

УДК 004.353.254
EDN: MYYCCY

PACS: 07.05.Rm

Система дистанционной беспроводной передачи данных

© С. О. Когновицкий

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021 Россия
E-mail: kogn@mail.ioffe.ru*Статья поступила в редакцию 06.08.2026; после доработки 25.08.2026; принята к публикации 22.10.2026*
Шифр научной специальности: 2.2.6.

Предложен конструктивный облик системы дистанционной беспроводной оптической передачи данных на основе отражающего матричного экрана. Экспериментально подтверждена работоспособность ключевого элемента экрана – ячейки с изменяемой отражательной способностью. Особенностью системы является возможность работоспособности экрана при низких арктических температурах и его энергоэффективность.

Ключевые слова: беспроводная оптическая передача данных, матричный экран, арктические температуры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-111-116

Введение

Предложенная система дистанционной беспроводной передачи данных (далее – Система) предназначена для формирования и дистанционного считывания беспроводным способом телеметрических данных с удалённых автономных объектов, не обладающих долговременными источниками электропитания, в арктических климатических условиях низких температур до минус 70 °С. Одно из основных требований к Системе – низкое потребление электроэнергии при формировании и передаче данных от автономного объекта, удалённого от приёмника данных на расстояние примерно до 1 км. В настоящей работе не затрагивается вопрос первичного формирования телеметрических данных, что является их источником и как они обрабатываются.

Существует большое количество способов и реализующих их устройств беспроводной передачи данных. Это, например, и радиоволновые приёмо-передающие устройства (радиомодемы), и системы атмосферных оптических линий связи, в которых используются

светодиодные или лазерные излучатели. Оптические системы связи, в общем случае, более энергоэкономичны по сравнению с радиочастотными. Известны способы модуляции света для передачи информации, описанные в источниках [1–3]. В России лидером по созданию систем атмосферных оптических линий связи является компания АО «Мостком» [4]. Компания Avant Space запатентовала способ лазерной связи [5], при котором информация из космоса сможет передаваться на Землю по принципу QR-кода [6, 7], что потенциально может увеличить информационную ёмкость канала передачи данных. Принципы и устройства передачи данных с помощью последовательности QR-кодов описаны в источниках [8, 9].

Самыми простыми устройствами, которые могут отображать в оптическом спектральном диапазоне QR-коды, являются светодиодные экраны, а также устройства на основе жидких кристаллов или технологий электронной бумаги. Светодиодные экраны недостаточно энергоэкономичны, т. к. требуют постоянных затрат энергии на генерацию оптического излучения. Экраны на основе

жидких кристаллов более экономичны, но в общем случае их работоспособность снижается в условиях низких температур. Однако, финской компании Lumineq с использованием TFEL-тонкоплёночной электролюминесцентной технологии [10] удалось создать дисплеи с диагональю до 26 см, работоспособные до минус 60 °C [11].

С точки зрения энергоэкономичности и широкого диапазона рабочих температур перспективными являются технологии электронной бумаги. Идеи, заложенные при реализации таких технологий, и прежде всего эффекты Кулоновского взаимодействия заряженных частиц, были использованы в данной работе.

При разработке Системы ставилась задача найти решение, более энергоэкономное по сравнению с существующими системами атмосферных оптических линий связи, и в котором передающая часть может функционировать при арктических температурах.

Описание системы дистанционной беспроводной передачи данных

Предложенная Система, изображённая на рисунке 1, состоит из двух частей – приёмной и передающей. Приёмная часть подключена к источнику электропитания достаточной мощности. Передающая часть расположена на

автономном объекте, лишённом долговременного источника электроэнергии и удалённом от приёмной части на расстояние примерно до 1 км в прямой видимости.

Приёмная часть включает лазер, совмещённый с коллиматором, обеспечивающим на расстоянии до 1 км освещение плоской поверхности площадью 50×50 см с распределением плотности оптического потока на этой поверхности, близким к равномерному. Длина волны излучения лазера должна быть короче 0,9 мкм. Также приёмная часть включает телескоп, в окулярной стороне которого установлена видеокамера, чувствительная к излучению в области спектра лазерного излучения. Чтобы в видимом спектральном диапазоне (например, при длине волны около 550 нм) разрешать с расстояния 1 км точки, отстоящие друг от друга на экране на расстоянии не более 3 мм, в соответствии с критерием Релея достаточно использовать телескоп с диаметром входной апертуры около 200 мм. Видеокамера подключена к электронному модулю, в котором загружена программа, обеспечивающая считывание QR-кодов и их обработку. Такой видеокамерой может являться видеокамера смартфона. Лазерная и телескопическая подсистемы должны быть расположены рядом друг с другом так, чтобы их оптические оси были практически параллельны и направлены на передающую часть Системы.

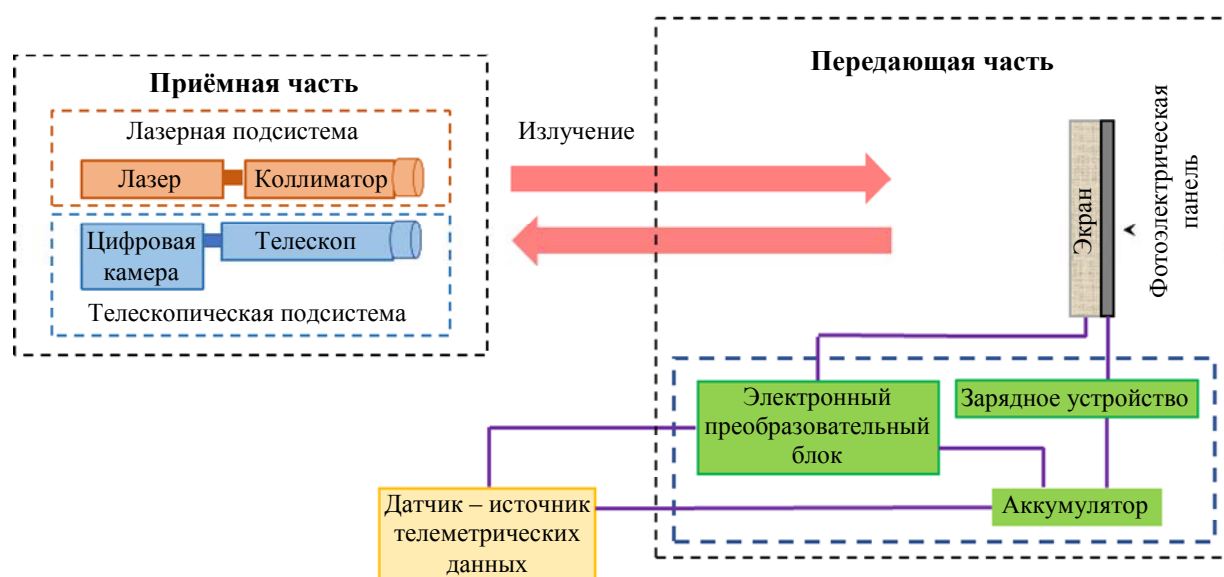


Рис. 1. Структура системы дистанционной беспроводной передачи данных

Передающая часть Системы включает аккумулятор небольшой ёмкости или ионистор с зарядным устройством, электронный преобразовательный блок и первичный источник телеметрических данных (в цифровом виде), подключенные к аккумулятору или ионистору. Программное обеспечение преобразовательного блока передающей части позволяет разбивать весь объём телеметрических данных на группы, объём которых соответствует отдельному QR-коду в версии № 7, и преобразовывать эти группы в «матрицы» электрических сигналов – электрических потенциалов на электродах, соответствующих пикселям QR-кода, принимающим логическое значение 0 или 1. Перечисленные выше составные части передающей части поддерживаются при температуре в рабочем диапазоне, например, путём их помещения в герметичной оболочке в грунт ниже уровня промерзания.

Электронный преобразовательный блок подключен к квадратному экрану размером немного более 50×50 см, который размещается на открытом пространстве над поверхностью земли или автономного объекта и своей лицевой поверхностью обращён в сторону приёмной части. Экран устанавливается таким образом, чтобы его боковые грани имели ориентацию, близкую к вертикальной. Тылная сторона экрана состоит из кремниевой фотоэлектрической панели, подключенной к зарядному устройству. На фотоприёмной (лицевой) стороне панели закреплён однокамерный прозрачный стеклопакет, внутренний объём которого заполнен сухим газообразным азотом. В пространстве между стёклами стеклопакета вплотную друг к другу упорядоченно размещены пустотелые одинаковые параллелепипеды, боковые непрозрачные стенки которых перпендикулярны поверхности стёкол, а в качестве лицевой и тыльной сторон параллелепипедов выступают сами стёкла стеклопакета. Параллелепипеды в плоскости стёкол имеют квадратное сечение с размером немного менее 1×1 см и выстроены

таким образом, что образуют без пробелов 45 строк и 45 столбцов на экране, параллельных соответствующим боковым граням экрана. Горизонтальные грани параллелепипедов выполнены из изолирующих материалов. Вертикальные грани параллелепипедов изготовлены из электропроводящих материалов, поверхность которых покрыта тонким электроизолирующим слоем. Вертикальные грани, находящиеся друг под другом и образующие периодические вертикальные линии в сечении плоскости экрана, электрически соединены между собой и образуют вертикальные линейные электроды. В центре каждого параллелепипеда вертикально закреплена электропроводящая металлическая тонкая ось. Каждая ось электрически подключена к управляющему контакту электронного преобразовательного блока. На оси закреплена вертикально-ориентированная тонкая пластина (шторка) таким образом, чтобы она могла с минимальным трением поворачиваться вокруг своей вертикальной оси. Половина пластины с одной стороны от оси (для определённости – с лицевой стороны экрана) имеет электропроводящее покрытие, которое обладает омическим низкоомным контактом с осью. Горизонтальное сечение пластины симметрично относительно оси, а высота пластины чуть меньше высоты внутреннего пространства параллелепипеда. Длина пластины выбрана таким образом, чтобы при её отклонении к боковой вертикальной грани параллелепипеда она образовывала с ней в горизонтальном сечении угол примерно 30 градусов и перекрывала поток света вдоль параллелепипеда между стёклами стеклопакета. Одна из сторон пластины покрыта чёрной матовой краской (точнее, с большим коэффициентом поглощения применяемого лазерного излучения), а вторая – белой матовой (точнее, с большим коэффициентом рассеяния применяемого лазерного излучения). Фрагмент лицевой стороны информационного экрана изображен на рисунке 2.

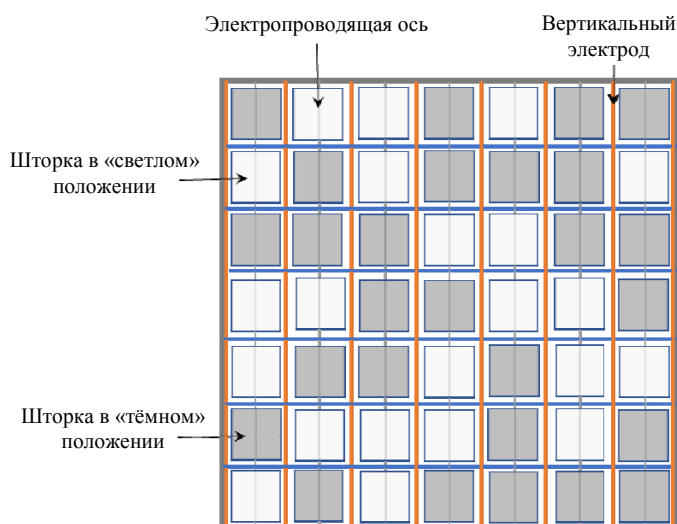


Рис. 2. Схематическое изображение фрагмента лицевой стороны информационного экрана

Функционирование Системы

Система работает следующим образом. Приёмная часть Системы, например, на мобильном транспорте повышенной проходимости доставляется на точку в прямой видимости передающей части так, чтобы передающая часть была обращена к приёмной части своей лицевой стороной. Включается непрерывный лазер из состава принимающей части, направляется на экран передающей части и освещает его в течение некоторого промежутка времени, достаточного для первичной зарядки аккумулятора (ионистора) током от фотоэлектрической панели с помощью зарядного устройства из состава передающей части Системы. После первичной зарядки аккумулятора (ионистора) на соседние вертикальные линейные электроды от электронного блока подаются равные постоянные электрические потенциалы одинаковых знаков, при этом потенциал относительно земли может составлять, например, 300 В. На все шторки через их оси подаётся потенциал того же знака. За счёт действия Кулоновских сил отталкивания между одинаково заряженными электродами подвижные шторки устанавливаются в положение, параллельное вертикальным граням параллелепипедов, пропуская свет лазера на фоточувствительную поверхность фотоэлектрической панели. После дополнительной зарядки аккумулятора (ионистора) энергии аккумулятора должно быть достаточно для приведения в действие датчиков и считывания с них телеметрических данных электронным блоком, а также для обеспечения получения и

передачи телеметрических данных. В случае наличия яркого внешнего освещения, например, солнечного света, падающего на лицевую поверхность информационного экрана, лазер может не использоваться для подзарядки.

После формирования в электронном блоке пакета телеметрических данных и их преобразования с помощью встроенного программного обеспечения начинается передача телеметрических данных в виде формирования на экране последовательности визуальных QR-кодов. Отдельный QR-код формируется следующим образом. На соседние вертикальные линейные электроды от электронного блока подаются постоянные электрические потенциалы противоположных знаков, при этом разность потенциалов может составлять, например, 300 В. Разность потенциалов создаёт электрическое поле между вертикальными гранями параллелепипедов величиной около 30 кВ/м. На все шторки одновременно через их оси подаются переключаемые потенциалы, причём на каждую шторку – потенциал того знака, который за счёт действия сил Кулона поворачивается за промежуток времени менее 0,2 с подвижную шторку в нужном направлении, перекрывая поток лазерного излучения сквозь внутреннее пространство параллелепипеда таким образом, что освещается падающим излучением либо белая сторона шторки, либо чёрная. Таким образом создаётся на экране матрица из белых и чёрных пикселей – QR-код объёмом 2025 бит, из которых полезную информацию, за исключением служебной, будут нести 1568 бит. Последовательные QR-коды формируются на экране с периодич-

ностью не более 0,2 с, обуславливаемой низким быстродействием электромеханической системы шторок, что соответствует скорости передачи полной информации 10125 бит/с, а полезной – 7840 бит/с. За счёт освещения экрана лазерным излучением с заданной расходимостью, обеспечивающей освещение всего экрана, создаётся высокая контрастность изображения пикселей QR-кода.

Энергию, которую необходимо затратить на переключение одной электромеханической ячейки, можно оценить как энергию перезарядки конденсатора с планарными размерами обкладок, соответствующих оптической шторке. В качестве минимального зазора между обкладками примем 0,5 мм, реализуемого в макете, без учёта реальной геометрии зазора, что достаточно для оценки «сверху». В качестве диэлектрической проницаемости будем использовать таковую для сухого азота. С учётом изменения полярности обкладок, используя известную формулу для энергии конденсатора, получим энергию переключения шторки, оцениваемую как 0,43 мкДж. Для переключения одновременно всех шторок потребуется не более 870 мкДж. При переключении QR-кодов с частотой 5 Гц средняя потребляемая мощность составит не более 4,3 мВт, что существенно меньше энергопотребления электролюминесцентных панелей или TFT – ЖК-панелей с аналогичной площадью экрана, а также меньше типичной мощности яркого светодиода (например, FYL-5013UWC/P), который мог бы быть применён для последовательной передачи информации по одиночному атмосферному каналу.

Если одна ячейка будет содержать последовательно (по пути света) три цветных шторки (цвета должны существенно различаться, например, красный, жёлтый и зелёный) и один чёрный фон, т. е. QR-код будет цветным, то информация, заключённая в одном экране (без вычитания служебной информации), увеличится в 4 раза и составит 8100 бит, что может соответствовать скорости передачи данных 5 кБайт/с.

На работоспособность экрана практически не влияет понижение температуры окружающего воздуха из-за отсутствия чувствительных к температуре элементов в составе экрана, за исключением фотоэлектрической панели, эффективность которой только

возрастает при понижении температуры. Единственным препятствием для передачи изображения QR-кода может быть иней на лицевой поверхности стеклопакета, однако эта проблема решается путём прогрева заиндевевшей поверхности лазерным излучением в течение необходимого промежутка времени и испарения влаги.

Приёмная часть устройства за счёт телескопа, видеокамеры и электронного модуля считывает отдельные последовательные QR-коды и с помощью программного обеспечения объединяет полученные данные и восстанавливает телеметрическую информацию. При этом программное обеспечение на передающей и приёмной частях основано на общих алгоритмах формирования и распознавания QR-кодов, что позволяет корректно восстанавливать целевую и служебную информацию.

Заключение

Таким образом, предложена система дистанционной беспроводной передачи телеметрической информации, которая может осуществляться при экстремально низких температурах.

Для демонстрации реализуемости системы была изготовлена единичная информационная ячейка, включающая два параллельных электрода, между которыми была закреплена подвижная электропроводящая шторка. Экспериментально было продемонстрировано перекрытие светового потока сквозь ячейку за счёт поворота непрозрачной шторки при приложении к электродам и шторке соответствующих электрических потенциалов. Созданная ячейка, будучи помещённой в сухую газовую атмосферу, сохраняет работоспособность при крайне низких температурах. С использованием принципа мультипликации на основе информационных ячеек может быть изготовлен и информационный экран, являющийся ключевой частью предложенной системы дистанционной беспроводной передачи телеметрической информации.

Автор выражает искреннюю признательность Максиму Зиновьевичу Шварцу, заведующему лабораторией Фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. А. Ф. Иоффе, за полезное обсуждение материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левченко О. И., Родионов М. К. и др. Модулятор света. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 682858 (РФ). 1976.
2. Новиков М. А., Лукьянов А. Ю., Ромашов В. Н. Электрооптический модулятор света на продольном эффекте Поккельса. Патент на изобретение № 2029977 (РФ). 1991.
3. Игнатов А. И. / Современная электродинамика. 2024. № 2 (10). С. 4–10.
4. <https://moeckom.ru/ru/стационарные-терминалы/>
5. Оссовский А. В., Малинин А. В., Капустин Э. В., Милов А. Е., Петросян А. Ю. Метод передачи информации из космоса и устройство для его осуществления. Патент на изобретение № 2755444 (РФ). 2020.

6. Алгоритм генерации QR-кода. <https://habr.com/ru/articles/172525/>
7. Передача данных через анимированные QR на Gomobile и GopherJS. <https://habr.com/ru/articles/430688/>
8. Калинин Н. Р., Быков А. А. Передача данных с помощью последовательности QR-кодов. Современные технологии проектирования программного обеспечения. – Муромский Институт Владимирского Государственного Университета, 2019. ВКР. С. 454–456.
9. Баэ Со Воон, Ким Бюн Сун, Ян Сун Хо. Устройство и способ для автоматического распознавания QR-кода. Патент на изобретение № 2543569 (РФ). 2012.
10. АО «Компонента» / Журнал «ИСУП» (Информатизация и системы управления в промышленности). 2016. № 5 (65).
11. www.lumineq.com

PACS: 07.05.Rm

Remote wireless data transmission system

S. O. Kognovitskii

Ioffe Institute, Saint-Petersburg, 194021 Russia
E-mail: kogn@mail.ioffe.ru

Received 06.08.2026; revised 25.08.2026; accepted 22.10.2026

A construct of a remote wireless optical data transmission system based on a reflecting matrix screen is proposed. The operability of the key element of the screen – a cell with a variable reflectivity – has been experimentally confirmed. A feature of the system is the ability to operate the screen at low arctic temperatures and its energy efficiency.

Keywords: wireless optical data transmission, matrix screen, arctic temperatures.

REFERENCES

1. Levchenko O. I., Rodionov M. K., et al. Modulator of light. The invention to the author's certificate № 682858 (SU) 1976.
2. Novikov M. A., Luk'yanov A. Yu., and Romashov V. N. Elektroopticheskiy modulator sveta na prodol'nom effekte Pokkel'sa. Patent for invention № 2029977 (RU) 1991.
3. Ignatov A. I., Modern Electrodynamics, № 2 (10), 4–10 (2024) [in Russian].
4. <https://moeckom.ru/ru/стационарные-терминалы/>
5. Ossovskiy A. V., Malinin A. V., Kapustin E. V., Milov A. E., and Petrosian A. Yu. Metod peredachi informatsii iz kosmosa i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya. Patent for invention № 2755444 (RU) 2020.
6. Algoritm generatsii QR-koda. <https://habr.com/ru/articles/172525/> [in Russian].
7. Peredacha dannykh cherez animirovannye QR na Gomobile i GopherJS. <https://habr.com/ru/articles/430688/> [in Russian]
8. Kalinin N. R. and Bykov A. A. Peredacha dannykh s pomoshch'yu posledovatel'nosti QR-kodov. Sovremennye tekhnologii proektirovaniya programmnogo obespecheniya. Final qualification work MIVLGU, 454–456 (2019) [in Russian].
9. Bae S. V., Kim B. S., and Yan S. Kh. Ustroystvo i sposob dlya avtomaticheskogo raspoznavaniya QR-koda. Patent for invention № 2543569 (RU) 2012.
10. JSC «Komponenta». ISUP, № 5 (65), 2016.
11. www.lumineq.com

Об авторе

Когновицкий Сергей Олегович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, Санкт-Петербург, Россия). E-mail: kogn@mail.ioffe.ru AuthorID: 23354