптимальным числом антенн на приеме, а также получить модельные изображения источников излучения.

Ранее в работе [13] была представлена математическая модель, позволяющая решить задачу получения одномерных откликов приемной системы на источники радиосвета на основе корреляционной обработки сигналов, получаемых от двух слаботепловых антенн. Эта модель была взята за основу и доработана для моделирования трехмерной конфигурации, которая показана на рис. 2.

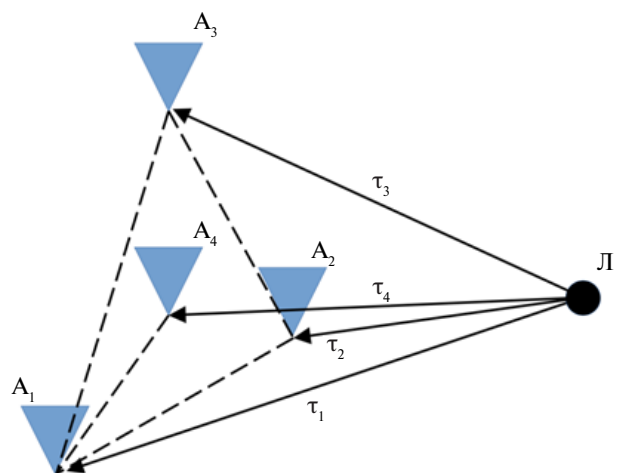


Рис. 2. Расположение антенн в системе приема: А — антенна, Л — лампа радиосвета,  $\tau$  — время распространения электромагнитного излучения.

Здесь представлен случай для четырех приемных антенн, который, как будет показано ниже, оказался оптимальным с точки зрения минимизации числа антенн при сохранении качества изображения. Антенны необходимо устанавливать таким образом, чтобы увеличивать суммарную информацию, принимаемую системой. Для системы с четырьмя антеннами использовалось следующее расположение антенн: три антенны расставлены на гранях правильного треугольника, а четвертая находится в его центре. Все антенны лежат в одной плоскости.

Схема, представленная на рис. 2, легла в основу разрабатываемой математической модели для программной среды MATLAB.

Остановимся подробнее на источнике СШП шумоподобного микроволнового источника радиосвета — лампе радиосвета. Так как основное используемое в дальнейшей обработке сигнала свойство радиосвета — непрерывность и равномерность спектра сигнала, а также широкая полоса, то для упрощения расчетов в модели в качестве хаотического сигнала лампы радиосвета было принято решение использовать генератор случайных чисел с нормальным распределением [14]. Для формирования сигнала в нужной полосе частот применяется полосовой фильтр, затем сигнал нормируется по мощности (рис. 3).

Лампы радиосвета, которые будут использоваться в экспериментах по построению изображений при помощи системы приема на основе корреляционной обработки, были ранее разработаны на базе СШП генератора хаотического сигнала [15] и работают в полосе 3...5 ГГц, поэтому для моделирования была выбрана полоса сигнала 2 ГГц.

Итак, в модели для каждой лампы радиосвета с номером  $n$  (диапазон номеров от 1 до  $N$ )

генерируется сигнал  $S_{Ln}$  в заданной полосе частот, копии которых суммируются для всех приемных антенн  $S_{AM}$  ( $M$  — номер антенны на приеме) с задержками, соответствующими их относительным положениям

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

В программе задаются значения для координат ламп радиосвета, а также приемных антенн коррелятора. Затем рассчитываются задержки при распространении сигнала от каждой лампы радиосвета до каждой принимающей антенны. Для их расчета пространство разбивается на воксели, и происходит расчет времен распространения сигнала от всех центров вокселей заданной области пространства до всех приемных антенн.

Затем производится корреляция сигналов для всех пар антенн для каждого заданного вокселя пространства. Для того, чтобы вычислительно эффективно формировать задержки между сигналами равные  $\tau_{\varphi, \theta}$  и произвести перемножение с усреднением, применяется теорема Парсеваля и свойство Фурье преобразования

$$s(t + \tau) \leftrightarrow S(\omega) \exp(-i\omega\tau). \quad (4)$$

Так для дискретного случая корреляция сигналов, поступающих с пары антенн  $i$  и  $j$  для заданной точки пространства, будет иметь вид

$$R_{ij}(\varphi, \theta) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} S_{Ai}(k) \overline{S_{Aj}(k + \tau_{\varphi, \theta})} = \frac{1}{K^2} \sum_{n=0}^{K-1} S_{Ai}(n) \overline{S_{Aj}(n)} \exp\left(i \frac{2\pi}{K} n \tau_{\varphi, \theta}\right), \quad (5)$$

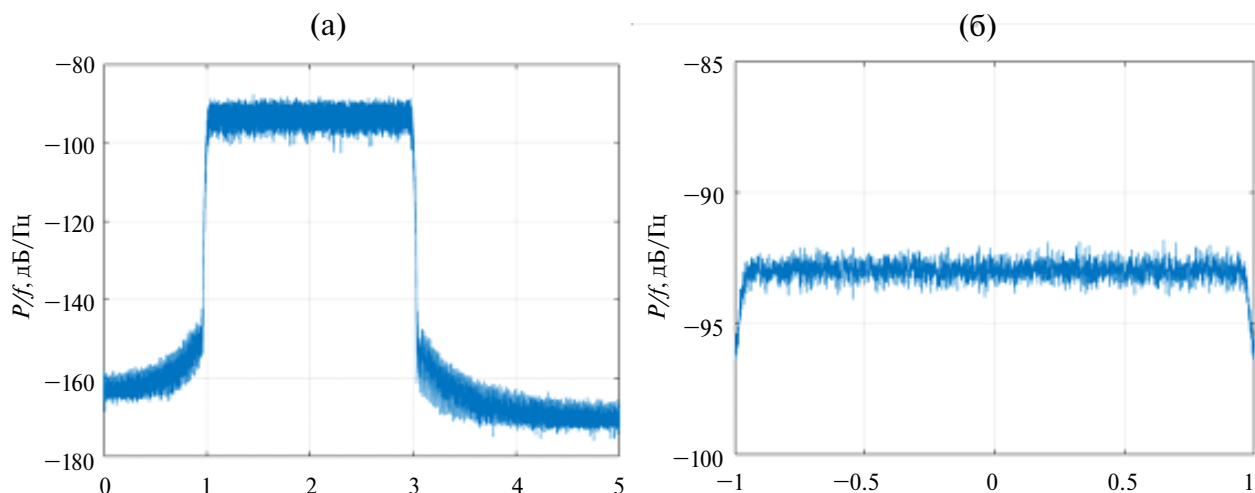


Рис. 3. Спектральная плотность мощности лампы радиосвета с полосой 2 ГГц: (а) — на несущей частоте; (б) — в аналитическом виде на нулевой частоте.



где  $K$  — уровень накопления сигнала,  $n$  — номер отсчета в Фурье пространстве, горизонтальная черта означает комплексное сопряжение.

Это действие производится для всех пар антенн. Затем рассчитывается итоговое значение для интенсивности в точке на изображении как среднее геометрическое значение от полученных откликов для всех пар антенн

$$I(\varphi, \theta) = \left( \prod_{i,j} R_{ij}(\varphi, \theta) \right)^{\frac{1}{P}}. \quad (6)$$

Наконец, разным значениям интенсивности ставились в соответствие различные цвета согласно шкале изменения цвета (она приводится на изображениях).

Согласно математической модели, приведенной выше, было проведено моделирование системы построения изображения, где расположение лампы радиосвета и приемных антенн соответствует схеме на рис. 2. Основные параметры модели следующие: ширина полосы источника излучения

равна 2 ГГц, длина стороны правильного треугольника, в вершинах которого расположены антенны,  $D = 1.5$  м, накопление сигнала  $K = 10^5$ . Расстояние между антенной источника излучения и плоскостью приемной системы равнялось 2.3 м. Значения углов  $\varphi, \theta$  менялись в диапазоне  $[-50^\circ, 50^\circ]$  для каждого угла с шагом  $0.25^\circ$ . Источник излучения располагался в точке с координатами  $(\varphi, \theta) = (0, 0)$ .

Рассмотрим, как влияет различное число антенн на итоговое изображение. Так на рис. 4 представлены итоговые изображения, полученные для 2, 3 и 4-х антенн в системе приема.

Из представленных результатов видно, что увеличение числа приемных антенн уменьшает неопределенность в системе за счет понижения уровня боковых лепестков в результирующем отклике. Ясно, что всего двух антенн недостаточно для определения местоположения источника в трехмерном пространстве, что видно на рис. 4а. В случае с тремя антеннами (рис. 4б) уже можно говорить об определении местоположения источника излучения,

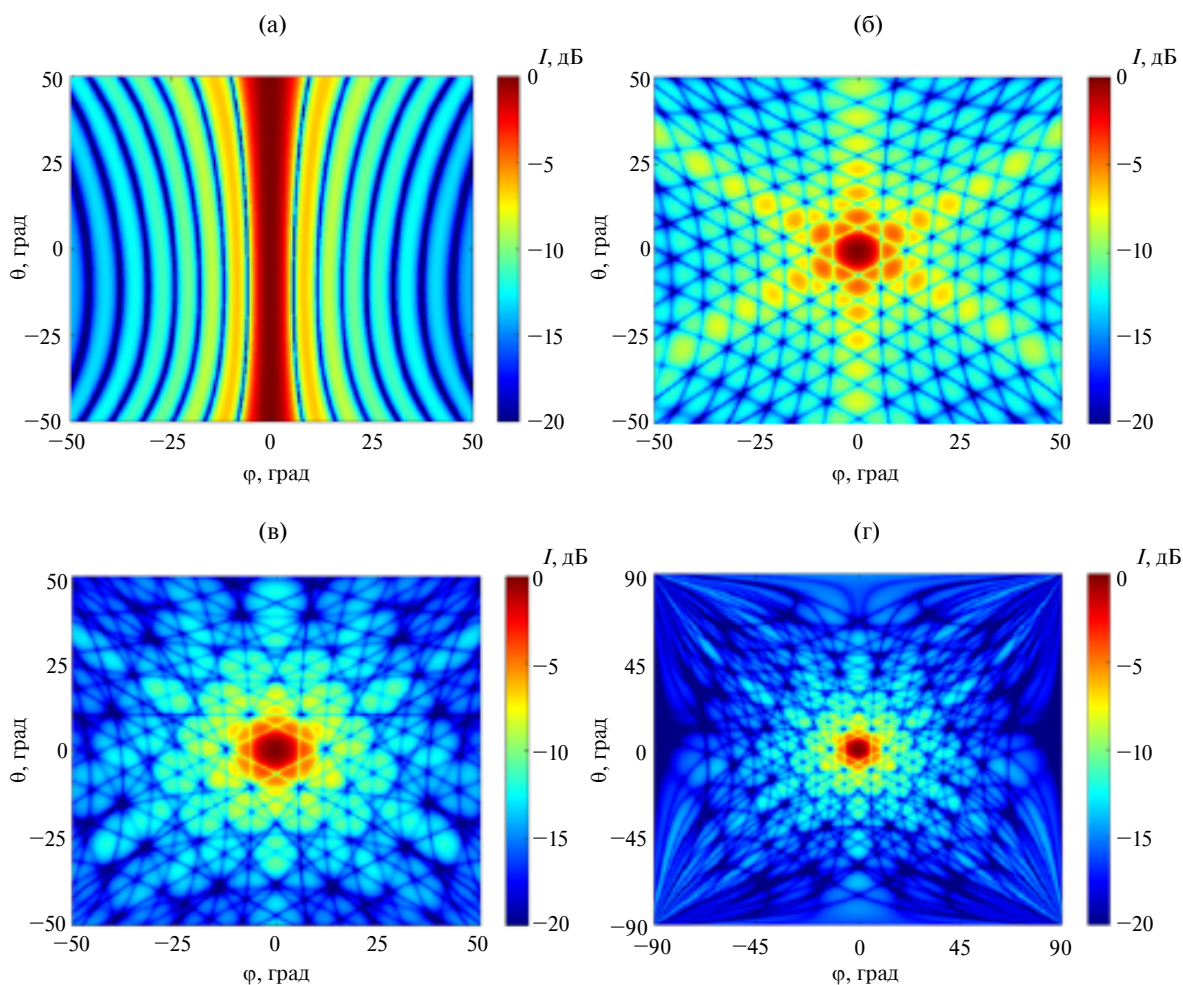


Рис. 4. Отклик корреляционного приемника радиосвета при использовании: двух антенн (а); трех антенн (б); четырех антенн (в); четырех антенн для расширенной области с углами  $\varphi, \theta$  в диапазоне  $[-90^\circ, 90^\circ]$  (г).

однако здесь все еще наблюдается побочный эффект от боковых лепестков итогового отклика, добавляющих неопределенности в изображение. Наконец, на рис. 4в, где приведен результат для построения итогового отклика системы для случая использования 4-х антенн, можно наблюдать расположение источника излучения без ярко выраженного влияния боковых лепестков. Также для наглядности на рис. 4г приведено изображение источника излучения для 4-х приемных антенн с расширенной областью построения углов ( $\varphi$ ,  $\theta$ ) в диапазоне  $[-90^\circ, 90^\circ]$ .

По результатам полученных изображений для различного числа антенн в приемной системе можно сделать вывод, что для того, чтобы, с одной стороны, минимизировать уровень боковых лепестков итоговой корреляционной функции, а с другой — минимизировать число антенн при создании реальной системы приема, было принято решение далее работать с 4 антеннами.

Было проведено моделирование построения изображений для двух источников радиосвета. Схема проведения модельного эксперимента соответствует схеме, приведенной на рис. 2 с той лишь разницей, что теперь источники излучения расположены в точках с координатами  $[-25^\circ, 0^\circ]$  и  $[0^\circ, 25^\circ]$ , т.е. лампы разнесены на 50 град. При этом мощность левого источника излучения оставалась постоянной, тогда как мощность правого источника ослабевала для того чтобы понять, при какой минимальной яркости второго источника все еще можно наблюдать два отдельных источника излучения на изображении.

При построении изображений важно минимизировать уровень боковых лепестков в автокорреляционной функции, так как это будет способствовать увеличению эффективного динамического диапазона системы приема. Этого можно добиться, например, за счет добавления весовых коэффициентов в частотной области изображения. Согласно теореме Виннера-Хинчина между корреляционной функцией и полосой частот сигнала есть взаимно-однозначное преобразование в виде преобразования Фурье, по этой причине, меняя форму сигнала в частотной области, можно добиться изменения корреляционной функции [16].

Так на рис. 5 приведены изображения источников излучения, полученные после дополнительной обработки с применением оконной функции Кайзера для изменения весовых коэффициентов в частотной области. На рис. 5а оба источника одинаковые, на рис. 5б один ослаблен на 4 дБ, на рис. 5в на 8 дБ и на рис. 5г на 12 дБ.

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 ее излучаемой мощности на 12 дБ относительно первой (рис. 5г).

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При проведении экспериментов по построению изображений источников СШП шумоподобного микроволнового излучения в качестве таких источников использовались лампы радиосвета (рис. 6), представленные в [13] и созданные на основе СШП хаотических генераторов [15].

Рабочий диапазон ламп радиосвета составляет 2.5...4.8 ГГц, а их интегральная мощность достигает 23 дБм. В лампе в качестве направленной антенны используется антенна Вивальди. Одно такое устройство подключалось к аттенюаторам для того, чтобы была возможность ослаблять уровень излучения, в то время как второе работало напрямую.

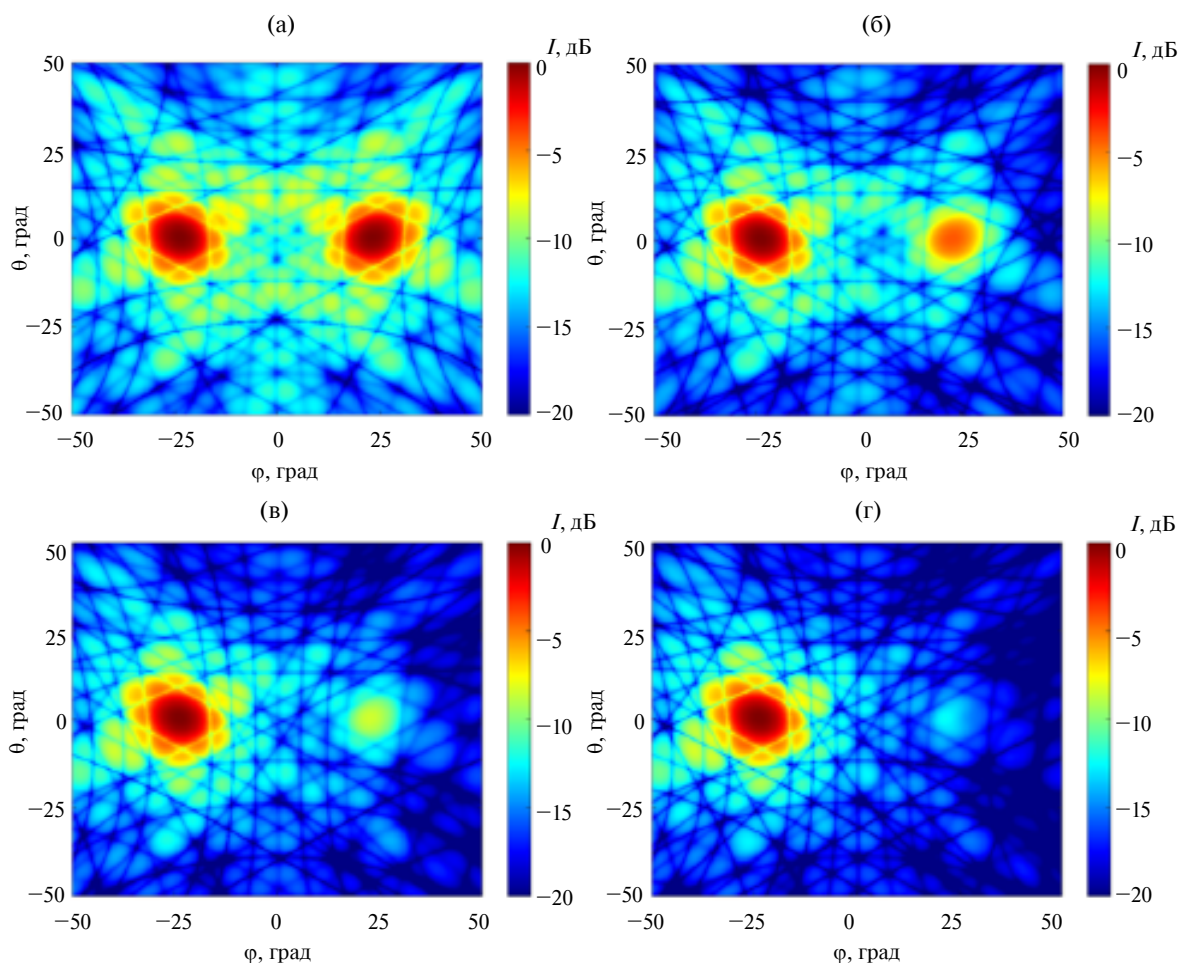
Был создан макет системы построения изображений в радиосвете на основе корреляционного приема. Его схема приведена на рис. 7, и, как было показано в предыдущей части настоящей работы, для него было решено применить четыре приемные антенны, в качестве которых использовались направленные антенны Вивальди.

Сигнал с выхода антенн попадает на малошумящий усилитель (МШУ) с коэффициентом усиления 20 дБ. Далее осуществляется перенос полосы принимаемого сигнала вниз на нулевую частоту при помощи пассивных смесителей (ПС) и генератора смещающей частоты (ГСЧ). Затем сигнал поступает на вход осциллографа Tektronix DPO 4054, который использован в данной экспериментальной установке для дискретизации сигнала с частотой 2.5 ГГц и квантованием 8 бит, после чего оцифрованный сигнал передавался на компьютер для финальной обработки, описание которой приведено в разделе, посвященном моделированию.

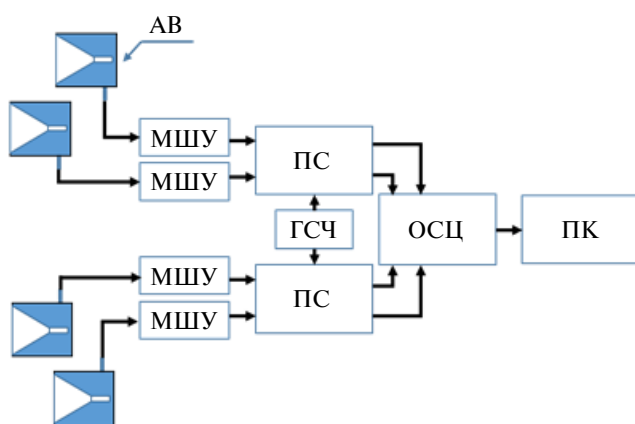
При проведении экспериментов приемные антенны были размещены в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2. Три антенны расположены в вершинах правильного треугольника, и одна — в его центре. Сторона треугольника, образованного антеннами,  $D = 1.5$  м. Общее фото экспериментальной установки приведен на рис. 8. Расстояние между экспериментальной установкой и источниками было 2.3 м, расстояние между лампами радиосвета 2.4 м, а их высота над уровнем пола составила 1.1 м.

В ходе проведения измерений уровень затухания излучаемого сигнала на одной из ламп радиосвета менялся в диапазоне от 0 до 15 дБ, в то время как мощность второго источника излучения была постоянной. На рис. 9 можно видеть примеры полученных изображений для случаев затухания на 0 дБ, 6 дБ, 12 дБ, а также для случая отсутствия второго источника излучения.

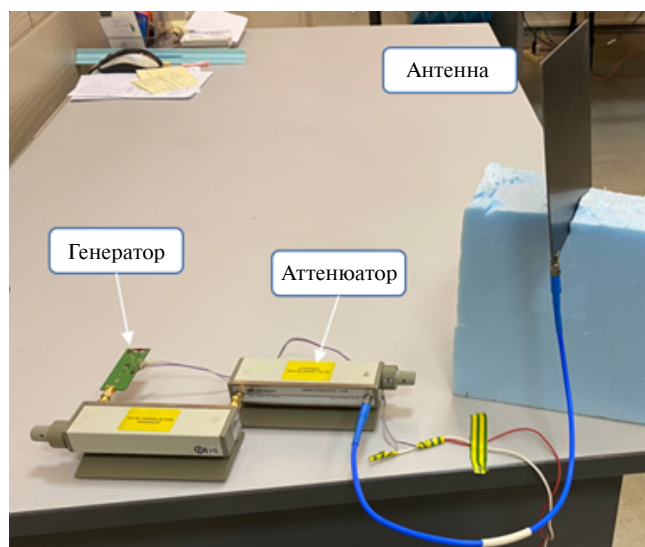
Данные изображения показывают, что мы можем четко различать два одинаково ярких источника излучения (рис. 9а). Кроме того, сравнивая



**Рис. 5.** Отклик приемной системы после применения оконной функции Кайзера на наличие двух ламп радиосвета при ослаблении сигнала правой лампы относительно левой на: (а) 0 дБ; (б) 4 дБ; (в) 8 дБ; (г) 12 дБ.

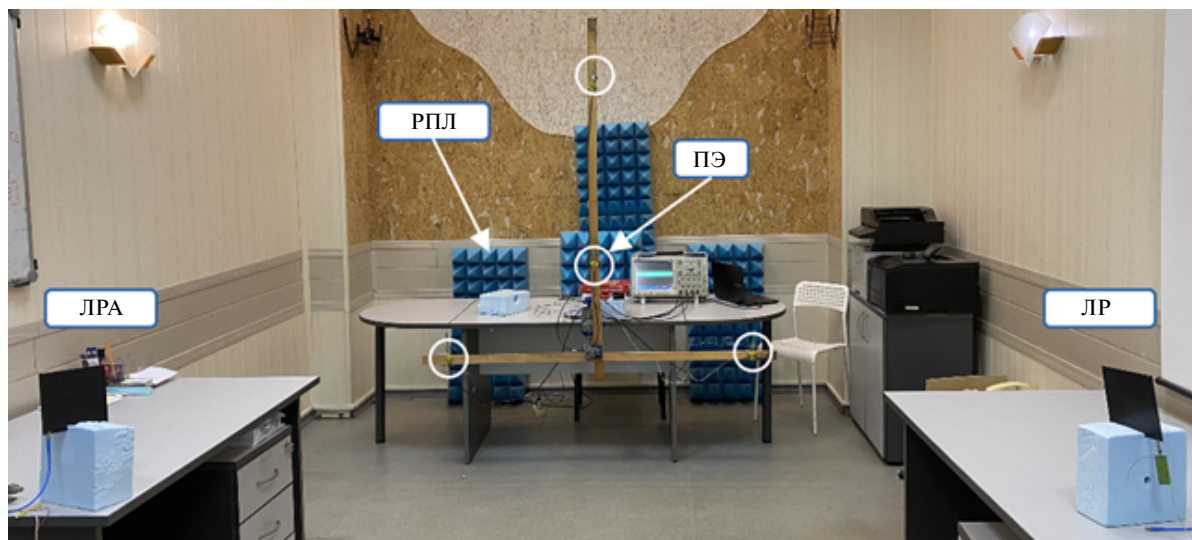


**Рис. 6.** Принципиальная схема корреляционного приемника радиосвета, используемая для получения двумерных изображений: ЛР – лампа радиосвета, АВ – антенна Вивальди, МШУ – маломощный усилитель, ПС – пассивный смеситель, ГСЧ – генератор смещающей частоты, ОСЦ – осциллограф, ПК – персональный компьютер.

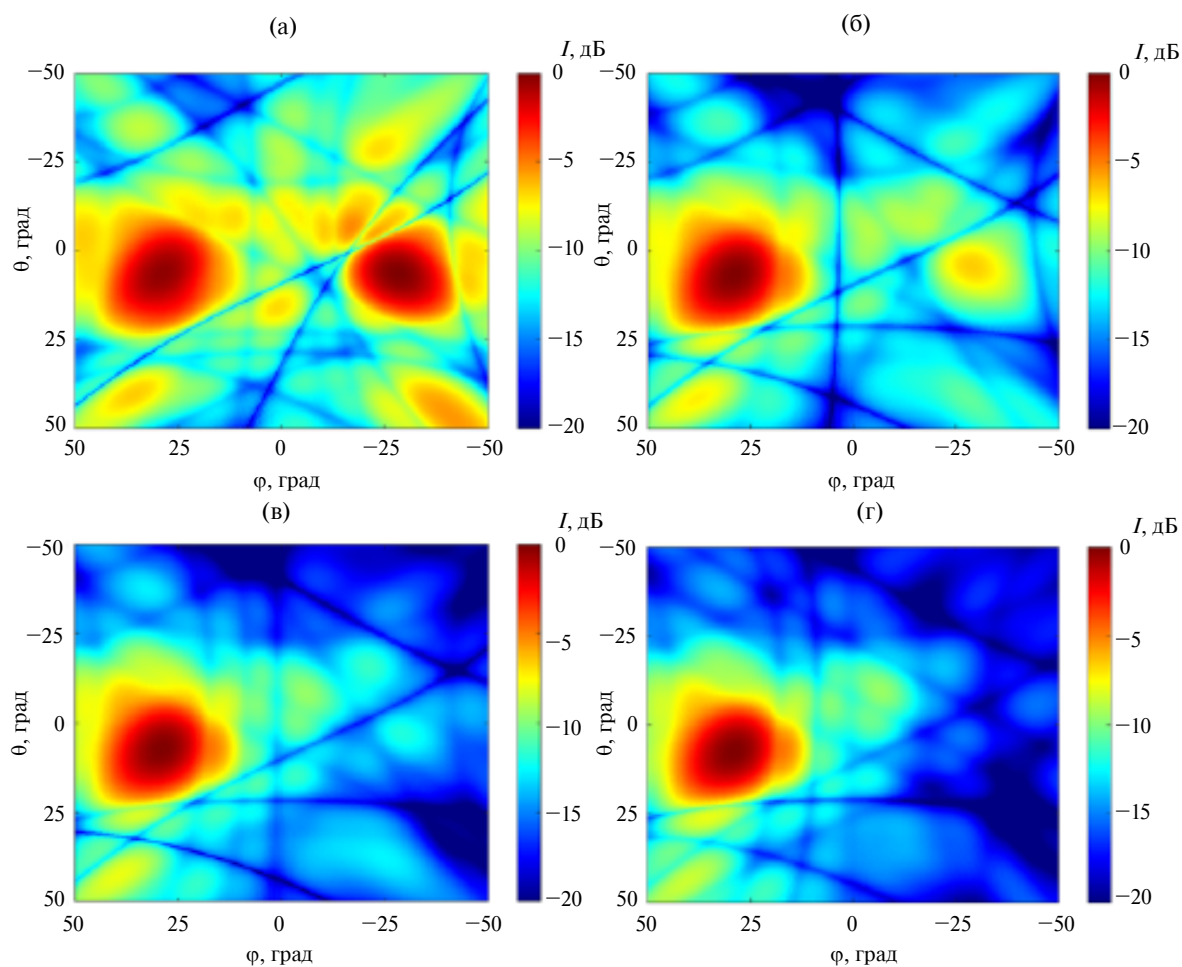


**Рис. 7.** Внешний вид лампы радиосвета, подключенной к аттенюаторам, которая включает в себя генератор и антенну Вивальди.





**Рис. 8.** Общий вид экспериментальной установки: РПЛ – радиопоглощающий лист; ЛР – лампа радиосвета; ЛРА – лампа радиосвета с аттенуатором, ПЭ – приемный элемент.



**Рис. 9.** Полученные изображения при проведении эксперимента с реальными лампами радиосвета при ослаблении сигнала правой лампы относительно левой на: 0 (а); 6 (б); 12 дБ (в); лампа-источник отсутствует (г).



рис. 9в и рис. 9г, можно наблюдать повышенный уровень интенсивности на изображении на месте расположения лампы радиосвета с уровнем затухания около 12 дБ относительно того же места на изображении для случая отсутствия второго источника излучения (рис. 9г). На основании этого факта можно сделать вывод, что предложенный макет системы построения изображений на основе корреляционного приема позволяет наблюдать на изображении объекты с разницей в уровне излучения до 12 дБ. В целом построенные изображения (рис. 9) согласуются с изображениями, полученными при моделировании (рис. 5), однако наблюдается повышенный уровень числа артефактов, вызванный скорее всего переотражением от поверхностей в помещении и ограничением полосы сигнала в осциллографе, сказывающемся в процессе оцифровывания сигнала.

Важно отметить, что скорость получения изображения по сути ограничивалась вычислительной мощностью процессора, на котором осуществлялась обработка принимаемых данных, и степенью оптимизации программного обеспечения. В проведенных экспериментах время получения изображения составляло порядка секунды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено решение задачи построения двумерных изображений в радиосвете при использовании метода корреляционного приема с пространственным разрешением. Предложена математическая модель для решения данной задачи. На основе этой модели были получены двумерные изображения источников радиосвета, а также результаты моделирования были использованы для создания реального макета приемника радиосвета. Показано, что предложенный макет системы построения изображений на основе корреляционного приема позволяет наблюдать на изображении объекты с разницей в уровне излучения до 12 дБ.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao M., Liu Y., Raghu A. et al. // 2019 Proc. IEEE/CVF Int. Conf. Computer Vision (ICCV). Seoul. 27 Oct.— 02 Nov. N.Y.: IEEE, 2019. P. 10112. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.01021>
2. Adib F., Hsu C.-Y., Mao H. et al. // ACM Trans. on Graphics. 2015. V. 34. № 6. Article No. 219. <https://doi.org/10.1145/2816795.2818072>
3. Pallaprolu A., Korany B., Mostofi Y. // 2023 Proc. IEEE Radar Conf. San Antonio. 01–05 May. N.Y.: IEEE, 2023. Paper No. 10149785 <https://doi.org/10.1109/RadarConf2351548.2023.10149785>
4. Korany B., Karanam C.R., Mostofi Y. // Proc. 2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Sheffield. 08–11 Jul. N.-Y.: IEEE, 2018. P. 134. <https://doi.org/10.1109/SAM.2018.8448565>
5. Karanam C.R., Mostofi Y. // Proc. 2017 16th ACM/IEEE Int. Conf. Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Pittsburgh. 18–21 Apr. N.Y.: IEEE, 2017. P. 131. <https://doi.org/10.1145/3055031.3055084>
6. Alidoustaghdam H., Dogu S., Akinci M.N., Cayoren M. // Proc. 2020 Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC). Hong Kong. 08–11 Dec. IEEE. 2020. P. 1054. <https://doi.org/10.1109/APMC47863.2020.9331597>
7. Cheng Q., Liu Y., Zhang H., Y. Hao // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2020 V. 19. № 5. P. 851. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2982147>
8. Ивашов С.В., Бугаев А.С. // РЭ. 2013. Т. 58. № 9. С. 935. <https://doi.org/10.7868/S0033849413090052>
9. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю., Ицков В.В. // РЭ. 2016. Т. 61. № 11. С. 1073. <https://doi.org/10.7868/S0033849416110024>
10. Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ицков В.В. и др. // РЭ. 2018. Т. 63. № 9. С. 947. <https://doi.org/10.1134/S0033849418090085>
11. Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М. и др. // РЭ. 2019. Т. 64. № 9. С. 916. <https://doi.org/10.1134/S0033849419080047>
12. Дмитриев А.С., Петросян М.М., Рыжов А.И. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 12. С. 38.
13. Петросян М.М., Рыжов А.И. // РЭ. 2023. Т. 68. № 9. С. 930. <https://doi.org/10.31857/S003384942309022X>
14. Дмитриев А.С., Рыжов А.И., Сьерра-Теран К.М. // Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31. № 4. С. 421. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003048>
15. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 24. С. 49. <https://doi.org/10.21883/pjtf.2016.24.44078.16439>
16. Романюк Ю.А. Основы обработки сигналов: Учеб. пособие. М.: МФТИ, 1989.

## CREATION OF 2D-IMAGING SYSTEM BASED ON RADIO LIGHT USING CORRELATION-BASED RECEPTION

© 2025 M. M. Petrosyan, A. I. Ryzhov\*

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS,  
Mokhovaya Str., 11, build. 7, Moscow, 125009 Russian Federation*

*\*E-mail: mef.box@gmail.com*

Received May 24, 2024; revised June 17, 2024; accepted June 24, 2024

The problem of creating a system for constructing two-dimensional images in radio light based on correlation reception is considered, where radio light is understood as ultra-wideband noise-like microwave radiation. A mathematical model was developed, with the help of which images of radio light lamps were obtained, also the modeling results were used to create a real layout of the receiving system. Experiments were carried out with a prototype system for constructing two-dimensional images in radio light using correlation-based reception, with the help of which images of two radio light sources with a difference in radiation level of 12 dB were obtained.

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