

## Получение изображений на основе искусственного радиоосвещения

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, 125009, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия  
E-mail: [chaos@cplire.ru](mailto:chaos@cplire.ru)

*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.*

*The problem of illumination of objects and surfaces by artificial incoherent sources of microwave radiation for the purpose of their subsequent observation by special receiving equipment is considered. Radiolight lamps based on dynamical chaos generators are used as source of incoherent broadband microwave radiation. The question of creating a microwave receiver with spatial resolution for radio light is studied as well. The proposed sensing element for such a receiver combines the properties of the power receiver and radiometer. A scheme of proposed sensing element is developed and an experimental model of the receiver with spatial resolution is implemented to visualize a part of the surrounding space in the artificial radio light. Images of the room in the radio light were obtained. The possibility of detecting changes in these images due to the appearance of new objects is shown.*

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, присущих 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].

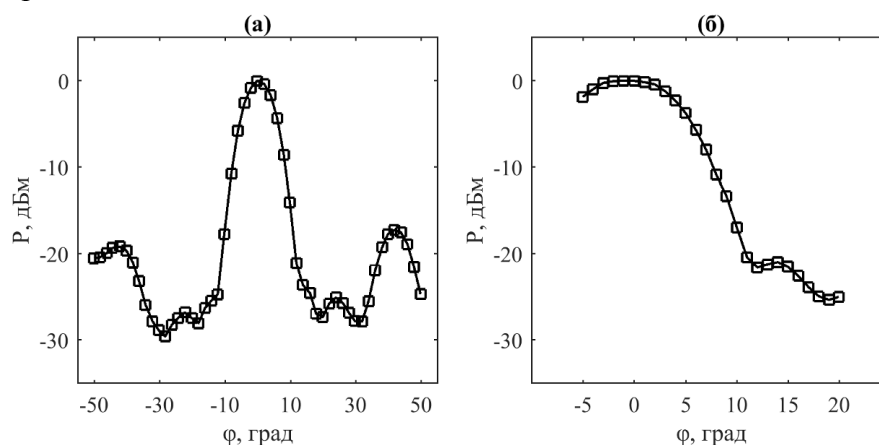
В работах [9-11] были предложены компактные простые искусственные источники радиосвета на основе динамического хаоса микроволнового диапазона. Разработки малогабаритных источников (генераторов) динамического хаоса микроволнового диапазона ведутся с начала 2000 годов, и к настоящему имеется теория и значительный 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.

Экспериментальный комплекс, с помощью которого изучалось радиоосвещение 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 приёмник 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.

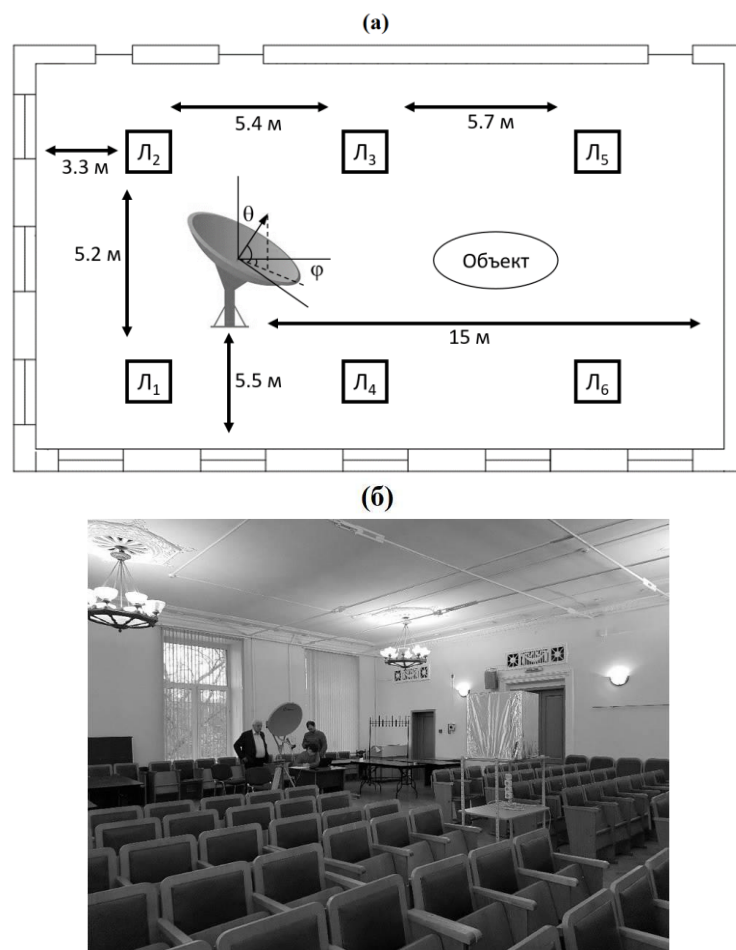
Диаграммы направленности антенны по мощности в горизонтальной плоскости для граничных частот источника радиоосвещения, используемого в экспериментах, приведены на рис. 1.



**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 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.

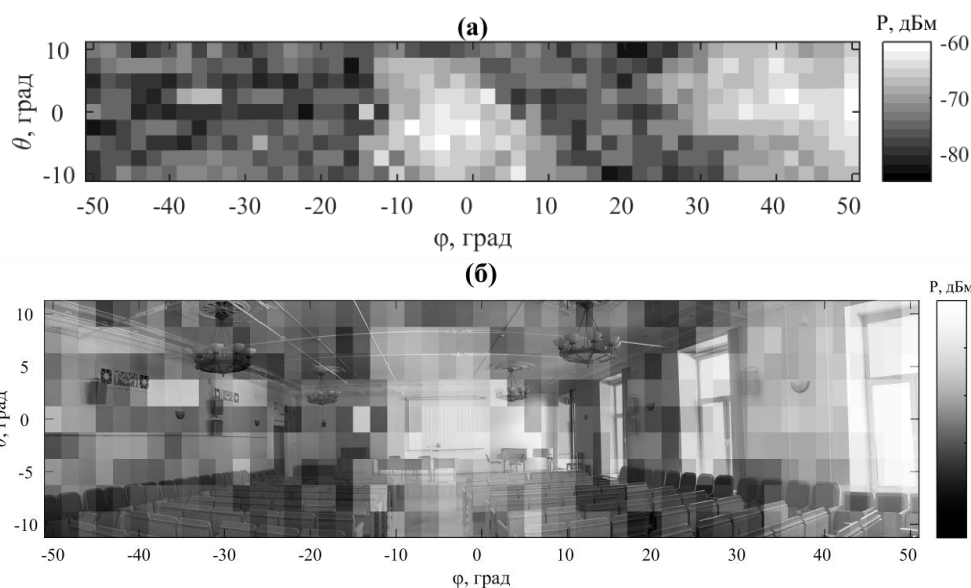


**Рис. 2. Схема проведения экспериментов (а) и фото конференц-зала (б); Л1-Л6 – лампы радиосвета, ПА – приемная антенна; расстояния указаны в метрах**

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.

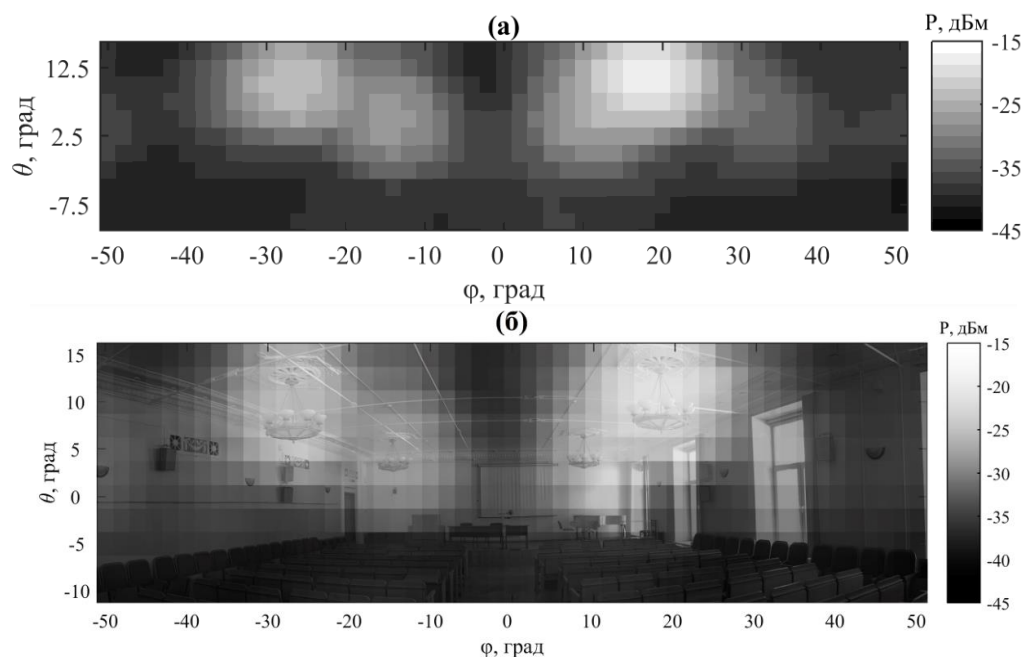
Изображение зала при выключенных лампах радиосвета, полученное путем описанного сканирования, приведено на рис. 3а. Его анализ показал, что уровень принимаемого сигнала колеблется от -85 до -65 дБм. При этом наблюдается достаточно большая неравномерность фона по направлению. Наибольшая интенсивность 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 над полом, на высоте примерно 3 м. На рис. 4а показано изображение зала, полученное в этом случае при измерении приемником с направленной антенной интенсивности принимаемого излучения.



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

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



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

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...-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 достаточное равномерное освещение. Это позволяет перейти к экспериментам по исследованию характеристик радиоизображений объектов с разными электромагнитными свойствами.

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.

Первые эксперименты проводили, чтобы выяснить, как поменяется освещенность при появлении металлического куба.

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 приемником 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 (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.

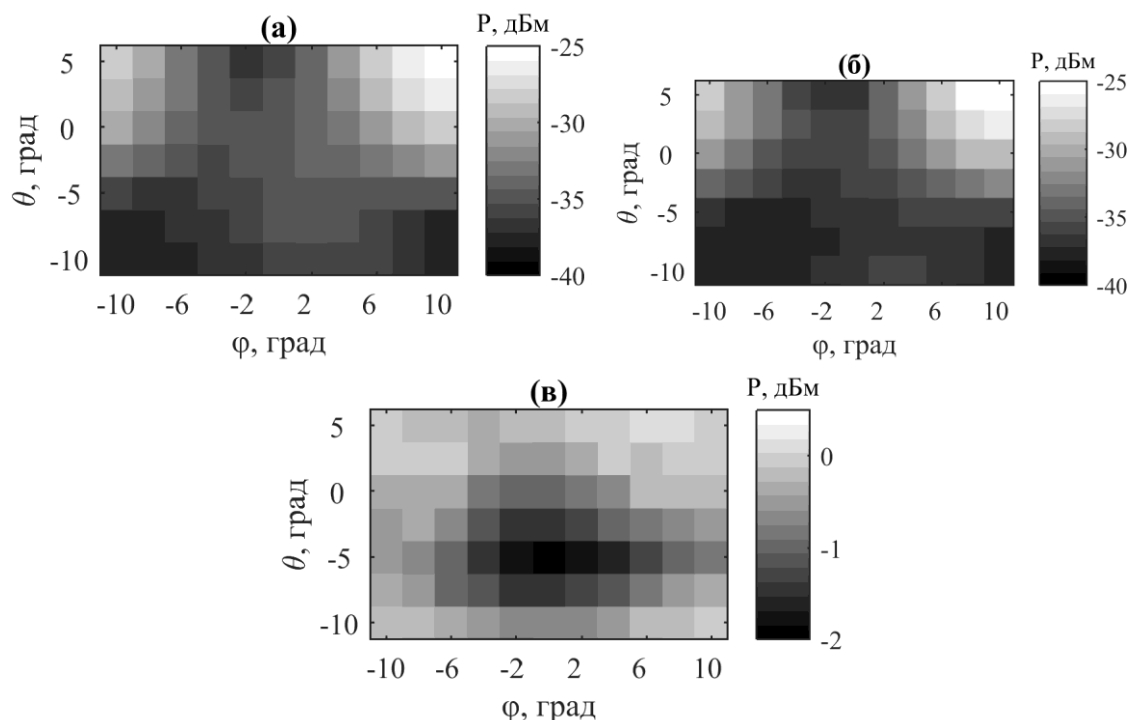
Если это предположение верно, то куб будет являться источником усиленного сигнала на входе приемника в двух случаях: 1) грань куба представляет собой «шероховатую» поверхность, диффузно отражающую падающие на нее лучи; 2) куб расположен так, что угол падения излучения от источника радиосвета на поверхность 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.

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.



**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**

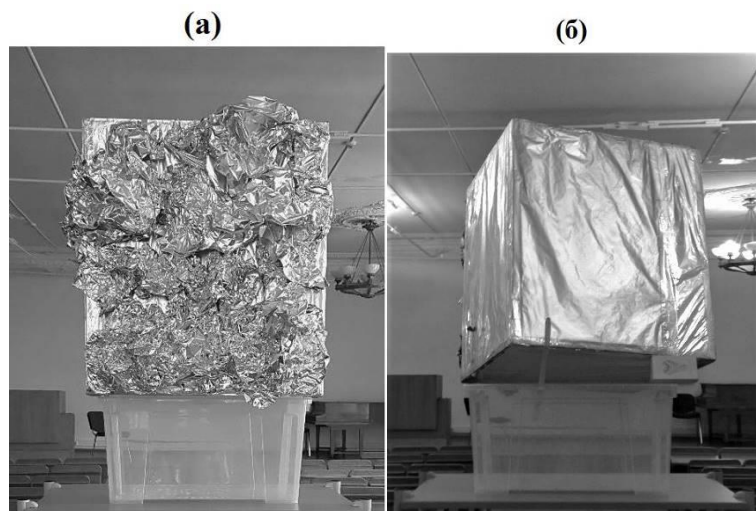
При проведении второго эксперимента куб был расположен так, чтобы в принимающую антенну попадал луч, отражённый от одной из двух ламп радиосвета (см. рис. 6б). Расстояние от куба до антенны составляло 2 м.

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, отражённого от куба, приводит к уменьшению влияния неравномерности освещённости на разностную картину (см. рис. 8в).

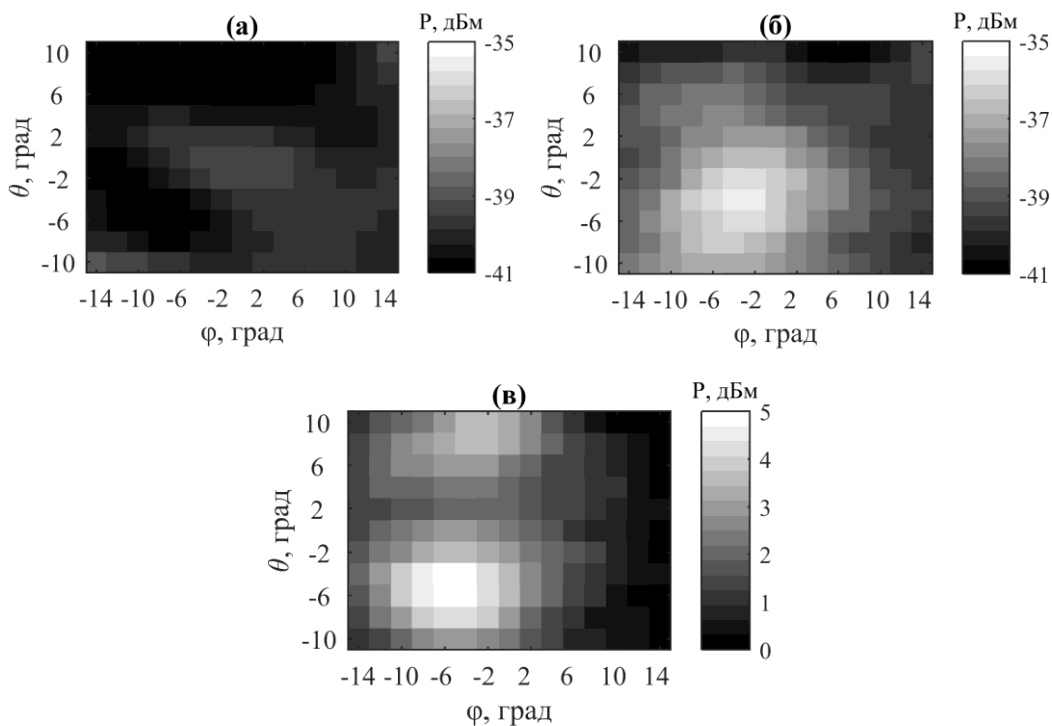
Для выяснения возможности наблюдения в радиосвете объектов из диэлектрика и поглощающих материалов использовались кювета с водой и листы из радиопоглощающего материала.

Кювету, наполненную водой, располагали на расстоянии 2 м от принимающей антенны. Объект исследования не являлся отражающим и обладал высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 81$ .

Уровень принимаемого излучения с направления 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.



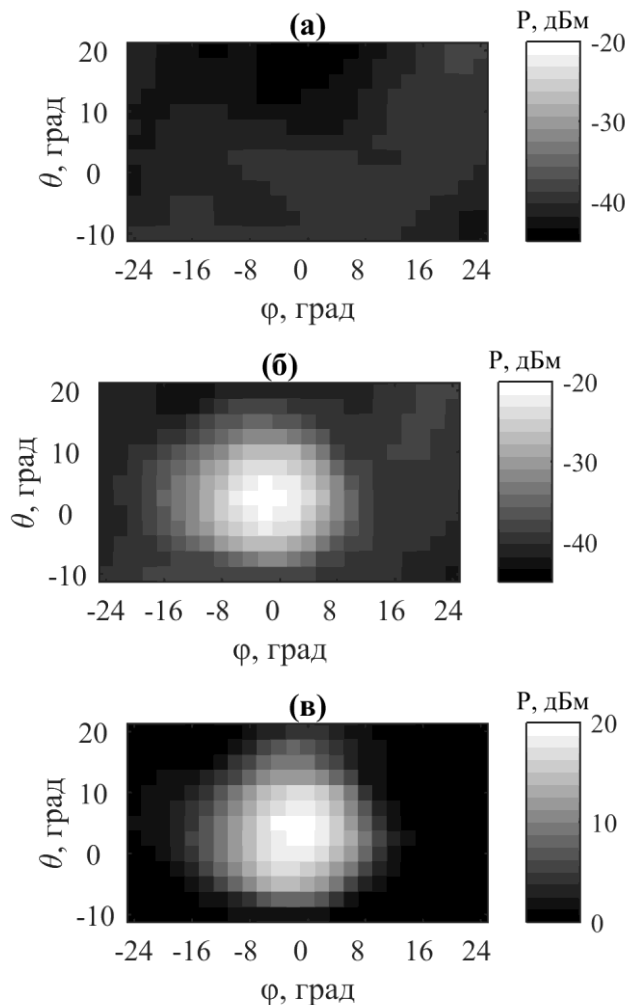
**Рис. 6. Эксперименты с усиливающими объектами: а) куб с шероховатой поверхностью; б) куб с зеркальной поверхностью для отражения луча от передней грани в направлении антенны**



**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.**

Далее был проведён 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.



**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.**

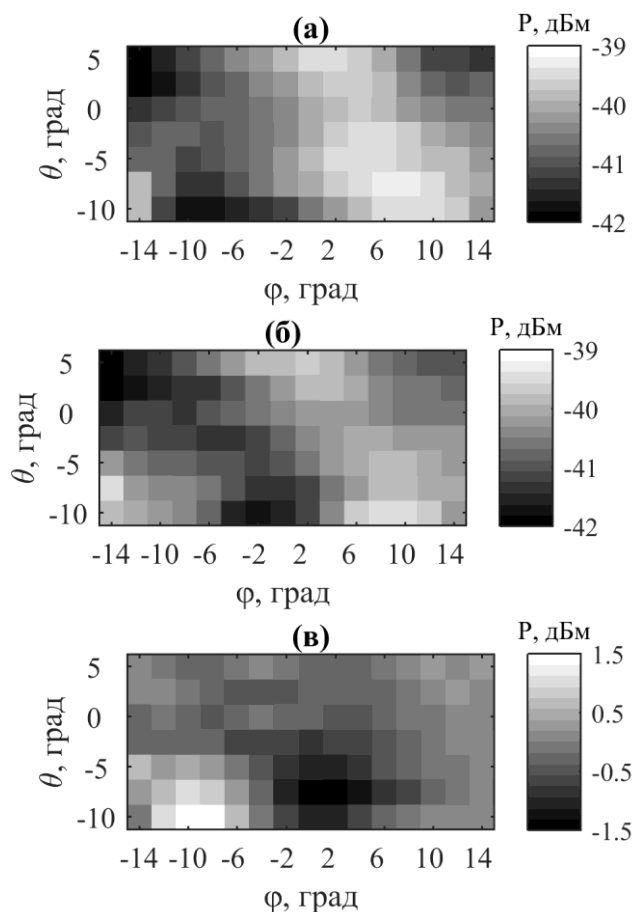
Для выяснения возможности наблюдения в радиосвете различных объектов за препятствиями (например, стенами зданий) были проведены эксперименты по получению изображений объектов, располагавшихся за стеной относительно приёмника.

В экспериментах принимающая антенна (рис. 10) была расположена на расстоянии 1 м от стены, а наблюдаемый объект (О) и лампа радиосвета (Л) находились с противоположной стороны стены, на расстоянии 2 м и там же находилась лампа радиосвета 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.

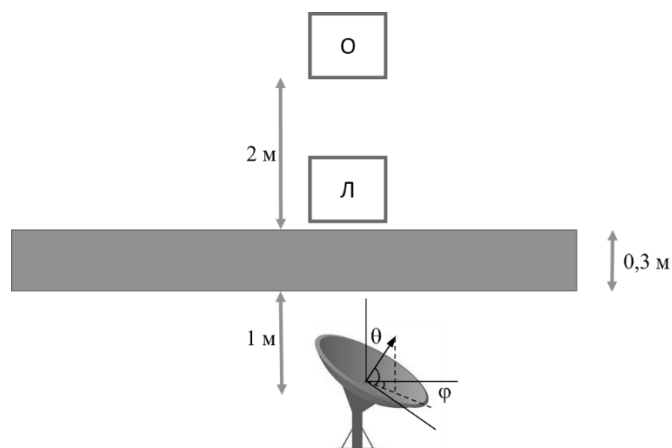
В работах [14,15] было установлено, что при распространении хаотического СШП-сигнала через такую стену имеется дополнительное затухание сигнала в 6...8 дБ.

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.





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



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

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

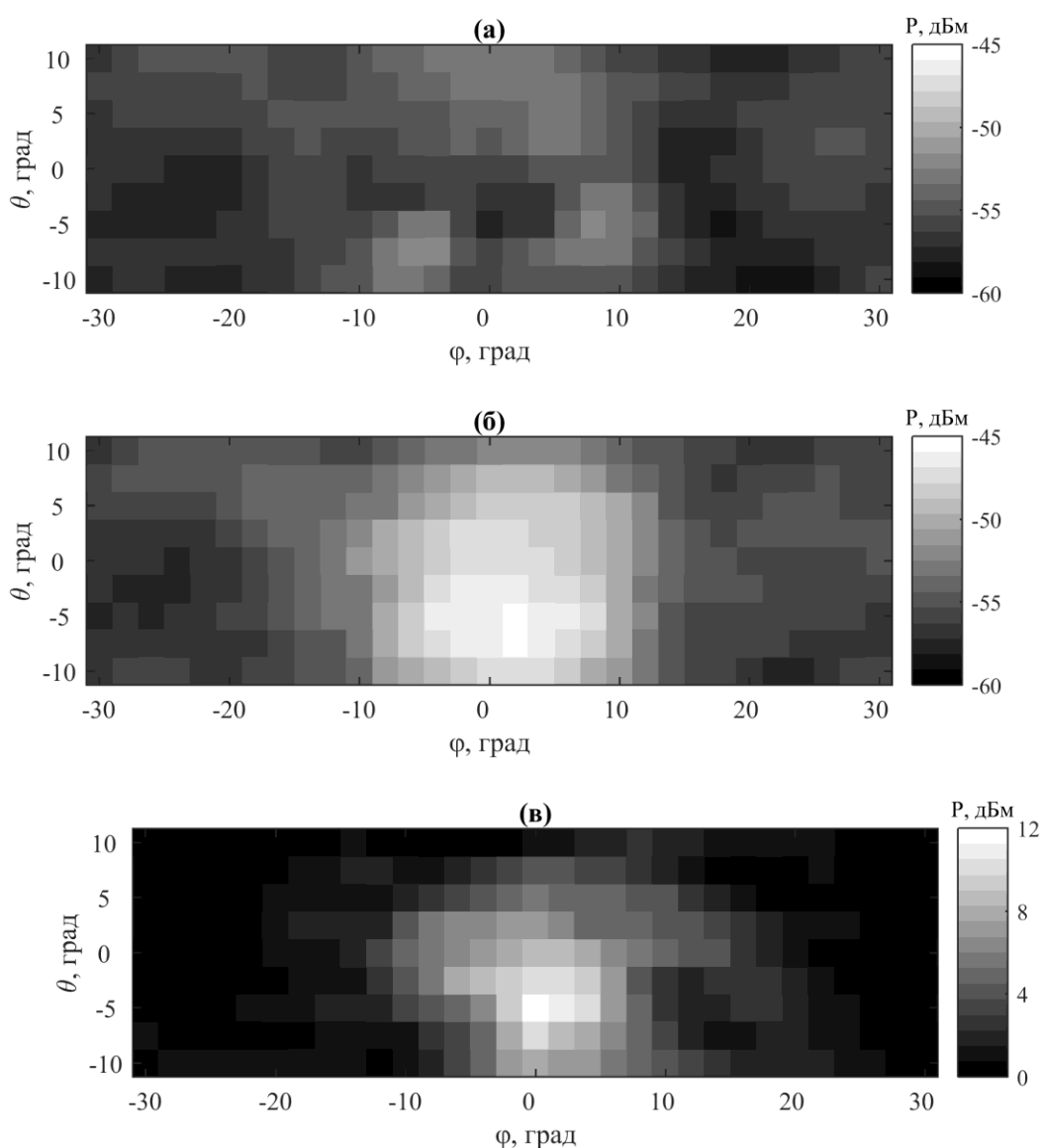
Уровень фонового излучения здесь составил около  $-53...-60$  дБм, в то время как аналогичное измерение фонового излучения в конференц-зале составило  $-38...-40$  дБм.

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. 11 в 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, несмотря на разницу в средней освещенности сцен в зале и при наличии стены примерно на 10 дБ.

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



**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)**

## Литература

1. *Тайсон Н.Д.* Астрофизика с космической скоростью. М.: Изд. АСТ. 2018.
2. *Спирidonов 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., М.Ю. Герасимов М.Ю., В.В. 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.