

## ОПТИЧЕСКОЕ РАДИО

*А.Л. Тимофеев, А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.Р. Гизатулин*

Уфимский университет науки и технологий  
450076, Российская Федерация, г. Уфа, З. Валиди, д. 32

**Аннотация.** Передача информации с помощью электромагнитного излучения происходит двумя основными способами: оптическим (в видимой части спектра) и радиоспособом (в длинноволновой части спектра), которые принципиально отличаются друг от друга. На оптическом способе основано зрение живых существ и вся техника фиксирования изображений, начиная с фотографии. Хотя обычно зрение и фотографию не относят к процессу передачи информации, фактически это параллельная передача информации из области пространства, в которой расположен наблюдаемый объект, в область восприятия – на сетчатку глаза или фотоматрицу камеры. Радиоспособ – последовательная передача информации между двумя точками. Если в одной области пространства необходимо организовать несколько каналов связи, возникает проблема их интерференции в приемной антенне. Основным способом решения этой проблемы является частотное разделение, возможности которого всегда ограничены шириной выделенного диапазона частот. Для дальнейшего увеличения числа каналов в условиях дефицита частотного ресурса используется временное, фазовое и кодовое разделение каналов. Третий способ – оптическое радио. Оптическое радио – это использование законов геометрической оптики в радиодиапазоне. При переходе к другой длине волны изменяются только размеры линзы и размеры приемника (приемной матрицы). Основным элементом оптического радио является радиолинза, при этом в отличие от апертурной антенны традиционного радио она используется для формирования радиоизображения, проецируемого на массив элементарных антенн. Это дает возможность организовать в одном пространственном канале большое число радиоканалов, работающих на одной несущей с независимым выбором способов модуляции и ширины используемого спектра. Ограничением оптического радио является необходимость прямой видимости.

**Ключевые слова:** радиолинза, радиосвет, радиоизображение, оптическое радио.

### Введение

Практически во всех системах связи существуют задачи, которые не удается решить из-за ограниченной скорости передачи информации. С развитием связи происходит повышение доступной скорости передачи, одни задачи решаются, но их место занимают другие. Такое положение дел считается естественным, и все усилия разработчиков направлены на повышение пропускной способности каналов связи. В то же время существуют процессы с несопоставимо более высокой скоростью передачи информации, но их принципы передачи не используются в технических системах. Например, при фотографировании звездного неба на регистрирующее устройство со скоростью света поступает информация обо всей части вселенной, находящейся в поле зрения. Тот факт, что из этого практически бесконечного объема информации удастся зафиксировать несколько десятков или сотен мегабайт, говорит только о разрешающей способности оптической системы и фотоприемной матрицы, а не о скорости передачи информации в пространстве.

Передача информации с помощью электромагнитного излучения происходит двумя основными способами: оптическим (в видимой части спектра с включением соседних областей – УФ и ИК) и радиоспособом (в длинноволновой части спектра). Сравним

отличительные черты этих способов и рассмотрим возможность использования третьего, объединяющего способа.

### **Оптический способ**

На нем основано зрение живых существ и вся техника фиксирования изображений, начиная с фотографии. Хотя обычно зрение и фотографию не относят к процессу передачи информации, фактически это есть основной по объему передаваемой информации способ передачи – из области пространства, в которой расположен наблюдаемый объект, в область восприятия – на сетчатку глаза или фотоматрицу камеры.

Для формирования изображения требуется источник освещения. Каждая точка поверхности каждого предмета оптической сцены излучает в общем случае сферическую волну, отражая излучение источника. Таким образом, всё пространство оптической сцены заполнено излучением одного и того же спектра (спектра источника освещения за минусом спектрального поглощения предметами), распространяющимся во все стороны. В процессе распространения пересекающиеся волны не взаимодействуют вследствие линейности уравнений Максвелла в линейной среде, но на любой поверхности (экране), куда они попадают, возникает интерференция. При монохромном источнике интерференционная картина явно видна (это используется в голографии), при немонохромном - экран освещен равномерно (интерференция неразличима из-за сложения некогерентных волн). Для получения изображения оптической сцены необходим объектив (в простейшем случае – линза). Линза осуществляет пространственное разделение попадающих на нее волн таким образом, что в каждую точку экрана (поверхности, на которой формируется принимаемое изображение) приходит волна только из одной точки оптической сцены (одного пространственного направления). Поэтому интерференции на экране не возникает. При монохромном освещении формируется одноцветное изображение, при немонохромном – многоцветное.

Особенности оптического способа:

- отсутствует модуляция, мультиплексирование, частотное разделение и любые преобразования несущей (волны, излучаемой источником освещения). Можно говорить только об амплитудной модуляции, так как яркость каждой точки изображения пропорциональна уровню входящего излучения;
- отсутствие операций преобразования сигнала дает нулевое время модуляции/демодуляции и теоретически неограниченную скорость передачи изображения. Всё изображение сколь угодно большой сложности формируется на экране за один период световой волны. Скорость света остается ограничивающим фактором, но с учетом количества информации, содержащейся в изображении и передаваемой одновременно, пропускная способность канала при отсутствии шума практически не ограничена. Специальная теория относительности ограничивает физическую скорость передачи сигнала для регистрации часов между двумя пространственно удаленными наблюдателями [1], но не запрещает передавать информацию со сколь угодно большой битовой скоростью.

### **Радиоспособ**

Развитие радио с момента его изобретения пошло как альтернатива проводной связи (замена среды передачи – провода на эфир) с сохранением принципа передачи информации из одной точки пространства в другую (радиотелеграф), а не как выбор альтернативного участка электромагнитного спектра с сохранением оптического способа передачи из пространства передатчика в плоскость приемника, когда всё сообщение передается

параллельно одновременно. Поэтому информация, передаваемая по радиоканалу, должна быть представлена в последовательной форме для передачи по последовательному каналу. Если в рассматриваемой области пространства используется только один радиоканал, то основной задачей является повышение скорости передачи информации, для решения которой разработано большое число методов модуляции. Если в этой области пространства необходимо организовать несколько каналов связи, возникает проблема их интерференции в приемной антенне. Основным способом решения этой проблемы является частотное разделение, возможности которого всегда ограничены шириной выделенного диапазона частот. Для дальнейшего увеличения числа каналов в условиях дефицита частотного ресурса используется временное, фазовое и кодовое разделение каналов.

### Третий способ – оптическое радио

Получением видимого изображения объектов с помощью радиоволн для изучения внутреннего строения объектов, непрозрачных в оптическом диапазоне волн, и наблюдения объектов, находящихся в оптически непрозрачной среде, занимается направление «радиовидение», или «интроскопия» [2-4]. В радиовидении используют различные физические эффекты и явления, а в качестве чувствительного элемента используют жидкие кристаллы, полупроводниковые монокристаллы, специальные фотоплёнки и т.д. У всех таких элементов при воздействии радиоволн изменяются оптические характеристики – коэффициент отражения или прозрачность для видимого света. Наиболее часто радиоизображения объектов получают методом сканирования узкого пучка радиоволн и приёма отражённых от объекта сигналов. Однако в радиовидении и интроскопии не ставится задача передачи произвольной цифровой информации.

В последнее время все большее внимание уделяется системам наблюдения за окружающим пространством с применением излучения радиодиапазона в задачах навигации роботов различного назначения, мобильных беспилотных средств, контроля за передвижением объектов в ограниченном пространстве и т. д. Как правило, для этих целей используются активные системы, включающие в себя передатчик, подсвечивающий объект и приемник (или, как вариант, разнесенную систему приемников) [5]. При этом используется термин «радиосвет», под которым понимается локальное искусственно созданное поле широкополосного некогерентного в пространстве и во времени излучения в радиодиапазоне длин волн. Попадая на близлежащие поверхности и предметы, излучение частично поглощается и проходит через них, а также частично отражается. Распространяясь далее, оно несет информацию о среде, с которой взаимодействует. В этом случае ситуация аналогична ситуации с обычным (видимым) светом, различие лишь в том, что это другой частотный диапазон [6].

Возможность создания аналога биологического глаза в радиодиапазоне для наблюдения окружающего пространства в искусственном радиосвете рассмотрена в [5]. Проведенные в ряде работ исследования показали возможность наблюдения объектов в радиосвете с помощью многолучевых систем, подобных по своим свойствам глазам биологических объектов с малым числом чувствительных элементов. Общим подходом для работ в этой области является использование антенных систем с узкой диаграммой направленности [7-9]. В работе [5] предложена экспериментальная модель многолучевого устройства для получения изображений в радиосвете на основе линзы Ротмана, которая позволяет одновременно получать информацию от каждого луча. К недостаткам данного подхода можно отнести отсутствие масштабируемости системы построения изображений (как количество лучей, так и их направленность жёстко задаются геометрией системы, которая не может быть гибко изменена) и сложную конструкцию линзы в случае необходимости работы с двумерными изображениями. Для расширения возможностей

способов формирования изображений в радиосвете необходимо иметь возможность масштабируемого формирования множества лучей одновременно с высокой разрешающей способностью. Основой для приёмной системы, обладающей такими характеристиками, могут послужить радиоастрономические методы, в которых относительно небольшим количеством приемных антенн формируются изображения космоса с высокой разрешающей способностью [10]. При этом всё больший интерес вызывают радиолинзы. Линзовые антенны, и в первую очередь линзовые антенны Лüneберга [11], являются перспективным видом антенн для сетей 5G и 6G [12]. Кроме того, линзы Лüneберга используются как диаграммообразующие устройства в радиолокаторах [13], заменяя фазированные антенные решётки, и радиотелескопах.

Линза Лüneберга представляет собой неоднородную диэлектрическую сферу, в которой показатель преломления  $n$  меняется по закону

$$n(r) = \sqrt{\varepsilon(r)} = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} = \sqrt{2 - (\bar{r})^2},$$

где  $\varepsilon(r)$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы в точке  $r$ ,  $\bar{r}$  – текущая радиальная координата,  $a$  – радиус сферы. Основное свойство линзы Лüneберга – при падении на нее пучка параллельных лучей все они соберутся в одной точке — фокусе. Форма радиолинзы определяется требуемым законом изменения показателя преломления  $n$  (отношения фазовых скоростей распространения радиоволн в вакууме и линзе). При  $n > 1$  радиолинза (как и линза в оптике) называется замедляющей, а при  $n < 1$  – ускоряющей (последняя не имеет аналогов в оптике). Замедляющие радиолинзы изготавливаются из однородных диэлектрических материалов с малыми потерями (полистирол, фторопласт и др.). Ускоряющие радиолинзы выполняются из металлических пластин определённой формы. Их принцип действия объясняется зависимостью фазовой скорости электромагнитной волны, распространяющейся между параллельными металлическими пластинами, от расстояния между ними, если вектор её электрического поля параллелен пластинам. Тело линзы может состоять из дискретных элементов кубической формы с различными показателями преломления. Таким образом, необходимый закон изменения показателя преломления может быть реализован с достаточной степенью точности в виде переменного по радиусу скопления неоднородностей в диэлектрике. Примеры линз показаны на рисунке 1 [14].

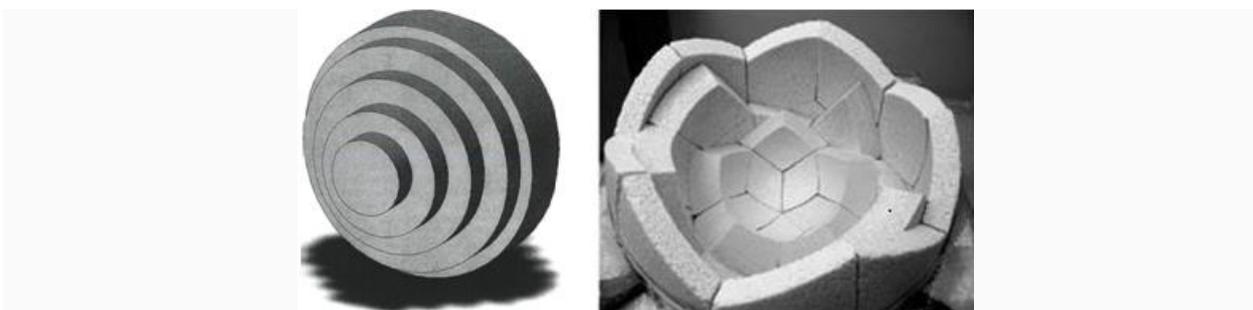


Рис. 1. Варианты выполнения линзы Лüneберга

Однако в большинстве работ рассматривается и используется только одно применение радиолинз – формирование одного или нескольких лучей с узкой диаграммой направленности, в то время как остается не исследованным оптический способ передачи информации в других областях электромагнитного спектра. Таким способом является использование законов геометрической оптики в радиодиапазоне. Определить этот способ

можно термином «оптическое радио», который впервые был использован Нобелевским лауреатом Н.Г. Басовым в 1961 году [15]. К настоящему времени продвижение радиоэлектроники в высокочастотную область электромагнитного спектра достигло такого уровня, когда можно начинать практическое освоение оптического радио.

При переходе из оптики в видимой части электромагнитного спектра к оптическому радио в радиодиапазоне изменяются только размеры и материал линзы и размеры приемника (приемной матрицы).

Передачик в оптическом радио является массивом  $N$  передатчиков, излучающих сигналы на одних и тех же частотах. В каждом канале могут использоваться любые методы модуляции и мультиплексирования. Антенны также могут быть любые, но, если используются направленные антенны, диаграммы направленности у них должны совпадать по направлению.

Приемник представляет собой массив  $N$  приемников, работающих в паре со своим передатчиком и образующих  $N$  каналов связи. Основным элементом массива является радиолинза, формирующая радиоизображение матрицы антенн передатчиков в плоскости матрицы антенн приемников. В соответствии с законами геометрической оптики при правильном выборе соотношения длины волны и размера линзы и правильной юстировке системы в каждую антенну приемника попадает излучение только одного передатчика.

Особенности оптического радио:

- в одном частотном канале в одной области пространства можно организовать множество каналов передачи информации на одной и той же несущей, не интерферирующих друг с другом;
- чувствительность приемника определяется площадью линзы, а для преобразования энергии излучения, собираемого линзой, в электрический сигнал во входной цепи приемника достаточно элементарной антенны – ячейки приемной матрицы;
- матрица антенн передатчиков может состоять из направленных антенн с большим коэффициентом усиления, матрица антенн приемников – из элементарных ненаправленных антенн;
- основной вид связи – в пределах прямой видимости (возможно использование принципа перископа);
- необходима юстировка системы, чтобы в антенну каждого приемника попадал сигнал нужного передатчика.

Возможные области применения:

- многоствольные радиорелейные линии (РРЛ), работающие на одной частоте (Пример возможной реализации на серийном оборудовании РРЛ 38 ГГц: 9 передающих антенн диаметр 30 см собраны в массив 3x3 как прожекторы на стадионе. Аналогично собраны антенны приемников. Перед массивом приемников установлена радиолинза диаметром около 1 метра, поэтому излучение каждой антенны передатчика попадает только на одну антенну приемника, а интерференция отсутствует. В результате 9 стволов работают на одной частоте);
- каналы связи между стационарными узлами (базовые станции, киоски данных в сетях 6G);
- радиотелескопы;
- радиолокаторы.

### Заключение

Основным элементом оптического радио является радиолинза, при этом в отличие от апертурной антенны традиционного радио она используется для формирования радиоизображения, проецируемого на массив элементарных антенн. Это дает возможность организовать в одном пространственном канале большое число радиоканалов, работающих на одной несущей с независимым выбором способов модуляции и ширины используемого спектра. Ограничением оптического радио является необходимость прямой видимости, но это является условным недостатком. С одной стороны, в широко используемых радиорелейных линиях, например, необходима не только прямая видимость, но и очень точная (до долей градуса) юстировка антенн. С другой стороны, человек получает основной объем информации с помощью зрения и не считает недостатком этого способа необходимость смотреть в том направлении, откуда получает информацию. Поэтому можно полагать, что с развитием высокоскоростных направленных способов передачи информации в сетях 6G (оптического радио) необходимость сохранения прямой видимости перестанет восприниматься как недостаток.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.*

### Литература

1. Молотков С.Н. О сверхсветовой групповой скорости и передаче информации. Письма в ЖЭТФ. - 2010. - Т. 91. - № 12. - С. 762-768.
2. Ощепков П. К. Интроскопия / П. К. Ощепков, А. П. Меркулов; ред. А. А. Красновский. – Москва: Знание, 1967. – 48 с.
3. Ирисова Н. А. Радиовидение наземных объектов в сложных метеоусловиях / Н.А. Ирисова, Ю. П. Тимофеев. - М., 1969.
4. Фридман С.А. Люминесценция позволяет видеть невидимое / С.А. Фридман. - Природа. – 1975. - № 1.
5. Дмитриев А.С. Экспериментальная модель многолучевого устройства для наблюдения в радиосвете /А.С. Дмитриев, М.М. Петросян, А.И. Рыжов// Письма в ЖТФ. – 2021. – Т.47, вып. 12. - С. 38-41. DOI: 10.21883/PJTF.2021.12.51066.18762.
6. Дмитриев А. С. Радиоосвещение на основе сверхширокополосных генераторов динамического хаоса / А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, М Ю. Герасимов, В.В. Ицков // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т.61. - № 11. - С. 1073–1083. DOI: 10.7868/S0033849416110024.
7. Karanam C. R. 3D Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi / C.R. Karanam, Y. Mostofi // 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). - 2017. - P. 131-142.
8. Korany B. Adaptive Near-Field Imaging with Robotic Arrays / B. Korany, C.R. Karanam, Y. Mostofi // IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2018.
9. Ивашов С.В. Использование генераторов шума в радиометрических системах для обнаружения скрытых объектов / С.В. Ивашов, А.С. Бугаев // Радиотехника и электроника. – 2013. - Т. 58, № 9. - С. 935-942 DOI: 10.7868/S0033849413090052.
10. Thompson A.R. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy / A. R. Thompson, J.M. Moran, G.W. Swenson // 3rd Edition, 2017. DOI:10.1007/978-3-319-44431-4.

11. Панченко Б.А. Дифракционные характеристики линзы Люнеберга для поля круговой поляризации/ Б.А. Панченко, Д.В. Денисов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2013. - Т. 16, № 4.
12. Кусайкин Д.В. Оценка канала в системах 5G ММО-OFDM с многолучевыми линзовыми антеннами /Д.В. Кусайкин, Д.В. Денисов // Вестник СибГУТИ.– 2021. - № 4.
13. Панченко Б.А., Пономарев О.П., Денисов Д.В. Быстрый расчет характеристик рассеяния линзы Люнеберга // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». - 2017, № 2. - С.21-25. DOI:10.38013/2542-0542-2017-2-21-25.
14. Денисов Д. Высокоточные линзовые антенны Люнеберга. <https://nag.ru/material/28514> .
15. Басов Н.Г. На пути к оптическому радио / Н.Г.Басов // Наука и жизнь. - 1961. - №7. <https://www.nkj.ru/archive/articles/42954/>.

## OPTICAL RADIO

*A. L. Timofeev, A. Kh. Sultanov, I. K. Meshkov, A. R. Gizatulin*

Ufa University of Science and Technology  
32, Z. Validi St, Ufa, 450076, Russian Federation

**Abstract.** Transmission of information using electromagnetic radiation occurs in two main ways - optical (in the visible part of the spectrum) and radio (in the long-wave part of the spectrum). These methods are fundamentally different from each other. The vision of living beings and all image recording techniques, starting with photography, are based on the optical method. Although vision and photography are not usually referred to as the process of transmitting information, in fact it is a parallel transfer of information from the region of space in which the observed object is located to the region of perception - to the retina of the eye or the photo matrix of the camera. Radio method is the serial transmission of information between two points. If it is necessary to organize several communication channels in one area of space, the problem of their interference in the receiving antenna arises. The main way to solve this problem is frequency division, the capabilities of which are always limited by the width of the allocated frequency range. To further increase the number of channels in conditions of scarce frequency resources, time, phase and code division of channels is used. The third method is optical radio. Optical radio is the use of the laws of geometric optics in the radio range. When moving to another wavelength, only the dimensions of the lens and the dimensions of the receiver (receiving matrix) change. The main element of optical radio is the radio lens, and unlike the aperture antenna of a traditional radio, it is used to form a radio image projected onto an array of elementary antennas. This makes it possible to organize in one spatial channel a large number of radio channels operating on the same carrier with an independent choice of modulation methods and the width of the spectrum used. A limitation of optical radio is the need for line of sight.

**Keywords:** radio lens, radio light, radio image, optical radio.

Статья отправлена в редакцию 30 декабря 2023 г.