

МЕТОД РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ LI-FI-СВЯЗИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Н. Н. БОГДАНОВ, И. С. ПОТЕМИН, Д. Д. ЖДАНОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nnbogdanov@itmo.ru*

Рассматривается проблема проектирования оптических систем кругового излучения с несколькими разнонаправленными источниками для устройств беспроводной связи Li-Fi между транспортными средствами. Предложена модификация метода соответствия входных и выходных лучей для задачи проектирования оптических элементов Li-Fi-модуля путем введения интегральной модели источника. Представлены результаты расчета и виртуального прототипирования устройств, рассчитанных по предложенной методике.

Ключевые слова: *неизображающая оптика, поверхности свободной формы, оптические беспроводные линии связи, Li-Fi*

Введение. В настоящее время увеличение количества транспортных средств на дорогах вызывает определенные проблемы управления движением. Уже в 2014 г. мировой автопарк насчитывал более 1,25 млрд автомобилей [1]. С увеличением количества транспортных средств растет и число несчастных случаев. Согласно докладу Всемирной организации здравоохранения ежегодно более 1,2 млн человек погибают в дорожно-транспортных происшествиях и еще 20—50 млн получают травмы [2]. Для предотвращения аварий и уменьшения трафика необходимо сделать транспортную систему интеллектуальной.

Одной из особенностей интеллектуальной транспортной системы (ИТС) является связь между автомобилями (Vehicle to Vehicle Communication — V2V). Технология связи V2V позволяет транспортным средствам транслировать и принимать сигналы по всем направлениям (до 10 раз в секунду), создавая „осведомленность“ о других транспортных средствах на 360° [3, 4]. К возможным передаваемым сообщениям можно отнести: скорость автомобиля, его положение и направление движения; изменение полосы движения; информацию относительно контроля устойчивости и контроля тяги; информацию о системе торможения и антиблокировочной тормозной системе. Не менее важной сферой разработок для ИТС являются автономные автомобили или, другими словами, беспилотные автомобили [5]. Для того чтобы транспортное средство стало автономным, необходимо оценивать обстановку на дороге во время движения и отслеживать другие автомобили поблизости, для этого необходим обмен информацией между ними. Таким образом, поддержание связи транспортных средств является важной частью обеспечения их автономности.

На сегодняшний день существуют многочисленные исследовательские работы, посвященные различным видам связи между транспортными средствами. К наиболее распространенным и глубоко изучаемым относятся виды связей, базирующихся на беспроводной технологии 5,9 ГГц DSRC [6—9], беспроводных динамических сетях (Ad-Hoc Network) [8, 9] и на технологии Li-Fi [10—12]. Технология Li-Fi использует видимые или невидимые оптические беспроводные каналы связи, которые обеспечивают высокоскоростную передачу данных с низкой задержкой через пространственно определенные каналы, что позволяет проектировать сотовые сети и уменьшать межканальные помехи. В последнее десятилетие быстро развивались различные аспекты технологии Li-Fi: были исследованы разные схемы модуляции [13], разработаны новые излучатели [14] и изучена интеграция Li-Fi в существующие

сети [15]. Для связи автомобилей с помощью Li-Fi в ряде работ предлагается использовать осветительное оборудование на передней и задней частях автомобилей, а также интегрировать его в светофоры [16—20]. В этих исследованиях внимание акцентируется на электрических цепях и общих схемах построения сетей коммуникации.

Однако несмотря на активное развитие Li-Fi-технологии и попытки ее использования для беспроводной связи автомобилей, современная методология оптического проектирования для Li-Fi практически не рассматривалась. Как правило, используются простые сферические линзы как для источника излучения, так и для приемника. Но такие линзы не могут в полной мере соответствовать современным тенденциям, таким как миниатюризация Li-Fi-трансиверов для их интеграции в другие устройства. Уменьшение размеров оптики напрямую влияет на характеристики такого рода устройств, например мощность принимаемого сигнала. Использование оптических систем с поверхностями свободной формы позволит компенсировать снижение характеристик Li-Fi-трансиверов при разработке компактных конструкций, адаптированных для конкретного применения.

Немногочисленные работы посвящены методам проектирования преломляющих оптических систем с поверхностями свободной формы для источников и приемников излучения в системах связи Li-Fi. Потенциал такой современной оптики демонстрируется, в частности, в работах [21, 22]. В публикациях, связанных с расчетом поверхностей свободной формы, используется метод соответствия лучей [23, 24]. Гибридная оптическая система, основным достоинством которой является использование одной оптики для источника и приемника, предложена в работе [25]. Авторы оценивают потери сигнала при смещении приемника на некоторое расстояние от источника и сравнивают предложенную оптическую систему с конструкцией, в которой источник и приемник разделены и каждому соответствует своя оптическая система со сферическими поверхностями. Предложенные в этих работах оптические системы имеют ряд недостатков, а именно:

- узкий диапазон поля зрения оптической системы приемника составляет половинный угол излучения (17°), системы работают при небольшом смещении приемника относительно оптической оси источника;

- применение одной комбинированной системы не обеспечивает передачу и прием сигнала во всех направлениях в горизонтальной плоскости, что необходимо для реализации полноценной связи между автомобилями;

- отсутствует возможность обеспечить излучение на 360° в горизонтальной плоскости;

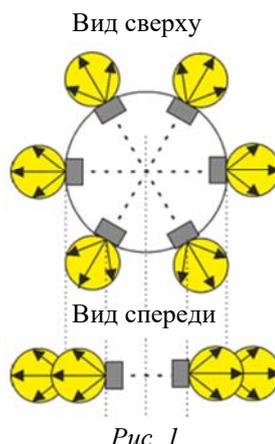
- оптические системы не проверялись на работоспособность при больших дистанциях, которые могут соответствовать расстояниям между автомобилями при их коммуникации по технологии Li-Fi.

В настоящей статье предлагается метод проектирования гибридных оптических систем, излучающих и принимающих излучение во всех направлениях в горизонтальной плоскости, а также приводится пример использования таких систем для связи между автомобилями по технологии Li-Fi.

Исходная оптическая схема. Как упоминалось ранее, передача сигнала должна осуществляться по всем направлениям в горизонтальной плоскости, одновременно с этим должен быть возможен и прием сигнала фотодетектором с любого направления в горизонтальной плоскости. Применение одного источника излучения накладывает ограничения на мощность передаваемого сигнала, поэтому для формирования более мощного сигнала необходимо использовать несколько источников. Предлагаемая схема расположения источников и их ориентации представлена на рис. 1.

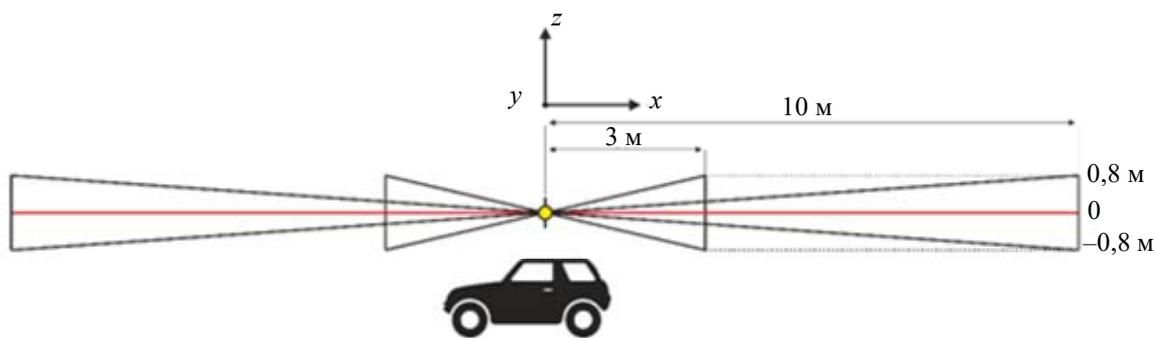
В качестве источников излучения рассматриваются светодиоды. Центры источников расположены на окружности некоторого радиуса, определяемого требованиями к габаритам устройства. Угловая ориентация отдельных источников излучения определяется общим ко-

личеством источников, участвующих в формировании диаграммы направленности выходного излучения во всех направлениях (на 360°) в горизонтальной плоскости.



В такой системе возможна как горизонтальная, так и вертикальная ориентация фотоприемника, что позволяет принимать сигнал со всех направлений. В данной работе рассматривается горизонтальный вариант размещения фотодетектора.

Проектируемую оптическую систему предлагается размещать на крыше автомобиля для обеспечения возможности передачи и приема сигнала на 360° . Исходя из размеров легковых автомобилей и диапазона расстояний, при которых должна функционировать Li-Fi-система, можно определить поле зрения для источника и приемника сигнала. Диапазон высот легковых автомобилей составляет 1300—2100 мм [26]. В рамках данного исследования минимальное расстояние между автомобилями принято равным 3 м, максимальное — 10 м. Данные дистанции, при которых можно избежать столкновения транспортных средств, определены в соответствии с рекомендациями автоэкспертов и правилами дорожного движения [27, 28]. Графически диапазон работы системы можно представить схемой, приведенной на рис. 2. Исходя из этого можно определить требуемый максимальный угол излучения в вертикальном сечении, при котором излучение будет распространяться в заданном диапазоне. В данном случае половинный угол излучения составляет 15° .



Исходные конструкции оптических систем для излучателя и приемника представлены на рис. 3. Предполагаемая схема проектируемого оптического элемента для излучателя (см. рис. 3, а) включает две рабочие поверхности: первая — цилиндрическая, вторая — поверхность свободной формы. Источники света размещаются по окружности и ориентированы под определенным углом. Количество источников может быть от 6 и более; максимальное количество определяется исходя из габаритных размеров источников и ограничений на габаритные размеры оптической системы. Предполагаемая схема оптического элемента для приемника (см. рис. 3, б) включает в себя две поверхности свободной формы. Фотодетектор размещается по центру оптической системы.

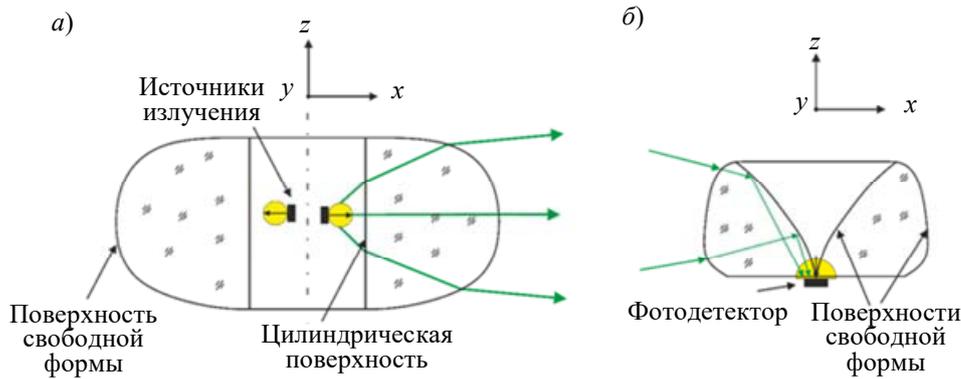


Рис. 3

Модифицированный метод соответствия лучей. Интегральная модель источника излучения. Классический метод соответствия лучей эффективно работает при одном точечном ламбертовском источнике излучения. Сила света таких источников пропорциональна косинусу угла между нормалью к излучающей поверхности и направлением излучения. Световой поток в диапазоне углов φ_1 — φ_2 и α_1 — α_2 , излучаемый таким источником, вычисляется по формуле [29]

$$\Phi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I(\alpha) \sin \alpha \cdot d\alpha, \quad (1)$$

где $I(\alpha) = I_0 \cos \alpha$ — сила света, I_0 — сила света в направлении ($\alpha = 0$), перпендикулярном к излучающей поверхности светодиода; в случае полного светового потока азимутальный угол φ изменяется в диапазоне $[0; 2\pi]$, полярный угол α — в диапазоне $[0; \pi/2]$.

Система координат, используемая в выражении (1), представлена на рис. 4, когда излучающая поверхность источника параллельна горизонтальной плоскости, а полярная ось направлена в зенит. При таком расположении максимальное значение силы света I_0 будет соответствовать вертикальному направлению.

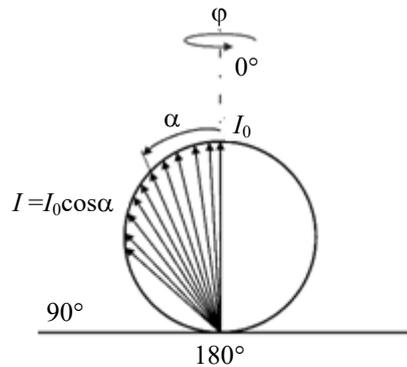


Рис. 4

Однако согласно предлагаемой конструкции оптической системы и расположению нескольких источников излучения максимальная сила света должна соответствовать направлениям, лежащим в непосредственной близости к плоскости горизонта, как показано на рис. 3, а (стрелки указывают направление, соответствующее максимальной силе света I_0). Но при такой ориентации ось вращения кривой силы света (КСС) источника света по углу φ перпендикулярна оси вращения КСС по углу φ' устройства передатчика Li-Fi-модуля в целом (см. рис. 5).

Наличие нескольких разнонаправленных источников излучения делает невозможным применение метода соответствия лучей без его изменения. Для модификации базового метода соответствия входных и выходных лучей предлагается ввести новое понятие — интегральная модель источника, которая объединяет все разнонаправленные источники излучения в единый источник.

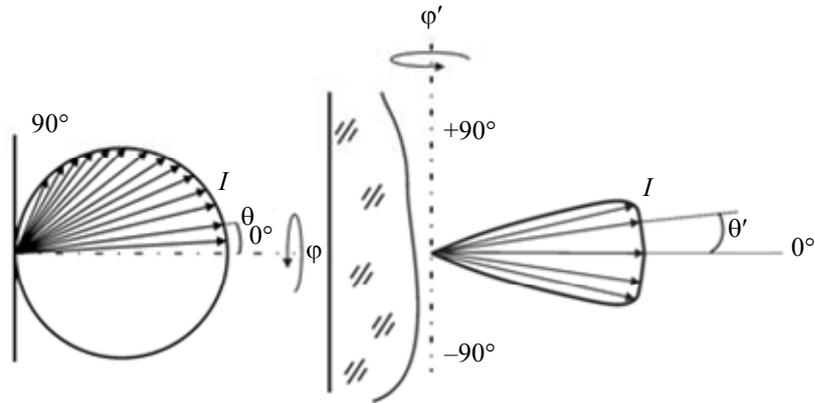


Рис. 5

Интегральная модель источника представляет собой табличную функцию, в которой для всех направлений θ и φ определена интенсивность излучения. Формирование табличной функции осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит модификация координат каждого источника излучения таким образом, чтобы направление оси вращения источника совпадало с осью вращения КСС выходного излучения, а углы θ отсчитывались от плоскости горизонта, где направление излучения в плоскости горизонта будет соответствовать углу $\theta = 0^\circ$, в направлении зенита — $\theta = +90^\circ$, в направлении надир — $\theta = -90^\circ$ (см. рис. 6).

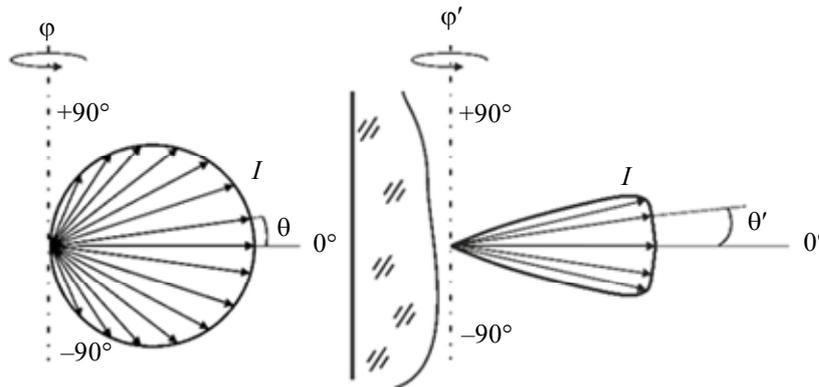


Рис. 6

В результате модификации системы координат источника формула (1) для вычисления светового потока в заданном диапазоне углов примет следующий вид:

$$\Phi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta, \varphi) \cos \theta \cdot d\theta, \quad (2)$$

где $I(\theta, \varphi) = I_0 \cos \theta \cdot \cos \varphi$; в случае полного светового потока азимутальный угол φ изменяется в диапазоне $[-\pi/2; +\pi/2]$, угол возвышения θ — в диапазоне $[-\pi/2; +\pi/2]$.

На втором этапе производится суммирование интенсивностей излучения по всем направлениям. На диаграмме (рис. 7) представлен диапазон углов φ' для оптической системы кругового излучения и диапазоны углов φ для каждого источника света (ИС). Диаграмма показывает, направления излучения каких источников совпадают для каждого угла φ' системы кругового излучения. При совпадении направлений интенсивности излучения каждого из источников будут суммироваться. Например, в диапазоне углов φ' от 0 до 30° суммарная сила света системы кругового излучения складывается из сил света источников 1, 2, 6, так как каждый из них излучает свет в направлениях, соответствующих данному диапазону углов φ' ; и т.д. для всех диапазонов. В результате формируется табличная функция $I(\theta, \varphi)$ для системы.

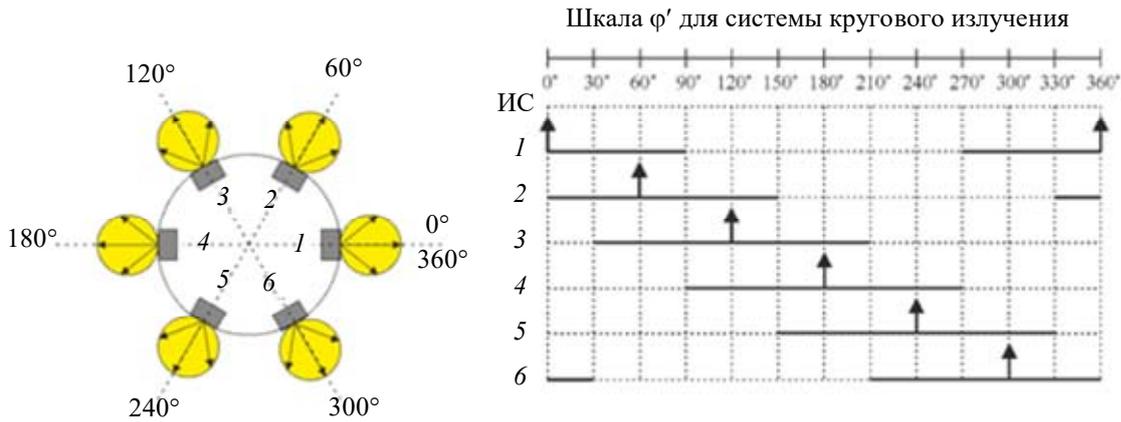


Рис. 7

Фотометрическое тело системы кругового излучения задается табличной функцией, для всех направлений θ' и φ' определяется интенсивность излучения. Световой поток вычисляется по формуле (2), где $I(\theta, \varphi)$ — табличная функция, азимутальный угол φ изменяется в диапазоне $[0; 2\pi]$, угол возвышения θ — в диапазоне $[-\pi/6; +\pi/6]$.

После определения требуемого фотометрического тела необходимо провести его сегментацию — разделение на несколько равных световых потоков. Данная операция требуется для определения соответствующих границ для углов φ, θ , в направлении которых излучается световой поток.

Световой поток Φ , излучаемый в диапазоне углов $\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2$, вычисляется по формуле (2). Для вычисления интеграла предварительно назначаются граничные значения диапазонов углов φ, θ и определяется подынтегральная табличная функция $I(\theta, \varphi)$. Далее необходимо определить, на какое количество сегментов следует разделить фотометрическое тело. Если по углу θ количество сегментов будет N , а по углу φ — M , то элементарные потоки будут следующими:

$$\Phi_n = \frac{\Phi}{N}, \quad \Phi_m = \frac{\Phi}{M}.$$

Для определения соответствующих углов, в которых заключены потоки Φ_n и Φ_m , необходимо выполнить вычисление двух интегралов, предварительно назначив шаги $d\varphi, d\theta$:

$$\Phi'_n = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I(\theta, \varphi) \cos \theta \cdot d\theta,$$

$$\Phi'_m = \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta, \varphi) \cos \theta \cdot d\theta.$$

Значение Φ'_n сравнивается с Φ_n , в случае когда оно равно или близко к искомому, текущий угол θ_{i+1} фиксируется, в ином случае к текущему углу добавляется величина $d\theta$ и интеграл вычисляется вновь.

После завершения сегментации как фотометрического тела источника света, так и заданного фотометрического тела устройства в целом проводится формирование массивов входных и выходных лучей с одинаковым разрешением $M \times N$ (рис. 8). Под элементами массива подразумеваются лучи света с соответствующей ориентацией в пространстве (углы θ, φ). Каждому входящему лучу с индексами i, j и направлением θ, φ соответствует выходной луч с таким же индексом (i, j) и направлением θ', φ' . Для построения поверхности необходимо провести ряд вычислений для каждого элемента массива лучей и выполнять этот процесс последовательно от элемента к элементу. Массив лучей можно обходить по строкам или столбцам,

например, для каждого φ вычислять координаты вершин поверхности для всех углов θ в диапазоне $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$.

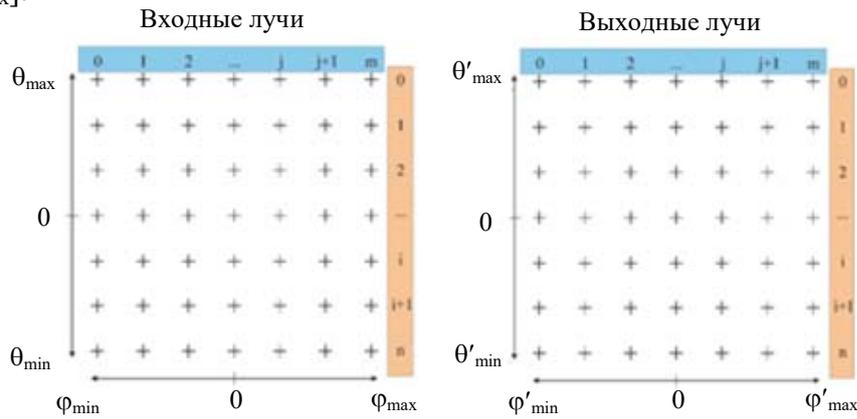


Рис. 8

Построение поверхности свободной формы. Рассмотрим оптический путь луча через две преломляющие поверхности (рис. 9, здесь n_1, n_3 — показатели преломления воздуха, n_2 — показатель преломления оптического материала).

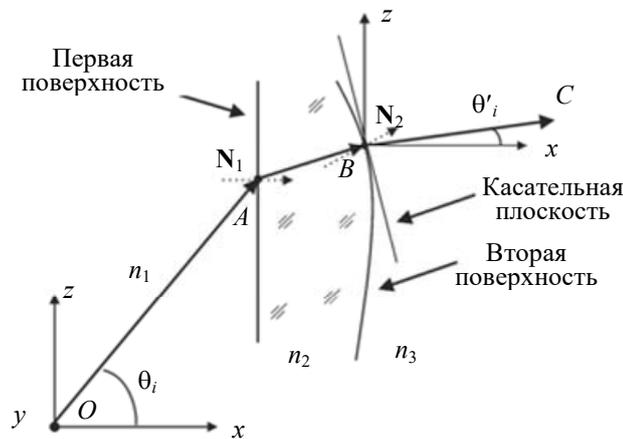


Рис. 9

Первая поверхность преломляет падающий луч OA (с углом падения θ_i) в луч AB . Вторая поверхность преломляет луч AB в луч BC (θ'_i). Преломление на первой поверхности определяется законом преломления Снеллиуса. Для определения координат вершины второй поверхности необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (p - p_0) \cdot \mathbf{N} &= 0, \\ p &= p_1 + st; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$p_1 \cdot \mathbf{N} + st \cdot \mathbf{N} - p_0 \cdot \mathbf{N} = 0; \quad (4)$$

$$t = \frac{(p_0 - p_1) \cdot \mathbf{N}}{\mathbf{s} \cdot \mathbf{N}}, \quad (5)$$

$$p = p_1 + st. \quad (6)$$

Уравнения (3)—(6) поясняются рис. 10, *a*, где показано пересечение луча с поверхностью. Точка p_1 принадлежит первой поверхности, точка p_0 — второй поверхности, \mathbf{N} — нормаль в точке p_0 , \mathbf{s} — единичный вектор, t — скаляр, определяющий расстояние до точки p , которая неизвестна и принадлежит второй поверхности.

На рис. 10, *б* показаны точки A_0 и B_0 , которые соответствуют точкам p_1 и p_0 на предыдущей схеме (см. рис. 10, *a*). Координаты точки A_0 определяются путем пересечения крайнего луча и первой поверхности, координаты точки B_0 назначаются произвольно, но так, чтобы толщина оптического элемента была не нулевой. Ориентация нормали \mathbf{N}_{20} в точке B_0

назначается произвольно. Для определения координат точки B_1 , которая соответствует точке p на предыдущей схеме, решается система уравнений (3). В результате точка B_1 будет соответствовать точке p_0 . Таким образом определяются все координаты точек профиля искомой поверхности для одного сечения, после чего вычисления повторяются для каждого из углов φ и вычисляются координаты вершин поверхности свободной формы.

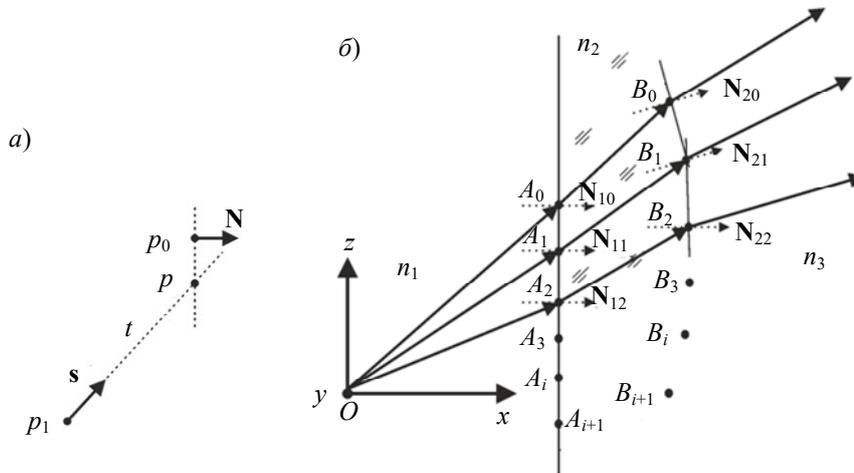


Рис. 10

Реализация метода. В соответствии с разработанным методом была реализована программа на языке программирования Python, с помощью которой рассчитана оптическая система, передающая оптический сигнал. Для расчета оптической системы фотоприемника использован метод, ранее описанный авторами в работе [30], согласно которому рассчитывается профиль поверхности свободной формы, а затем путем вращения профиля на 360° формируется трехмерная модель.

Оптическое моделирование проводилось с использованием гибридного программного комплекса Lumisert [31], при этом учитывались френелевские отражения на оптических поверхностях. В качестве излучателей использованы инфракрасные светодиоды Osram SFH 4170S A01 [32] с оптической мощностью 1400 мВт каждый. В модели приемного устройства использован фотодиод Hamamatsu S10784 [33].

Разработанные оптические системы представлены на рис. 11. В модели использовались 12 протяженных источников света с ламбертовской диаграммой распределения силы света. Диаграммы ориентированы таким образом, что угол между направлениями, определяемыми максимальной силой света соседних источников, составляет 60° . Излучение по каждому направлению обеспечивается двумя источниками. Оптическая мощность каждого из них равна 1400 мВт. Количество источников подбиралось исходя из условия обеспечения минимального уровня сигнала на фотодиоде при максимальной дистанции. Рассчитанные оптические системы представляют собой полигональные объекты в формате „obj“, который используется в CAD системах [34].

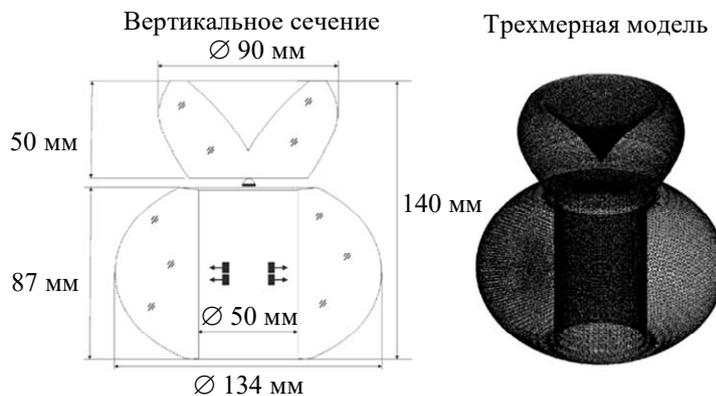


Рис. 11

Был проведен ряд виртуальных экспериментов, в ходе которых дистанция (D) между системами Li-Fi варьировалась в горизонтальной плоскости от 3 до 10 м, а высота (L) изменялась от -800 до $+800$ м. На рис. 12 представлена зависимость мощности принимаемого сигнала (P) для рассчитанной оптической системы с поверхностью свободной формы и широкоугольной сферической оптической системы при их разных положениях в пространстве.

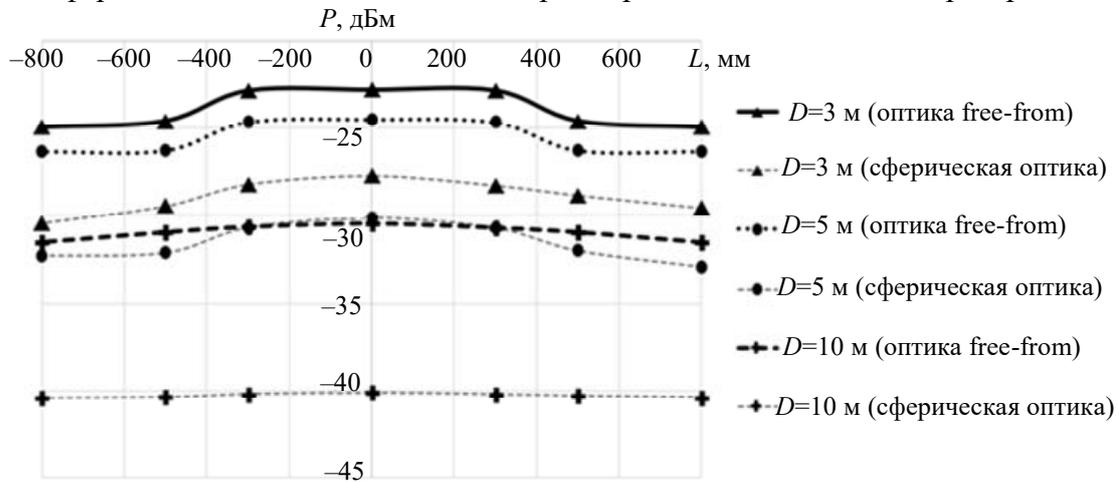


Рис. 12

При $D=3$ м при использовании оптической системы с поверхностью свободной формы уровень принимаемого сигнала не ниже -25 дБм [35]; использование сферической оптики показывает снижение уровня сигнала до -30 дБм при том же пространственном положении. При исследовании уровня сигнала на дистанции 5 м оптическая система с поверхностью свободной формы также показывает лучшие результаты по сравнению со сферической оптикой: -27 и -32 дБм соответственно. При $D=10$ м сферическая оптика показывает низкую работоспособность, уровень сигнала составляет -40 дБм, с другой стороны, оптическая система с поверхностью свободной формы обеспечивает уровень сигнала не ниже -32 дБм. Таким образом, специально разработанные оптические системы с поверхностями свободной формы как для устройства приемника излучения, так и для излучающего устройства показывают хорошую эффективность по сравнению с оптическими системами со сферическими поверхностями.

Заключение. Предложено решение, позволяющее модифицировать метод соответствия входных и выходных лучей для расчета оптических элементов для Li-Fi-модуля путем введения интегральной модели источника. Оптическая система передатчика представляет собой преломляющий оптический элемент с внутренней цилиндрической поверхностью и внешней поверхностью свободной формы. Оптическая система приемника содержит две преломляющие поверхности свободной формы. Разработанные системы могут быть сгруппированы в гибридную оптическую систему, обеспечивая компактное расположение источников и приемника излучения. Произведена оценка мощности принимаемого сигнала для рассчитанных систем и систем со сферической оптикой. Предложенный метод расчета можно применять при проектировании оптических систем с поверхностями свободной формы, используемых в Li-Fi-технологии коммуникации между транспортными средствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valavanidis A. The shift to diesel fuel engines and how the emission scandal of diesel vehicles unfolded. World energy consumption of transportation sector // Scientific Reviews. 2018. Vol. 1. P. 1—26.
2. Всемирная организация здравоохранения. Доклад о глобальной дорожной безопасности [Электронный ресурс]: <https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/report/ru/>, 24.07.2020.
3. Demba A., Möller D. P. F. Vehicle-to-vehicle communication technology // IEEE Intern. Conf. on Electro/Information Technology (EIT). 2018. P. 0459—0464.

4. NHTSA. Vehicle-to-Vehicle Communication [Электронный ресурс]: <<https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/vehicle-vehicle-communication>>, 24.07.2020.
5. *Birdsall M.* Google and ITE: The road ahead for self-driving cars // ITE Journal. 2014. Vol. 84, N 5. P. 36.
6. *Alam M., Ferreira J., Fonseca J.* Introduction to intelligent transportation systems // Intelligent Transportation Systems. Springer, Cham, 2016. P. 11—13.
7. IEEE 1609 - Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) [Электронный ресурс]: <<https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/80>>, 24.07.2020.
8. *Jin W. L.* et al. SPIVC: A Smartphone-based inter-vehicle communication system // Proc. of Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, 22—26 Jan. 2012.
9. *Boukerche A.* et al. Vehicular ad hoc networks: A new challenge for localization-based systems // Computer Communications. 2008. Vol. 31, N 12. P. 2838—2849.
10. *Haas H.* LiFi is a paradigm-shifting 5G technology // Reviews in Physics. 2018. Vol. 3. P. 26—31.
11. *Haas H.* et al. What is lifi? // J. of Lightwave Technology. 2015. Vol. 34, N 6. P. 1533—1544.
12. *Tsonev D., Videv S., Haas H.* Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking // Broadband Access Communication Technologies VIII; Intern. Society for Optics and Photonics. 2014. Vol. 9007. P. 900702.
13. *Islim M. S., Haas H.* Modulation techniques for li-fi // ZTE Communications. 2019. Vol. 14, N 2. P. 29—40.
14. *Ferreira R. X. G.* et al. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications // IEEE Photonics Technology Letters. 2016. Vol. 28, N 19. P. 2023—2026.
15. *Wu X., Safari M., Haas H.* Access point selection for hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks // IEEE Transact. on Communications. 2017. Vol. 65, N 12. P. 5375—5385.
16. *Nachimuthu S., Pooranachandran S., Aarthi B. S.* Design and implementation of a vehicle to vehicle communication system using li-fi technology // Intern. Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2016. Vol. 3, N 05.
17. *Shieh W. Y.* et al. Investigation of vehicle positioning by infrared signal-direction discrimination for short-range vehicle-to-vehicle communications // IEEE Transact. on Vehicular Technology. 2018. Vol. 67, N 12. P. 11563—11574.
18. *Kulkarni S., Darekar A., Shirol S.* Proposed framework for V2V communication using Li-Fi technology // Intern. Conf. on Circuits, Controls, and Communications (CCUBE), IEEE. 2017. P. 187—190.
19. *Yogarayan S.* et al. A comprehensive study of vehicle communication framework in Malaysia // J. of Physics: Conf. Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1502, N 1. P. 012012.
20. *Yeasmin N., Zaman R., Mouri I. J.* Traffic control management and road safety using vehicle to vehicle data transmission based on Li-Fi technology // Intern. Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology. 2016. Vol. 6, N 3/4. P. 1—7.
21. *Kirrbach R., Jakob B., Noack A.* Introducing advanced freeform optic design to Li-Fi technology // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS), Prague, Czech Rep., 25—27 Febr. 2019. P. 248—254.
22. *Kirrbach R., Faulwasser M., Jakob B.* Non-rotationally symmetric freeform fresnel-lenses for arbitrary shaped Li-Fi communication channels // Global LIFI Congress (GLC), IEEE. 2019. P. 1—6.
23. *Wang K.* et al. New reversing design method for LED uniform illumination // Optics Express. 2011. Vol. 19, N 104. P. A830—A840.
24. *Ding Y.* et al. Freeform LED lens for uniform illumination // Optics Express. 2008. Vol. 16, N 17. P. 12958—12966
25. *Kirrbach R.* et al. Monolithic hybrid transmitter-receiver lens for rotary on-axis communications // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, N 4. P. 1540.
26. Размеры: инфосправочник размеров [Электронный ресурс]: <<https://razmery.info/tehnika/auto/razmery-auto.html>>, 24.07.2020.
27. *Коноплянко В. И.* Основы безопасности дорожного движения. М.: ДОСААФ, 1978.

28. Правила дорожного движения Российской Федерации (п.9.10) [Электронный ресурс]: <<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=349012&fld=134&dst=100014,0&rnd=0.46975859142669485#023466116738335852>>, 24.07.2020.
29. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976.
30. Богданов Н. Н., Жданов Д. Д., Потемин И. С. Метод расчета оптического элемента для заградительного огня малой интенсивности // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 640—649.
31. Hybrid Light Simulation Software Lumicept [Электронный ресурс]: <<https://integra.jp/en/products/lumicept>>, 24.07.2020.
32. Osram Opto Semiconductors [Электронный ресурс]: <https://www.osram.com/ecat/OSLON®%20Piccolo%20SFH%204170S%20A01/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_12764899/>.
33. Hamamatsu [Электронный ресурс]: <<https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/S10784/index.html>>.
34. Solid Works [Электронный ресурс]: <<https://www.solidworks.com/ru>>, 24.07.2020.
35. Томаси У. Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007. С. 38, 39.

Сведения об авторах

- Николай Николаевич Богданов** — Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; младший научный сотрудник; E-mail: nmbogdanov@itmo.ru
- Дмитрий Дмитриевич Жданов** — канд. физ.-мат. наук; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; доцент; E-mail: ddzhdanov@mail.ru
- Игорь Станиславович Потемин** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; доцент; E-mail: ipotemin@yandex.ru

Поступила в редакцию
28.05.2020 г.

Ссылка для цитирования: Богданов Н. Н., Потемин И. С., Жданов Д. Д. Метод расчета оптических элементов для устройств Li-Fi-связи транспортных средств // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 727—738.

METHOD FOR CALCULATING OPTICAL ELEMENTS FOR LI-FI COMMUNICATION DEVICES OF VEHICLES

N. N. Bogdanov, D. D. Zhdanov, I. S. Potemin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: nmbogdanov@itmo.ru

The problem of designing optical systems of circular radiation with several multidirectional sources for devices of wireless Li-Fi communication between vehicles is considered. A modification of the ray mapping method for the problem of designing optical elements of a Li-Fi module is proposed by introducing an integral source model. The results of calculations and virtual prototyping of devices designed using the proposed method are presented.

Keywords: nonimaging optics, freeform surfaces, optical wireless communication, Li-Fi

REFERENCES

1. Valavanidis A. *Scientific Reviews*, 2018, vol. 1, pp. 1–26.
2. https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/report/ru/. (in Russ.)
3. Demba A., Möller D.P.F. 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), 2018, pp. 0459–0464.
4. NHTSA. *Vehicle-to-Vehicle Communication*, <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/vehicle-vehicle-communication>.
5. Birdsall M. *Institute of Transportation Engineers*, ITE Journal, 2014, no. 5(84), pp. 36.
6. Alam M., Ferreira J., Fonseca J. *Intelligent Transportation Systems*, Springer, Cham, 2016, pp. 11–13.
7. IEEE 1609 - *Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)*, <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/80>.
8. Jin W.L. et al. *Proceedings of transportation research board annual meeting*, 2012.

9. Boukerche A. et al. *Computer communications*, 2008, no. 12(31), pp. 2838–2849.
10. Haas H. *Reviews in Physics*, 2018, no. 3, pp. 26–31.
11. Haas H. et al. *Journal of lightwave technology*, 2015, no. 6(34), pp. 1533–1544.
12. Tsonev D., Videv S., Haas H. *Broadband Access Communication Technologies VIII. – International Society for Optics and Photonics*, 2014, no. 9007, pp. 900702.
13. Islim M.S., Haas H. *ZTE communications*, 2019, no. 2(14), pp. 29–40.
14. Ferreira R.X.G. et al. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, no. 19(28), pp. 2023–2026.
15. Wu X., Safari M., Haas H. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, no. 12(65), pp. 5375–5385.
16. Nachimuthu S., Pooranachandran S., Aarthi B.S. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2016, no. 05(3).
17. Shieh W.Y. et al. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, no. 12(67), pp. 11563–11574.
18. Kulkarni S., Darekar A., Shirol S. *2017 International Conference on Circuits, Controls, and Communications (CCUBE)*, IEEE, 2017, pp. 187–190.
19. Yogarayan S. et al. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2020, no. 1(1502), pp. 012012.
20. Yeasmin N., Zaman R., Mouri I.J. *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology*, 2016, no. 3/4(6), pp. 1–7.
21. Kirrbach R., Jakob B., Noack A. *Photoptics*, 2019, pp. 248–254.
22. Kirrbach R., Faulwasser M., Jakob B. *2019 Global LIFI Congress (GLC)*, IEEE, 2019, pp. 1–6.
23. Wang K. et al. *Optics Express*, 2011, no. 104(19), pp. A830–A840.
24. Ding Y. et al. *Optics Express*, 2008, no. 17(16), pp. 12958–12966.
25. Kirrbach R. et al. *Applied Sciences*, 2020, no. 4(10), pp. 1540.
26. <https://razmery.info/tehnika/auto/razmery-auto.html>. (in Russ.)
27. Konoplyanko V.I. *Osnovy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* (Road Safety Fundamentals), Moscow, 1978. (in Russ.)
28. <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=349012&fld=134&dst=100014,0&rnd=0.46975859142669485#023466116738335852>.
29. Landsberg G.S. *Optika* (Optics), Moscow, 1976. (in Russ.)
30. Bogdanov N.N., Zhdanov D.D., Potemin I.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 7(63), pp. 640–649.
31. *Hybrid Light Simulation Software Lumicept*, <https://integra.jp/en/products/lumicept>.
32. *Osram Opto Semiconductors*, https://www.osram.com/ecat/OSLON@%20Piccolo%20SFH%204170S%20A01/com/en/class_pim_web_catalog_103489/global/prd_pim_device_12764899/.
33. *Hamamatsu*, <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/S10784/index.html>.
34. *Solid Works*, <https://www.solidworks.com/ru>.
35. Wayne T. *Electronic communications systems*, 5th ed. Saddle River (N.J.), Prentice Hall, 2004.

Data on authors

- | | | |
|----------------------------|---|---|
| Nikolay N. Bogdanov | — | ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; Junior Scientist; E-mail: nnbogdanov@itmo.ru |
| Dmitry D. Zhdanov | — | PhD; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: ddzhdanov@mail.ru |
| Igor S. Potemin | — | PhD; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: ipotemin@yandex.ru |

For citation: Bogdanov N. N., Zhdanov D. D., Potemin I. S. Method for calculating optical elements for Li-Fi communication devices of vehicles. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 8. P. 727–738 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-727-738