

**Многолучевые приборы на основе линзы Ротмана для задач наблюдения в радиоосвещенных средах**

М.М. Петросян

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, Россия  
E-mail: chaos@cplire.ru*

*Рассматривается задача эффективного способа наблюдения окружающей средой, освещенной сверхширокополосным шумоподобным некогерентным микроволновым излучением – радиосветом. В качестве такого способа предлагаются многолучевые системы реализуемых либо на основе электронного сканирования луча, либо на основе одновременного формирования приемной системой сети лучей. Рассмотрены возможные варианты многолучевых систем. В целях экспериментального исследования выбрана многолучевая система, основанная на линзе Ротмана. Произведен расчет топологии линзы, работающей в полосе 3-5 ГГц, с семью лучами и семью антеннами. Произведены численные эксперименты сформированной топологией линзы. На основе расчетной топологии реализована линза. Произведены эксперименты по приему радиоосвещения чувствительной ячейкой радиосвета подключенной к линзе.*

*This study is dedicated to the issue of an effective way of observing the environment illuminated by an ultra-wideband, noise-like, incoherent microwave radiation. As such a method, multi-beam systems are proposed which are implemented either based on electron beam scanning or based on the simultaneous formation of a network of rays by the receiving system. Firstly, possible options of multi-beam systems are considered. For the purposes of experimental research, a multi-beam system based on the Rotman lens has been selected. The geometry of a lens operating in the 3-5 GHz band with seven beams and seven antennas has been calculated. Numerical experiments with the formed lens topology have been performed. Based on the design topology, a lens is created. Experiments were conducted to receive radio illumination with a sensitive radio light cell connected to the lens.*

Использование шумовых некогерентных сверхширокополосных источников микроволнового излучения по аналогии с обычным светом создает широкие возможности по наблюдению за окружающей средой. Эта идея активно развивается в ИРЭ им. В. А. Котельникова, где уже разработали эффективные и компактные источники микроволнового радиоосвещения – радиолампы [1-3], чувствительную ячейку радиосвета имеющего широкий динамический диапазон и способность повышать диапазон путем накопления сигнала [4, 5]. Продемонстрировано освещение среды лампами радиосвета и получение изображений в радиосвете этой среды и объектов, находящихся в ней [6, 7].

Так как радиоосвещение это шумовое некогерентное излучение, то вопросы приема аналогично видимому свету сводятся к оценке мощностных или спектральных характеристик. Некогерентность радиоосвещения позволяет использовать одновременно независимо множество источников для освещения больших площадей и при этом получать равномерную подсветку без интерференционных эффектов. Такой способ освещения позволяет одновременно независимо работать совокупности приемников. Одновременная работа разных приемников при стационарной, независимой от приемников освещенности позволит получить проекции среды под разными углами и, например, аналогично человеческим глазам формировать

стереоскопическое зрение. Разнесенность источника освещения и приемного устройства решает и технические проблемы. Например, частой проблемой для систем с неразнесенными источниками зондирования и приёмниками является проблема изоляции каналов излучения и приема, из-за чего уровень сигнала на приемном детекторе выходит за пределы линейного рабочего диапазона. Еще одним преимуществом разнесенности источника излучения и приемника заключается в том, что при наблюдении за полупрозрачные препятствия в виде бетонной или кирпичной стены, при освещении отраженный от препятствия сигнал не будет попадать напрямую в приемник таким образом создавая помеху для обнаружения объектов находящимся за препятствием. Еще одним преимуществом является простота технологии и дешевизна создания наблюдательных систем на основе радиоосвещения.

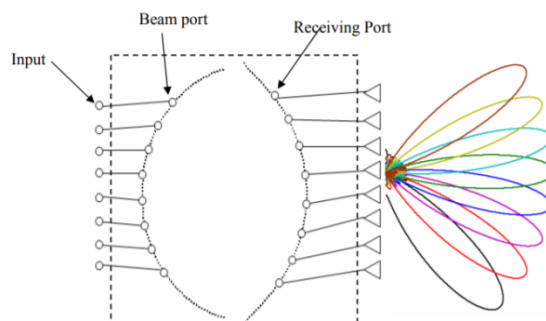
Подобно человеческому глазу, где множество чувствительных элементов совместно с линзой формируют изображение, системы наблюдения на основе радиоосвещения могут развиваться в том же направлении. Аналогом глаза или фотокамеры видимого диапазона могут рассматриваться микроволновые многолучевые приемные системы. Многолучевые системы наблюдения — это такие системы наблюдения, в которых одновременно могут формироваться множество диаграмм направленностей [8]. Как уже было сказано радиоосвещение попадая на окружающие предметы и поверхности будет частично проходить через них, частично отражаться или рассеиваться, частично поглощаться в них и попадая на преимную часть многолучевой системы будет на его выходе формировать изображение этих объектов и поверхностей.

Многолучевые системы состоят из антенной части и диаграммообразующей части. В основном антенная часть из себя представляет линейку или решетку антенн. И подобно зеркальным системам чем больше размер линейки или решетки, тем более узкий луч получится в пространстве для заданной длины волны. Для антенной линейки с длиной  $L$  угловая разрешающая способность в зоне Фраунгофера задается [9]:

$$\Delta\varphi = 0.88 \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Многолучевые антенны состоят из  $M$  портов и  $N$  излучателей. Диаграммообразующая часть формирует распределение амплитуды и фазы таким образом, чтобы в пространстве формировался луч, соответствующий выбранному порту рис. 1.



**Рис.1. Многолучевая антенна**

Формирование заданных амплитуд и фаз на элементах антенной решетки можно производить цифровым способом. Преимуществом цифровых многолучевых систем является очень высокая степень точности формирования амплитудно-фазового

распределения, а также шаг и количество сканирующих лучей не фиксированы. Но цифровые системы ограничиваются аналого-цифровыми преобразователями, которые имеют очень высокую цену в СВЧ диапазоне и при этом нуждаются в сверхбыстрых процессорах, что делает систему не только дорогой, но громоздкой [10].

Еще одним способом формирования многолучевых антенн является матрица Батлера. Такая ДОС состоит из ответвителей с двумя входами и с двумя выходами, в которых мощность с любого входа разделяется поровну между двумя выходами, на один выход сигнал проходит без фазовой задержки, на второй с задержкой по фазе на  $\pi/2$ , симметрично для второго выхода. Между ответвителями используются фиксированные фазосдвигатели. Такая система очень чувствительна к частоте сигнала и направленность каждого луча будет зависеть от частоты сигнала, что в случае широкополосных сигналов приведет к развалу диаграммы направленности [8,10].

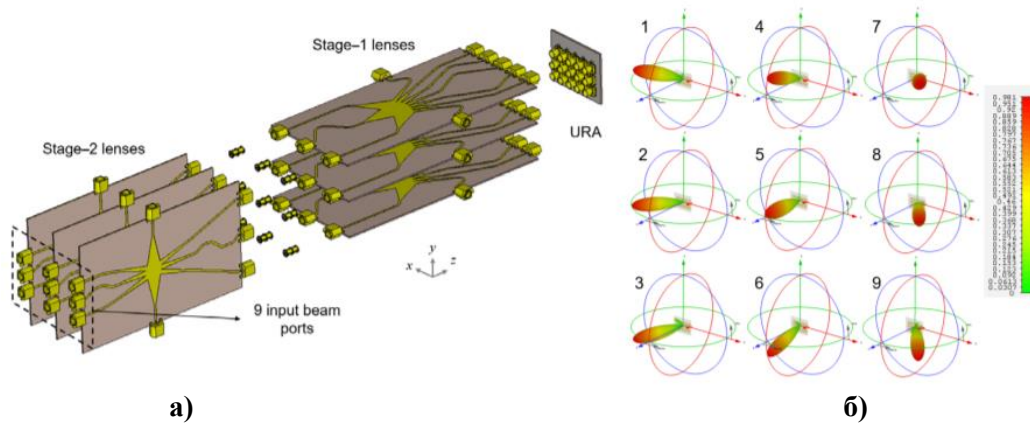
Использование микроволновых линз является еще одним способом формирования многолучевых антенн. Принцип работы микроволновой линзы не отличается от оптических линз. Между каждым портом и элементами ячейки создается разница путей таким образом, чтобы происходило синфазное суммирование сигналов в зависимости от разницы фаз на поверхности антенной решетки, те направления падения плоской волны. Разница длины маршрутов прохождения сигнала не зависит от частоты. Зависимость от частоты возникает только от диэлектрической проницаемости среды, с которой реализована линза. Существуют различные микроволновые линзы, например, линза Ротмана в которой используется однородный диэлектрик и линзы с неоднородной диэлектрической проницаемостью как линза Люнеберга.

Так как радиоосвещение это широкополосное излучение то использование матрицы Батлера становится невозможным, потенциально лучшим решением является цифровая многолучевая система и скорее всего дальнейшее развитие приема радиоосвещения будет в этом направлении, однако учитывая цену аналого-цифровых преобразователей с частотой дискретизации 10 ГГц необходимых для дискретизации радиоосвещения с частотой 3-5 ГГц, практическое и повсеместное использование цифровых многолучевых приемников пока невозможно. Из линзовых решений в данной работе дается предпочтение линзе Ротмана по причине простоты его реализации на основе печатных плат и возможности его дальнейшей интеграции как с антеннами, так и с приемниками радиосвета.

При использовании одной линзы Ротмана лучи будут формироваться только в одной плоскости, но если их соединить определенным образом, можно создать антенную решетку формирующую лучи как по углу места так по азимуту рис.2 [10].

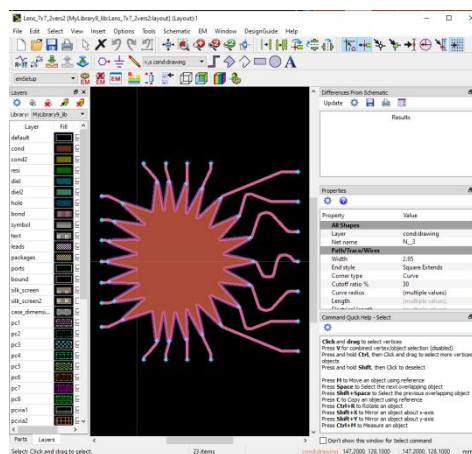
Чтобы с линзой получить разрешающую способность сопоставимую с параболическим зеркалом с которым проводились первые эксперименты по получению изображений в радиосвете, необходимо чтобы линейка антенн имела длину 43 см. Количество пикселей, которые формируются одновременно задается числом портов, если приемники будут подключаться через SMAразъем, у которых ширина около 8 мм, то можно рассчитывать на 43 пикселей/лучей. Угловое расстояние между лучами зависит от максимального угла сканирования, которая задается формой линзы.

Для экспериментального исследования линзы Ротмана в задаче приема радиоосвещения, был произведен расчет исследовательского макета параметры которого были выбраны исходя из легкости дальнейшей реализации. По этой причине размеры линзы ограничивались 20 x 20 см, диэлектрическая проницаемость печатной платы 4.4, с числом антенн и лучей 7 x 7, максимальный угол сканирования 60 градусов, частотный диапазон 3-5 ГГц, ширина диаграммы направленности 19 градусов для частоты 4 ГГц.



**Рис. 2. Линза Ротмана формирующая лучи как по азимутальной плоскости, так и по углу места: а) структура; б) диаграммы направленностей соответствующих лучей [Abbasi, Muhammad & Fusco, Vincent & Tataria, Harsh & Matthaïou, Michail. (2019). Lens-Based Beamformer for Low-Complexity Millimeter-Wave Cellular Systems.]**

Топология для заданных параметров была получена в программном комплексе Matlab, электромагнитная симуляция производилась в программе ADS Keysight методом Моментов (рис. 2), где результатом симуляции являлась матрица S параметров для всех пар входов и выходов линзы для заданных длин волн.

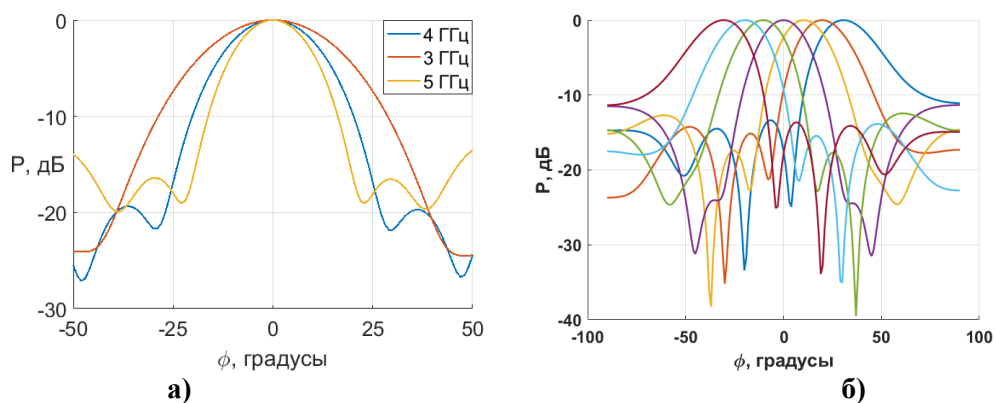


**Рис. 2. Проект линзы 7x7 в программе ADSKeysight**

На основе S параметров можно получить диаграммы направленностей всех лучей

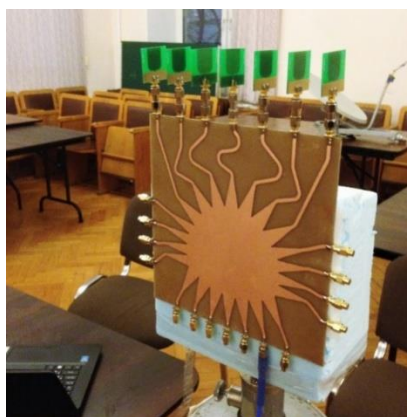
$$P_m(\varphi) = \sum_{n=1}^N S_{mn} \times e^{j \sin \varphi * k * d_n}, \quad (2)$$

где  $m$  – номер порта/луча,  $n$  – номер антенны в линейке антенн,  $S_{mn}$  – значение S параметра для пары порт-антенна,  $d_n$  – расстояние для  $n$ -ой антенны от центра линейки,  $k$  – волновое число в пространстве. Диаграммы направленности для центральных лучей (четвертый луч) для частот 3 ГГц, 4 ГГц и 5 ГГц, построенные с расчётными S параметрами, полученными в результате моделирования, представлены на рис. 4.



**Рис. 4. Диаграммы направленностей: а) центральный луч (четвертый луч) для частот 3 ГГц, 4 ГГц и 5 ГГц, б) семь лучей при частоте 4 ГГц**

С этой топологией была напечатана линза на печатной плате с стеклотекстолитом FR4. У FR4 диэлектрическая проницаемость варьируется в от 4 до 4.9 в сантиметровом диапазоне частот, и имеет высокое значение тангенса угла потерь  $\text{tg}\delta$  равной 0.02. Эти характеристики весьма нежелательные для СШП СВЧ устройства, однако в пределах нашей задачи, исследования приема радиоосвещения многолучевой антенной, этого достаточно. В качестве антенных ячеек использовались печатные антенны с тороидальной диаграммой направленности. Реализация линзы представлена на рис. 5.



**Рис. 5. Линза Ротмана 7x7 с подключенными печатными антеннами**

Разработанная линза совместно с чувствительными ячейками радиосвета подключенными к портам линзы будет формировать аналог глаза или камеры в радиодиапазоне, где чувствительный элемент играет роль чувствительной палочки глаза, а линза Ротмана будет аналогом хрусталика. Аналогия будет более яркой если будет создана линза Ротмана формирующая луч по двум плоскостям (рис. 2).

С разработанной ранее чувствительной ячейкой радиосвета и линзой Ротмана был поставлен эксперимент по приему радиоосвещения. Экспериментальная установка состояла из: лампы радиосвета с полосой 3-5 ГГц и мощностью излучения 2 мВт, чувствительной ячейки радиосвета работающей в полосе 3-5 ГГц, с динамическим диапазоном от -20 дБм до -70 дБм и с возможностью повышения динамического диапазона вплоть до -85 дБм за счет накопления, ПК со специальным ПО к которому подключается чувствительный элемент, ПО позволяет регулировать накопление и выводит на экран приходящего на ячейку мощность сигнала.

Приемник поочередно подключался к портам линзы после чего измерялось диаграмма направленности при приеме радиоосвещения. Схема эксперимента и экспериментальная установка представлены на рис. 6.

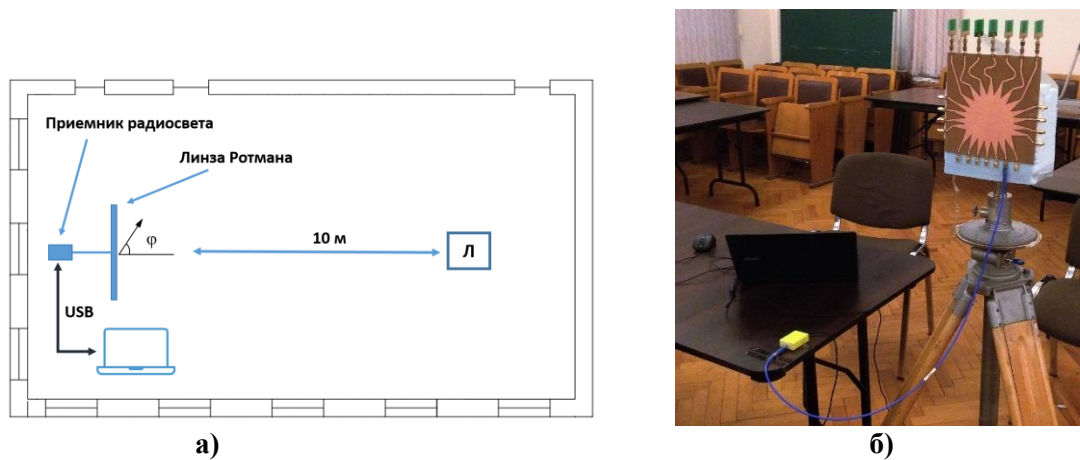


Рис. 6. Схема проведения эксперимента: а) схема, Л –лампа радиосвета; б) фото экспериментально установки

Эксперимент проводился в конференц-зале ИРЭ им. В. А. Котельникова. При проведении эксперимента лампа на расстоянии 10 м от приемной системы. Приемник поочередно подключался к портам линзы, при этом с ПО на ПК регистрировалось уровень приходящей мощности. Для второго и четвертого лучей был измерен диаграмма направленности. В процессе измерения менялся угол по азимуту от -50 до 50 градусов. Диаграммы направленности, полученные в результате эксперимента, представлены на рис. 7а.

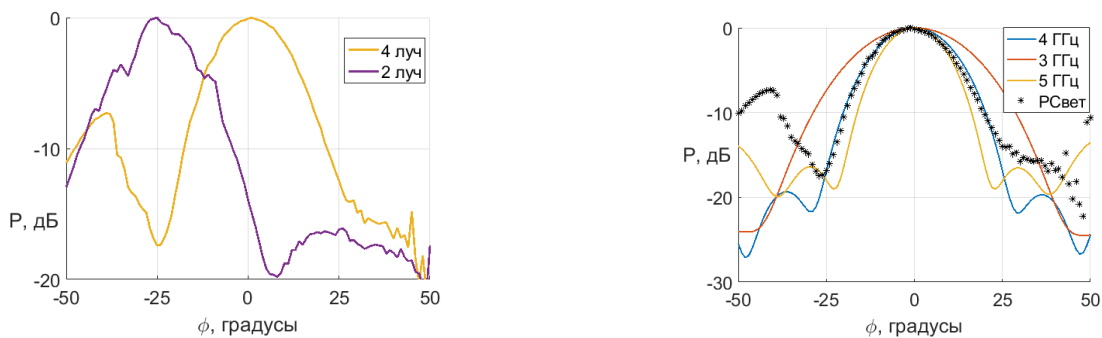


Рис. 7. Диаграмма направленности при приеме радиосвета 3-5 ГГц: а) ДН второго и четвертого луча; б) наложение ДН измеренного четвертого (центрального) луча (звездочки) на расчетные лучи ДН для 3, 4, 5 ГГц

Направление лучей и ширина диаграмм направленностей полученные в результате эксперимента совпадают с расчетными. Для центрального луча наблюдается боковой лепесток под углом -40 градусов, который скорее всего обусловлен отражением от левой стены, в пользу этого намекает отсутствие такого же лепестка с правой стороны где находятся окна, при том что линза полностью симметричная. При сопоставлении результатов моделирования и экспериментальные данные (рис. 7б) видно, что луч при приеме радиосвета совпадает с лучом центральной частоты те 4 ГГц.

Системы, основанные на радиоосвещении имеют преимущества по сравнению с аналогичными радиосистемами для наблюдении за окружающим пространством: простая конструкция, разнесенность и независимость источников и приемников,

возможность одновременного наблюдения всей территории за счет ее полного освещения, отсутствие интерференции при получении изображений. Использование многолучевых систем с чувствительными ячейками радиосвета расширяет круг возможных практических применений радиоосвещения. Интеграция чувствительных ячеек и печатных антенн в радиолинзу формирует простое устройство, позволяющее эффективно наблюдать за радиоосвещенной окружающей средой.

### Литература

1. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., М.Ю. Герасимов М.Ю., В.В. Ицков В.В. Радиоосвещение на основе сверхширокополосных генераторов динамического хаоса // РЭ. 2016. Т. 61. № 11. С. 1–11.
2. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В. Источники радиоосвещения на основе сверхширокополосных микрогенераторов хаотических колебаний // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 24. С. 49-57.
3. Dmitriev A.S., Efremova E.V., Gerasimov M.Y., Itskov V.V. Look at the world in a different light // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2017. V. 20, No. 2, P. 133 – 143.
4. Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Рыжов А.И., Уваров А.В. Экспериментальная ячейка приемника радиосвета // Письма в ЖТФ. 2018.Т. 44, № 21. С. 81-90.
5. 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. 1-7.
6. Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Попов М.Г., Рыжов А.И. Искусственное радиоосвещение: источники, приёмники и получение изображений // *Физические основы приборостроения*. 2018. Т. 7. № 3(29). С. 50–63.
7. 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.
8. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. Высшая школа, 1988
9. ORFANIDIS, S. J. 2002. *Electromagnetic waves and antennas*. Rutgers University New Brunswick, NJ
10. Dong, Junwei. “Microwave Lens Designs: Optimization, Fast Simulation Algorithms, and 360-Degree Scanning Techniques.” (2009).