

**ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС  
В РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ**

УДК 621.391

**ИСКУССТВЕННОЕ РАДИООСВЕЩЕНИЕ  
В ЗАКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

© 2019 г. А. С. Дмитриев<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Ицков<sup>1,2</sup>, М. М. Петросян<sup>1,2</sup>, М. Г. Попов<sup>1</sup>, А. И. Рыжов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Российская Федерация, 141701 Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9*

\*E-mail: chaos@cplire.ru

Поступила в редакцию 13.03.2019 г.

После доработки 27.03.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Рассмотрена задача освещения предметов и поверхностей искусственными некогерентными источниками микроволнового излучения (лампы радиосвета на основе генераторов динамического хаоса) с целью их последующего наблюдения с помощью специальной приемной аппаратуры. Разработана схема и реализован экспериментальный макет приемника с пространственным разрешением для визуализации части окружающего пространства в искусственном радиосвете. Получены изображения помещения в радиосвете. Показана возможность фиксации на этих изображениях изменений, связанных с появлением новых предметов.

DOI: 10.1134/S0033849419080047

## ВВЕДЕНИЕ

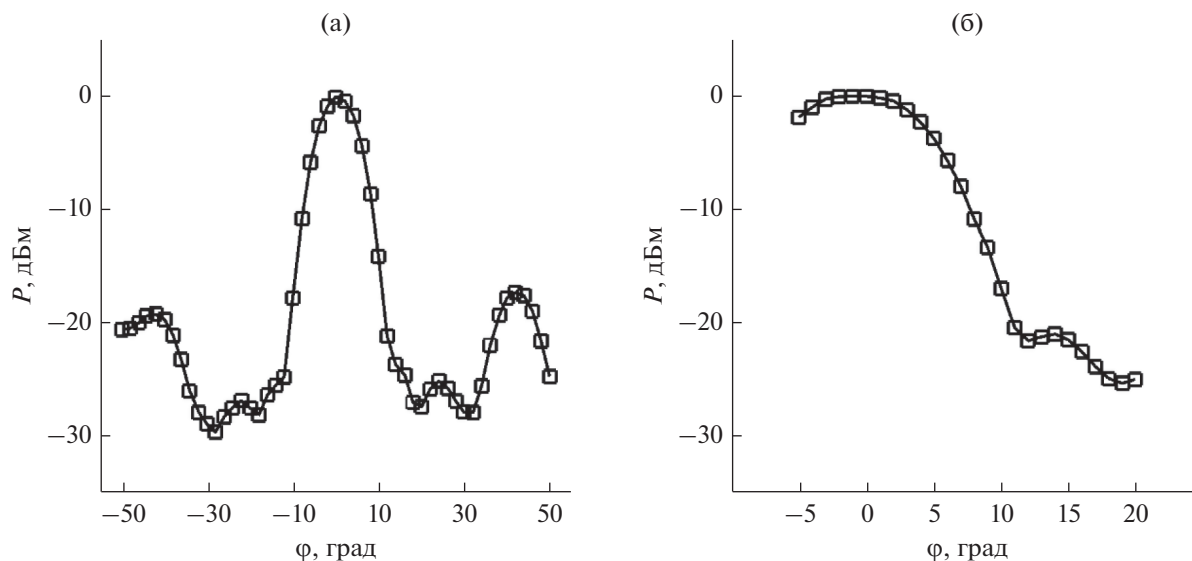
Исследованиями в области явлений, вызываемых токами высокой частоты, А.С. Попов начал заниматься с того времени, когда получили известность опыты известного физика Г. Герца с электрическими колебаниями (1888 г.). Они послужили практическим подтверждением работ М. Фарадея и Дж. Максвелла, в которых была установлена взаимосвязь между электрическими и световыми явлениями. Опытами Герца заинтересовались физики всего мира. Уже в 1889 г. А.С. Попов начал читать публичные лекции под названием “Новейшие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями”. Первая лекция была прочитана в собрании морских офицеров в Кронштадте и в ней впервые было указано на возможность использования электромагнитных волн для передачи сигналов на расстояние. Лекция вызвала столь бурный интерес, что Морской технический комитет возбудил ходатайство перед Морским министерством об организации выступления ученого перед более широкой публикой – в Морском музее в Петербурге.

С точки зрения темы данной статьи важно, что взаимосвязь между светом и радиоволнами была осознана Поповым за несколько лет до изобретения им надежно работающего возбудителя электромагнитных колебаний и радиоприемника. Од-

на из трех частей лекции называлась “Передача электрических колебаний в однородной непрозрачной среде – электрические лучи, поляризация, отражение и преломление электрических лучей”.

Под светом в узком смысле понимается электромагнитное излучение, видимое глазом (3500...7500 нм). Однако, как известно, существуют многочисленные виды “невидимого света”: как в сторону увеличения, так и уменьшения частот от зоны видимого излучения [1–3]. Характерной чертой электромагнитного излучения видимого света (например, солнечного) является его некогерентность и шумовой характер, что и позволяет глазу получать изображение окружающего мира без эффектов интерференции, присутствующих когерентному излучению. Некогерентность свойственна излучению тепловых источников и в других участках электромагнитного спектра, в том числе микроволнового и радиодиапазона. Такое излучение (“радиосвет”) от естественных источников плодотворно используется в радиометрии при исследовании космического пространства с помощью радиотелескопов, в радиометрических методах исследования поверхности Земли с космических аппаратов, в медицине и других областях [4–8].

В работах [9–11] были предложены компактные простые искусственные источники радиосвета



**Рис. 1.** Диаграммы направленности по мощности для параболической антенны с рупорным СШП-излучателем при измерении с лампой радиосвета (диапазон 3–5 ГГц) в качестве источника излучения: а) в горизонтальной плоскости, б) в вертикальной плоскости.

на основе динамического хаоса микроволнового диапазона. Разработки малогабаритных источников (генераторов) динамического хаоса микроволнового диапазона ведутся с начала 2000 годов, и к настоящему имеется теория и значительный опыт в создании подобных генераторов со спектром мощности в радио- и микроволновом диапазоне до частот 30 ГГц и выше [12]. Имея приборы такого типа, можно освещать отдельные области пространства и тем самым создавать предпосылки для наблюдения этих областей, включая и объекты, находящиеся в них.

Но создание источников радиосвета – только часть задачи. Нужны еще приборы для приема радиосвета и его конструктивного использования для получения информации об окружающем пространстве. Исследования в этом направлении привели к созданию ячейки приемника радиосвета [13, 14]. Появление таких приборов совместно с наличием компактных источников радиосвета позволило перейти к изучению радиосветовых полей в закрытых помещениях [15]. Данная статья посвящена исследованию изображения освещенности помещений при наличии нескольких источников радиосвета и анализу возможности обнаружения на этих изображениях изменений, связанных с появлением новых предметов.

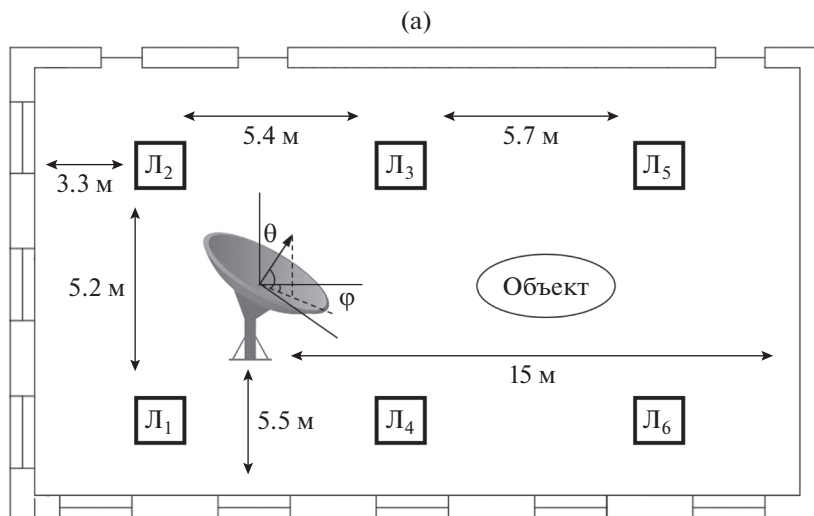
## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Экспериментальный комплекс, с помощью которого изучалось радиосвечение помещений, включал в себя: источники радиосвета на основе динамического хаоса с диапазоном излучения

3.0...5.0 ГГц и мощностью излучения 2 мВт каждый; чувствительный элемент приемника радиосвета [13, 14] и параболическую антенну с рупорным СШП-облучателем (2.0...7.0 ГГц) [16], вместе образующие приемник радиосвета с пространственным разрешением; персональный компьютер (ПК) с программным обеспечением (ПО) для приемника радиосвета.

Пространственную картину освещенной радиосветом области создавали путем сканирования луча антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для этого измеряли значения мощности приходящего сигнала на приемник в зависимости от угла поворота антенны в азимутальной плоскости (угол  $\varphi$ ) и в плоскости угла места (угол  $\theta$ ). Измерения производили для пар углов  $(\varphi_i, \theta_j)$  с шагом  $\Delta\varphi$  в азимутальной плоскости и с шагом  $\Delta\theta$  по углу места. Изображение строили на основе значений принятой мощности сигнала для всех пар углов  $(\varphi_i, \theta_j)$  из заданной прямоугольной области.

Предварительно были измерены характеристики параболической антенны с рупорным сверхширокополосным излучателем. Диаграммы направленности антенны по мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях для источника радиосвещения диапазона 3...5 ГГц, используемого в экспериментах, приведены на рис. 1. Ширина диаграммы направленности по мощности и уровню  $-3$  дБ составляет около  $10^\circ$ . Такая же ширина диаграммы направленности на этих частотах наблюдается и в вертикальной плоскости.



(б)



**Рис. 2.** Схема проведения экспериментов (а) и фото конференц-зала (б); Л<sub>1</sub>–Л<sub>6</sub> – лампы радиосвета, ПА – приемная антенна; расстояния указаны в метрах.

## 2. ИЗОБРАЖЕНИЕ ЗАЛА В РАДИОСВЕТЕ

Первые эксперименты были посвящены оценке освещенности конференц-зала (помещения) в радиосвете. Было установлено, что включение источника радиосвета приводит к увеличению средней освещенности зала примерно на 25...30 дБ по отношению к фоновому уровню.

После этого была проведена серия экспериментов по получению изображения зала при различном числе источников радиосвета. Прежде всего нужно было получить изображение зала без включенных ламп радиосвета, чтобы оценить вклад в освещенность неконтролируемых источников радиоизлучения (тепловое излучение, сотовые станции, WiFi роутеры и др.) и понять, насколько эти источники будут влиять на последующие эксперименты с включенными лампами радиосвета и какая степень пространственной освещенности обеспечивается включенными источниками радиосвета.

На рис. 2 представлено фото конференц-зала и размещение оборудования при проведении измерений: приемное устройство, лампы радиосвета (6 шт), размещенные в стандартных патронах осветительных люстр (по одной лампе радиосвета на люстре) и объекты для исследования. Приемное устройство с направленной антенной при проведении большинства экспериментов было размещено в противоположной от сцены части зала. Приемная антенна была расположена в 15 м от дальней стены зала и в 5.5 м от одной из боковых стен. Источники радиосвета включали или группами (по два и три устройства), или все одновременно.

Для получения изображения в радиосвете производилось сканирование луча антенны в горизонтальной плоскости с шагом  $2^\circ$  и в вертикальной плоскости с шагом в  $2.5^\circ$ . В результате, если, например, сканирование производилось в секторе углов по горизонтали  $\pm 50^\circ$  и по вертикали  $\pm 10^\circ$ , изображение имело 867 элементов.

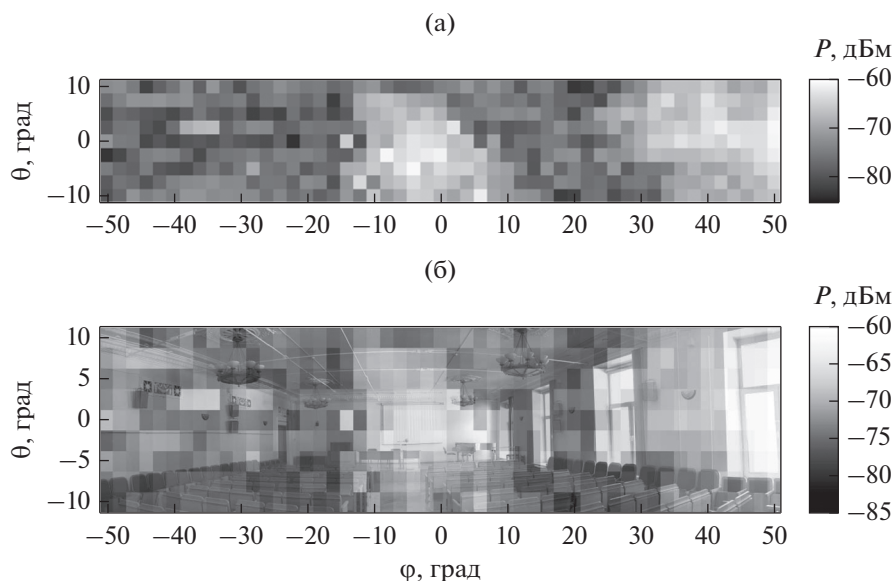


Рис. 3. Изображение зала в радиодиапазоне без освещения лампами радиосвета (а), наложение радиоизображения на фотографию (б).

Изображение зала при выключенных лампах радиосвета, полученное путем описанного сканирования, приведено на рис. 3а. Его анализ показал, что уровень принимаемого сигнала колеблется от  $-85$  до  $-65$  дБм. При этом наблюдается достаточно большая неравномерность фона по направлению. Наибольшая интенсивность наблюдается в области расположения окон и в середине зала: четко видны два ярко выраженных пятна. Пятно с правой стороны можно объяснить внешними источниками, излучение которых попадает на антенну через окна (рис. 3б). Самый яркий элемент на рис. 3а соответствует мощности  $-60$  дБм, самый темный  $-83$  дБм, среднее значение по изображению  $-73$  дБм.

Далее зал осветили шестью источниками радиосвета, расположенными в люстрах на высоте примерно 3 м от пола. На рис. 4а показано изображение зала, полученное в этом случае при измерении приемником с направленной антенной интенсивности принимаемого излучения в диапазоне углов  $-50^\circ \dots +50^\circ$  с шагом  $2^\circ$  по азимуту, и  $-10^\circ$  по  $+15^\circ$  с шагом  $2.5^\circ$  по углу места.

На рис. 4а отчетливо видны изображения четырех ламп радиосвета, находящихся перед антенной. Это подтверждает наложение изображения в радиосвете на фотоизображение рис. 4б.

На рис. 4 также видно, что лампы радиосвета создали световые “облака” вокруг люстр, обусловленные сложной рассеивающей геометрией люстр. Мощность, отображаемая в пикселях рисунка, варьируется от  $-18$  до  $-35$  дБм от центра до границы “облаков”, создаваемых лампами радиосвета. В остальных точках изображения интенсивность освещения оказалась достаточно равномерной и варьировалась в диапазоне  $-40 \dots -38$  дБм.

Важным моментом является то, что при включенных лампах освещенность вырастает в среднем более чем на 30 дБ по отношению к фоновому уровню, и можно с уверенностью говорить о том, что помещение достаточно ярко освещено радиосветом. При этом вне окрестности люстр в зале обеспечено достаточно равномерное освещение. Это позволяет перейти к экспериментам по исследованию характеристик радиоизображений объектов с разными электромагнитными свойствами.

### 3. ИЗОБРАЖЕНИЯ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ

При выборе объектов исследования обращалось внимание на их размер (он должен был быть не менее полуметра) и электромагнитные свойства. В соответствии со вторым критерием были выбраны: куб, покрытый металлической фольгой (в двух вариантах, см. ниже); кювета с водой (диэлектрическая проницаемость 81, коэффициент преломления 9) листы из радиопоглощающего материала.

*Первая группа экспериментов.* Первые эксперименты проводили, чтобы выяснить, как помехается освещенность при появлении металлического куба. Изображение было получено в диапазоне углов  $\varphi = -10^\circ \dots +10^\circ$  с шагом  $2^\circ$  по азимуту, и углов  $\theta = -10^\circ \dots +5^\circ$  с шагом  $2.5^\circ$  по углу места.

Куб был расположен на расстоянии  $d$  перед антенной, передняя грань куба выставлялась перпендикулярно направлению на антенну. Эксперименты проводили для расстояний  $d = 2, 4$  и  $5$  м. На рис. 5 приведены изображения, полученные в эксперименте, когда расстояние между приемни-

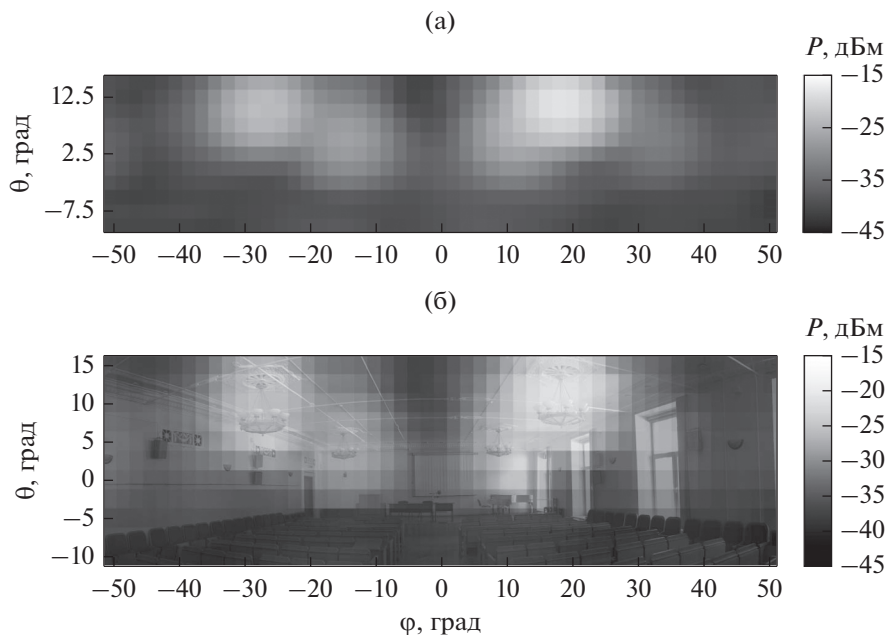


Рис. 4. Изображение зала, освещенного лампами радиосвета (а); наложение радиоизображения на фотографию (б).

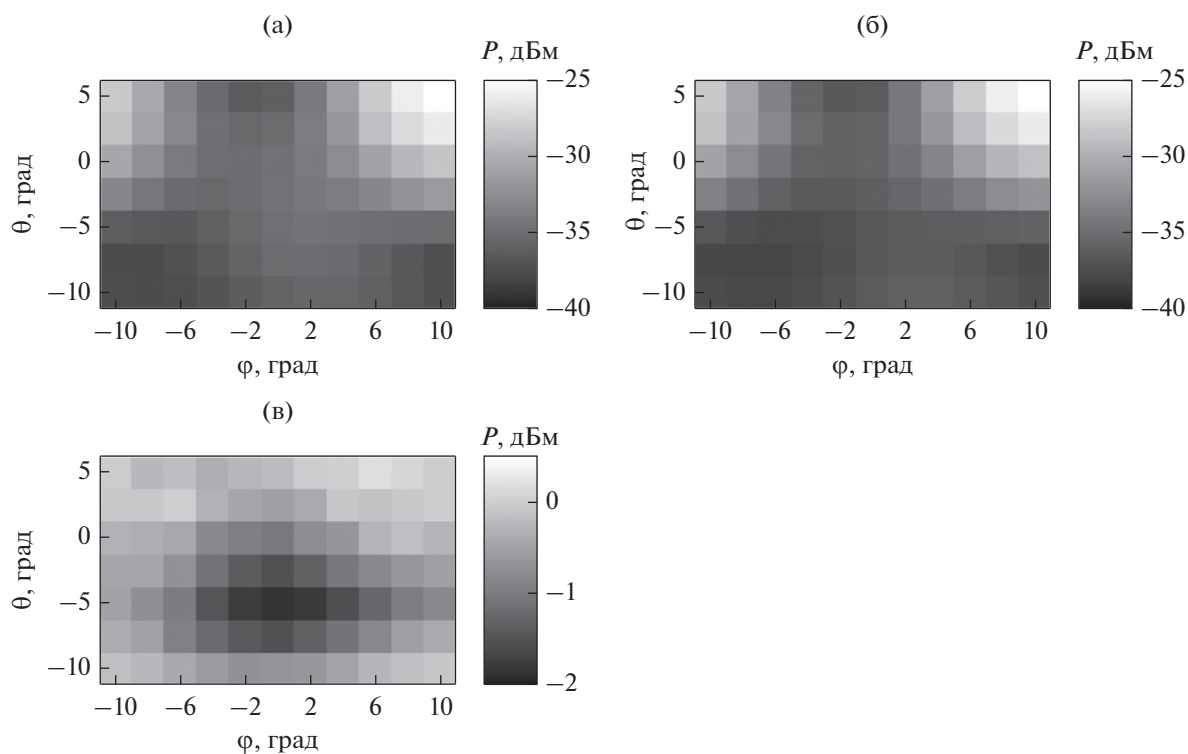
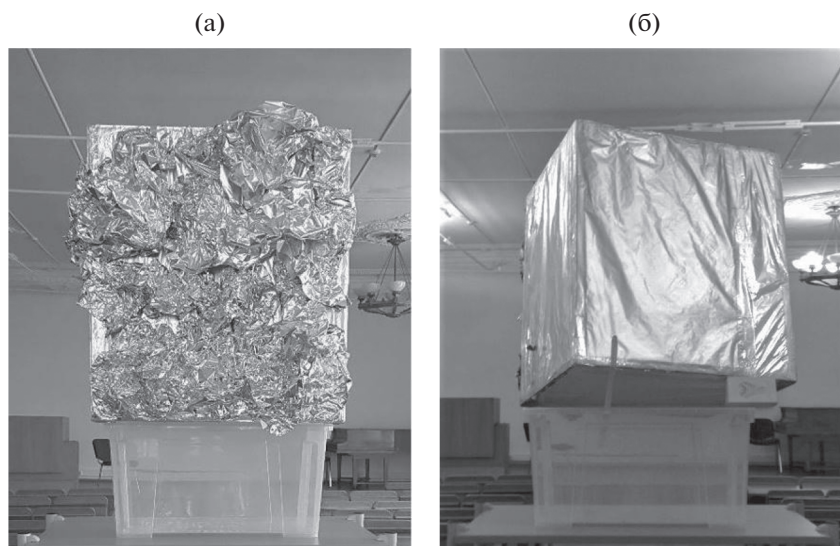


Рис. 5. Получение изображения куба: а) фоновое изображение при включенных лампах и отсутствии объекта; б) изображение в присутствии куба при его расположении перед антенной на расстоянии 5 м; в) разностное изображение.

ком и кубом было равно 5 м: фоновое изображение при шести включенных лампах и отсутствии куба (рис. 5а) и при включенных лампах в присутствии куба (рис. 5б). При сравнении рис. 5а и 5б видно некоторое различие, однако идентификация появления на изображении нового предмета

затруднительна. Зато его наличие четко прослеживается на разностном изображении (рис. 5в), полученном при построении разностного изображения при помощи вычитания изображения на рис. 5а из изображения на рис. 5б. При этом динамический диапазон разностного изображения



**Рис. 6.** Эксперименты с усиливающими объектами: а) куб с шероховатой поверхностью; б) куб с зеркальной поверхностью для отражения луча от передней грани в направлении антенны.

(контраст) составляет около 2 дБм. Область с кубом ослабляет сигнал по сравнению с фоновым изображением.

В верхних углах рис. 5 отчетливо видны яркие области, соответствующие источникам радиосвета. Их наличие “засвечивает” остальные участки изображения и мешает их визуализации. Для того чтобы избежать этого негативного эффекта, в последующих экспериментах были отключены четыре лампы радиосвета передней части зала (лампы ЛЗ–Л6 на рис. 2а).

Как отмечено выше, интенсивность излучения в присутствии куба ниже, чем в его отсутствие. Это может быть связано с тем, что прямые лучи, падающие на его переднюю панель от двух источников отражаются от панели зеркально и далее распространяются по направлениям, отличным от направления на антенну приемника.

Если это предположение верно, то куб будет являться источником усиленного сигнала на входе приемника в двух случаях: 1) грань куба представляет собой “шероховатую” поверхность, диффузно отражающую падающие на нее лучи; 2) куб расположен так, что угол падения излучения от источника радиосвета на поверхность куба равен углу между направлением максимума диаграммы антенны и нормалью к поверхности куба. Для реализации обоих случаев были проведены соответствующие эксперименты.

При проведении первого эксперимента на поверхности куба были созданы нерегулярные шероховатости с характерными размерами порядка средней длины волны радиосвета (рис. 6а).

Результаты экспериментов с кубом, имеющим шероховатую поверхность, показаны на рис. 7. Изображение построено в диапазоне уг-

лов  $\varphi = -14^\circ \dots +14^\circ$  с шагом  $2^\circ$  по азимуту, и  $\theta = -10^\circ \dots +10^\circ$  с шагом  $2^\circ$  по углу места.

Эксперименты показали, что добавка рассеянного излучения от поверхности куба оказалась достаточной, чтобы обнаружить присутствие куба на рис. 7б относительно фона на рис. 7а даже без дополнительной обработки. На изображении, приведенном на рис. 7в, появление куба увеличило сигнал на выходе приемника по отношению к фоновому на 2...5 дБ. Светлое пятно на верхней части рис. 7в объясняется тем, что отключение четырех ламп ЛЗ–Л6 (см. рис. 2а) для исключения “засветки” приемника прямыми лучами от ламп способствовало снижению равномерности освещения в дальней области зала.

При проведении второго эксперимента куб был расположен так, чтобы в принимающую антенну попадал луч, отраженный от одной из двух ламп радиосвета (см. рис. 6б). Расстояние от куба до антенны составляло 2 м.

Изображения на рис. 8 получены в диапазоне углов от  $-24^\circ$  до  $+24^\circ$  с шагом  $2^\circ$  по азимуту, и от  $-10^\circ$  до  $+20^\circ$  с шагом  $2.5^\circ$  по углу места.

Как и в случае с рассеянным лучом, отраженный луч дал достаточную добавку на входе приемника для того, чтобы обнаружить объект без построения разностных картин (рис. 8б). Отраженное излучение увеличило уровень сигнала на выходе приемника на 5...20 дБ (рис. 8в). Увеличение мощности принимаемого сигнала в этом случае значительно превосходило добавку от рассеянных лучей в предыдущем эксперименте. Кроме того, следует отметить, что высокий уровень излучения, отраженного от куба, приводит к уменьшению влияния неравномерности освещенности на разностную картину (см. рис. 8в).

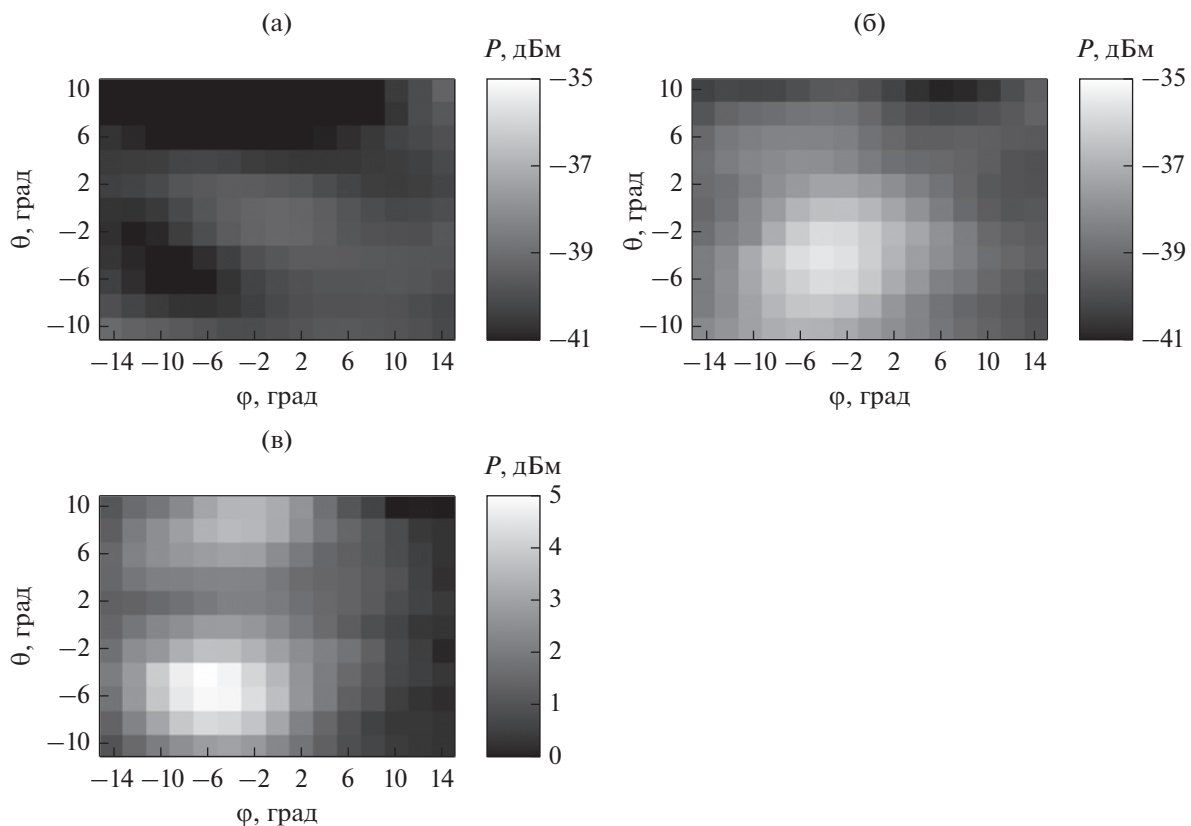


Рис. 7. Куб с шероховатой поверхностью: а) фоновое изображение от ламп; б) изображение куба с шероховатой поверхностью в радиосвете при его расположении перед антенной на расстоянии 2 м; в) разностное изображение.

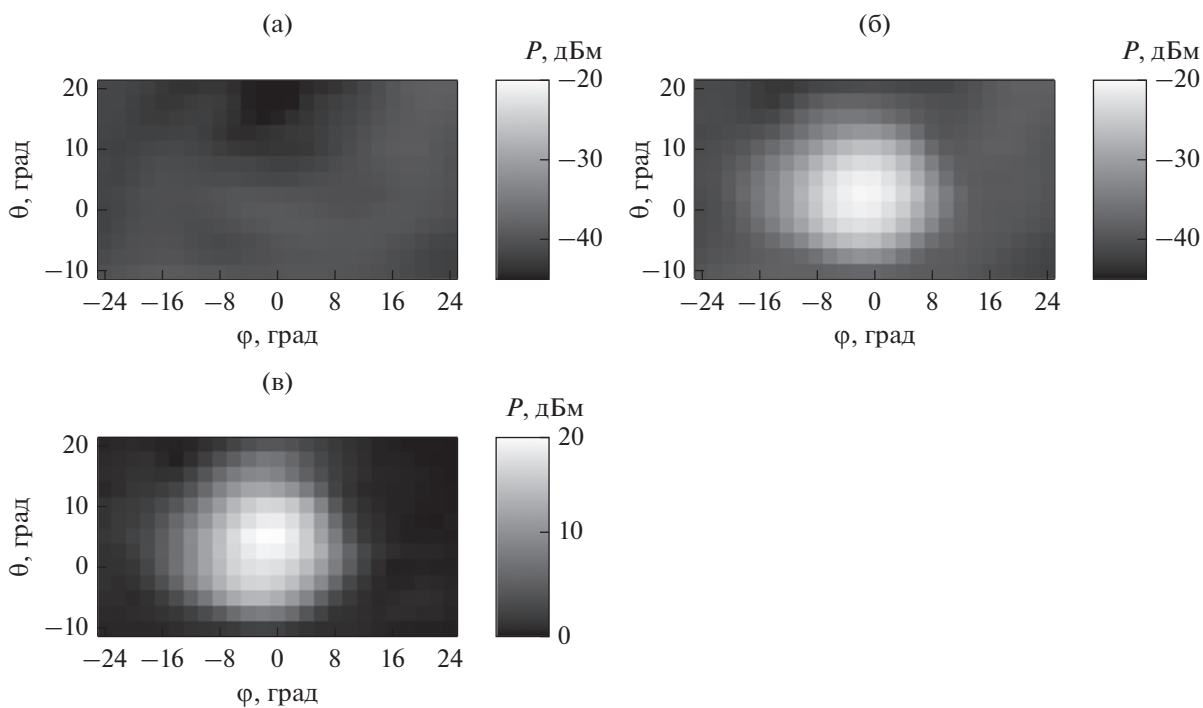


Рис. 8. Куб с зеркальной поверхностью: а) фоновое изображение от ламп; б) изображение куба в радиосвете при его расположении, соответствующем максимальному отражению сигнала от одной из ламп; в) разностное изображение.

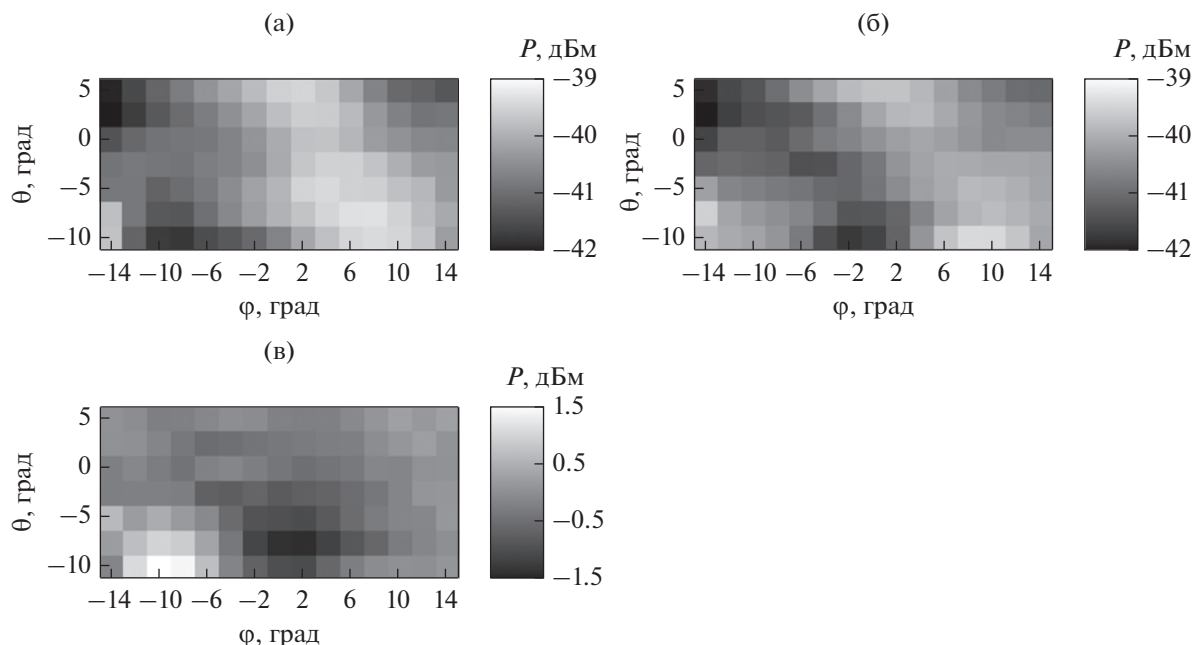


Рис. 9. Изображения кюветы с водой в радиосвете: а) фоновое изображение (кювета отсутствует), б) изображение с кюветой, в) разностное изображение.

*Вторая группа экспериментов.* Для выяснения возможности наблюдения в радиосвете объектов из диэлектрика и поглощающих материалов использовались кювета с водой и листы из радиопоглощающего материала.

Кювету, наполненную водой, располагали на расстоянии 2 м от принимающей антенны. Объект исследования не являлся отражающим и обладал высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 81$ . Антенна была дополнительно наклонена вперед так, что угловые размеры кюветы составили по углу  $\varphi$  от  $-10^\circ$  до  $+8^\circ$ , и по углу  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $-10^\circ$ .

Уровень принимаемого излучения с направлением размещения кюветы оказался ниже, чем при ее отсутствии. Динамический диапазон разностного сигнала (контрастность) составил около 3 дБ (рис. 9). Наличие кюветы с водой фиксируется только на разностном изображении.

Далее был проведен эксперимент с тремя квадратными листами поглощающего покрытия, расположенными на расстоянии 2 м от принимающей антенны вдоль горизонтальной линии. Угловые размеры объекта составили: по углу  $\varphi$  от  $-20^\circ$  до  $+20^\circ$ , и по углу  $\theta$  от  $-6^\circ$  до  $+5^\circ$ .

Как и в случае кюветы с водой, уровень принимаемого излучения с направления размещения объекта оказался ниже, чем при его отсутствии. Контрастность полученного изображения в этом случае оказалась сопоставимой с контрастностью разностного изображения для кюветы с водой, около 3 дБ.

*Третья группа экспериментов.* Для выяснения возможности наблюдения в радиосвете различ-

ных объектов за препятствиями (например, стенами зданий) были проведены эксперименты по получению изображений объектов, располагавшихся за стеной относительно приемника.

В экспериментах принимающая антенна (рис. 10) была расположена в конференц-зале на расстоянии 1 м от стены, смежной с коридором, а наблюдаемый объект (О) находился с противоположной стороны стены, в коридоре, на расстоянии 2 м и там же находилась лампа радиосвета (Л) на уровне пола, в то время как объект — на высоте около 1.5 м от пола. Это было сделано для того, чтобы иметь возможность осветить исследуемый объект и при этом не засвечивать приемную антенну прямым лучом от лампы.

В работах [14, 15] было установлено, что при распространении хаотического СШП-сигнала через такую стену имеется дополнительное затухание сигнала в 6...8 дБ.

В качестве объекта эксперимента по получению изображения объекта, находящегося за стеной, был выбран куб с диффузно отражающей поверхностью, для которого в предыдущих экспериментах была установлена высокая степень контрастности изображения относительно фона.

Все изображения, получаемые в ходе экспериментов, строились в диапазоне углов  $\varphi$  от  $-30^\circ$  до  $+30^\circ$  и углов  $\theta$  от  $-10^\circ$  до  $+10^\circ$ .

Сначала было получено изображение фонового излучения в коридоре (место расположения объекта) с включенной лампой радиосвета (рис. 11а).

Уровень фонового излучения здесь составил около  $-53$ ... $-60$  дБм, в то время как аналогичное



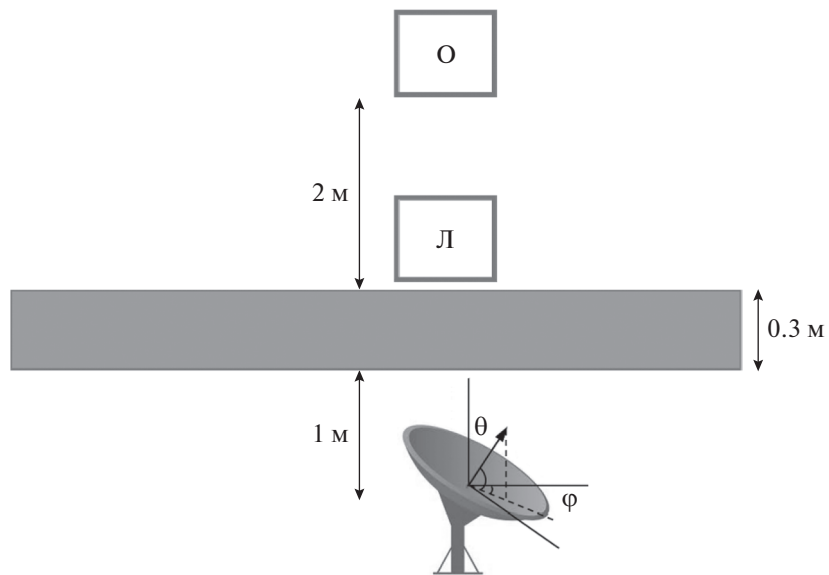


Рис. 10. Схема проведения эксперимента по получению изображения куба в радиосвете за стеной: О – объект (куб с металлической фольгой), Л – лампа радиосвета.

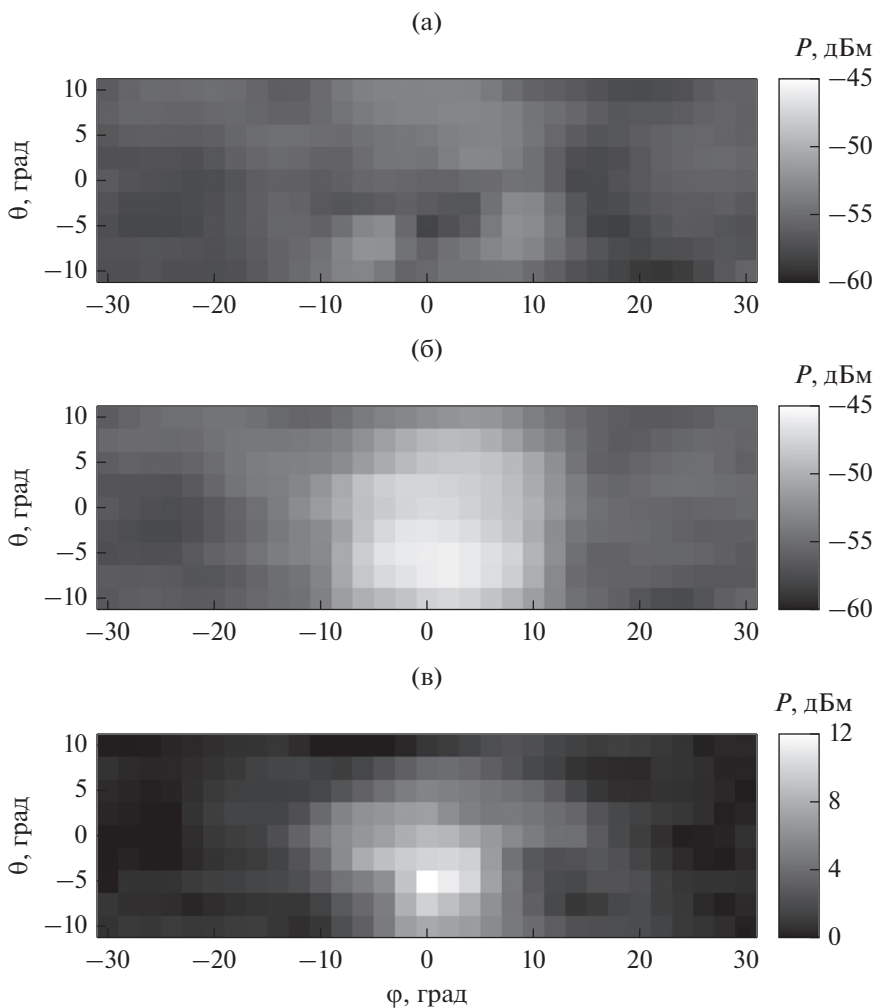


Рис. 11. Фоновое изображение коридора в радиосвете (а), изображение куба за стеной в радиосвете (б), разностное изображение для эксперимента с расположением куба за стеной (в).

измерение фонового излучения в конференц-зале составило  $-38...-40$  дБм.

Далее было получено изображение куба (рис. 11б). На изображении отчетливо видны границы куба. Динамический диапазон яркости пикселей на изображения  $\sim 15$  дБ. Сравнивая эту картину с изображением на рис. 11а, видим усиление принимаемого сигнала в области нахождения куба на  $10-12$  дБ. Для наглядности на рис. 11в приведено разностное изображение.

Сравнение изображения куба за стенкой и в зале показывает, что контрасты изображений между областью куба и прилегающей непосредственно к нему областью на обоих изображениях примерно одинаковы и составляют  $6...8$  дБ, не смотря на разницу в средней освещенности сцен в зале и при наличии стены примерно на  $10$  дБ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Создание экспериментальных образцов чувствительных элементов для приемников радиосвета с использованием радиометрических принципов и логарифмических детекторов показало возможность регистрировать источники некогерентного микроволнового излучения с интегральной выходной мощностью и  $\sim 2$  мВт на расстоянии более  $100$  м [13]. Компактность и простота этих чувствительных элементов (масса устройства  $\sim 10$  г) позволяют использовать его как самостоятельно, например, в датчиках движения в отсутствии прямой видимости, так и для создания направленных устройств, в том числе многоэлементных, обеспечивающих пространственное разрешения при наблюдении за окружающей средой.

В данной работе предложена и апробирована методика получения изображения окружающего пространства при освещении его некогерентным микроволновым излучением от лампы радиосвета,

и использовании приемника радиосвета на основе чувствительного элемента совместно с узконаправленной антенной. Проведенные эксперименты позволили получить изображение интересующей области в микроволновом радиодиапазоне частот, а также обнаружить появление новых объектов в наблюдаемой области.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тайсон Н.Д.* Астрофизика с космической скоростью. М.: Изд. АСТ, 2018.
2. *Спирidonov О.П.* Свет. Физика. Информация. Жизнь. М.: Ленанд, 2015.
3. *Polivka J., Fiala P., Machac J.* // Progress in Electromagnetics Research. 2011. V. 111. P. 311.
4. *Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986.
5. *Armand N.A., Polyakov V.M.* Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment. Boca Raton: CRC Press, 2005.
6. *Шарков Е.А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т 1. М.: ИКИ РАН, 2014.
7. *Гуляев Ю.В., Годик Э.Э.* // Вестн. АН СССР. 1983. № 8. С. 118.
8. *Гуляев Ю.В.* Физические поля и излучения человека. Новые неинвазивные методы медицинской диагностики. М.: РБОФ "Знание" им. С. И. Вавилова, 2009.
9. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю., Ицков В.В.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 11. С. 1.
10. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 24. С. 49–57.
11. *Dmitriev A.S., Efremova E.V.* // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2017. V. 20. № 2. P. 133.
12. *Ефремова Е.В.* // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 9. С. 26.
13. *Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Лазарев В.А. и др.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 8. С. 765.
14. *Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ицков В.В. и др.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 9. С. 7.
15. *Дмитриев А.С., Ицков В.В., Попов М.Г. и др.* // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7. № 1(27). С. 80–90.
16. *Калиничев В.И., Калошин В.А., Пангонис Л.И.* // Труды III Всерос. конф. "Радиолокация и радиосвязь". М., 2009. С. 101.