



Оценка вероятности регистрации ошибочных символов в канале атмосферной оптической связи на рассеянном излучении в УФ-диапазоне длин волн в условиях дня и ночи

М. В. Тарасенков, С. А. Пешков, Е. С. Познахарев
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН

Рассматривается модель канала атмосферной оптической связи на рассеянном излучении в УФ-диапазоне длин волн. Основу модели составляют алгоритмы метода Монте-Карло локальной и модифицированной двойной локальной оценки для расчета импульсной реакции канала оптической связи. Для диапазона длин волн от 200 до 400 нм в условиях дня и ночи оценивается вероятность регистрации ошибочных символов при кодировании информации временной задержкой между импульсами. Расчеты показывают, что длина волны $\lambda = 295$ нм будет лучше других подходить для организации дальней связи днем, а длина волны $\lambda = 395$ нм – для организации связи ночью с помощью рассмотренной приемной системы.

Ключевые слова: атмосфера, рассеянное лазерное излучение, оптическая связь на рассеянном излучении, УФ-диапазон длин волн, метод Монте-Карло

Статья получена: 03.08.2022
Статья принята: 07.11.2022

Атмосферная оптическая связь на рассеянном излучении – один из активно развивающихся способов передачи информации по открытому

Estimated Bit Error Rate in the Atmospheric Optical Communication Channel Based on Scattered Radiation in the UV-wavelength Range in the Daytime and at Night

M. V. Tarasenkov, S. A. Peshkov, E. S. Poznakharev
Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

A model of the atmospheric optical communication channel based on scattered radiation in the UV wavelength range is considered. The model is based on the Monte Carlo method algorithms for the local and modified double local estimate to calculate the impulse response of the optical communication channel. The bit error rate in the day and at night is estimated for the wavelength range from 200 to 400 nm and information coding using the digital pulse interval modulation (DPIM). The results demonstrate that the wavelength $\lambda = 295$ nm is better to arrange a long-range communication using the receiving system under study in the daytime, whereas the wavelength $\lambda = 395$ nm is better at night.

Keywords: atmosphere, scattered laser radiation, optical communication based on scattered radiation, UV wavelength range, Monte Carlo method

Received on: 03.08.2022
Accepted on: 07.11.2022

The atmospheric optical communication based on scattered radiation is one of the actively developing methods for data transmission over an open atmospheric channel. The first experimental and theoretical works



атмосферному каналу. Первые экспериментальные и теоретические работы по организации этого типа связи были опубликованы в 1960-х гг. в таких работах как [1, 2]. В последние годы в связи с появлением новых лазерных источников, высокочувствительных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и фотодиодов работы по исследованию данного типа связи получили дальнейшее развитие [3]. Преимуществами атмосферной оптической связи на рассеянном излучении являются: 1) ее многоадресность, 2) возможность перестройки канала связи для исключения прерывания сигнала, 3) относительно невысокая стоимость, 4) потенциально высокая скорость передачи информации. Основным недостатком этого типа связи является сильная зависимость ее качества от атмосферных условий. В настоящий момент можно выделить следующие направления использования атмосферной оптической связи на рассеянном излучении: 1) связь в помещениях на малых базовых расстояниях [4,5], 2) наземная связь по открытому атмосферному каналу на базовых расстояниях от десятков метров до десятков километров [6-8], 3) связь с беспилотными летательными аппаратами [9, 10]. В данной статье основное внимание будет уделено наземной атмосферной оптической связи в открытой атмосфере.

В настоящее время опубликовано достаточно много теоретических и экспериментальных работ по организации наземной оптической связи на рассеянном излучении и настоящее время выполнен целый ряд экспериментальных работ [11-15]. В подавляющем большинстве работ используются источники в диапазоне длин волн $\lambda=250-270$ нм. В качестве источников применяются УФ-светодиоды [11, 12], Nd:YAG лазеры [13], лазеры MPL-F-266 [14]. Для приема информации чаще всего используются ФЭУ MP1922 [11, 15] и ФЭУ Hamamatsu R7154 [12, 14]. В большинстве работ рассматриваются базовые расстояния до 100 м (например [11-14]), но есть и работы с большим базовым расстоянием (например до 1000 м в работе [15]). В рамках экспериментальных работ определяются ослабление излучения полезного сигнала, приведенное к децибеллам (path loss), вероятность регистрации ошибочных символов (bit error rate или BER) и длительность принимаемого импульса (pulse width) в зависимости от условий связи.

В рамках теоретических работ [16-21] исследуются качество канала передачи информации в зависимости от оптико-геометрических условий и максимальная скорость передачи информации. Помимо этого, в работах [16-17] предлагается

devoted to arrangement of this type of communication were published in the 1960s in such papers as [1, 2]. In recent years, due to the occurrence of new laser sources, highly sensitive photomultiplier tubes (PMTs), and photodiodes, the studies of this communication type have been further developed [3]. The advantages of atmospheric optical communication based on scattered radiation are as follows: 1) its multiple-address broadcast, 2) possible reconfiguration of the communication channel to eliminate signal interruptions, 3) relatively low cost, 4) potentially high data transmission rate. The main disadvantage of this type of communication is the strong dependence of its quality on the atmospheric conditions. At present, the following areas of using atmospheric optical communication based on scattered radiation can be determined: 1) indoor communication at small distances [4, 5], 2) ground communication via an open atmospheric channel at the baseline distances from tens of meters to tens of kilometers [6-8], 3) communication with the unmanned aerial vehicles [9, 10]. In this article, the main attention will be paid to the ground atmospheric optical communication in the open atmosphere.

At present, quite a lot of theoretical and experimental works on the arrangement of ground optical communication based on scattered radiation have been published. Currently, a number of experimental works have been performed [11-15]. The vast majority of works use the sources in the wavelength range of $\lambda=250-270$ nm. The UV LEDs [11, 12], Nd:YAG lasers [13], and MPL-F-266 lasers [14] are used as such sources. To receive information, the PMTs MP1922 [11, 15] and PMTs Hamamatsu R7154 [12, 14] are most often used. Most papers consider the baseline distances up to 100 m (for example, [11-14]), however, there are also some papers with a large baseline distance (for example, up to 1000 m in [15]). As a part of the experimental work, the researchers determine attenuation of the desired signal radiation, reduced to decibels (path loss), probability of erroneous symbol recording (bit error rate or BER), and duration of the received pulse (pulse width) depending on the communication conditions.

Within the framework of theoretical works [16-21], the data transmission channel quality is studied depending on the optical and geometric conditions and the maximum information transmission rate. In addition, the works [16-17] propose an approximation formula for the impulse response of an optical communication channel based on scattered radiation.

Another field of theoretical and experimental research is related to the influence of various information encoding methods on the quality of a commu-

аппроксимационная формула для импульсной реакции канала оптической связи на рассеянном излучении.

Еще одно направление теоретических и экспериментальных исследований связано с влиянием различных способов кодирования информации на качество канала связи [12, 22-30]. В рамках работ [12, 22, 23] рассматривается ООК (On-Off-Keying) кодирование информации – подход, в рамках которого «0» задается отсутствием импульса, а «1» – его наличием. В работах [12, 22, 23] рассматривается РРМ (Pulse Position Modulation) кодирование информации – подход в рамках которого закодированный символ зависит от положения импульса во временном слоте. В работах [12, 23-27] используется кодирование ДПИМ (Digital Pulse Interval Modulation) – подход, в рамках которого информация кодируется задержкой между импульсами. В работах [28] используется кодирование по нескольким длинам волн. В работе [29] информация кодируется управлением поляризации посылаемого излучения. В работах [25, 30] показывается, что использование ДПИМ позволяет значительно увеличить скорость передачи информации по сравнению с РРМ, но вероятность регистрации ошибочных символов при этом будет несколько выше. В рамках экспериментальных работ ранее выполненных в ИОА СО РАН [8, 31] также использовался способ кодирования информации ДПИМ – задержка между импульсами в 65 мкс соответствовала символу «1», а в 67 мкс – символу «0». В условиях дня была установлена устойчивая оптическая связь на длине волны $\lambda=250$ нм на базовом расстоянии до 1.3 км [31].

В целом анализ существующих работ показывает, что в ранее опубликованных работах практически не рассматриваются длины волн диапазона $\lambda > 270$ нм. Можно лишь упомянуть работу [16], где рассмотрены длины волн $\lambda=230-310$ нм. Поэтому далее рассматривается, как зависит вероятность регистрации ошибочных символов P_e от оптико-геометрических условий в диапазоне длин волн от 200 до 400 нм.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Задача рассматривалась в следующей постановке (рис. 1). Пусть имеется плоская система атмосфера – земная поверхность. Атмосфера является рассеивающей и поглощающей аэрозольно-газовой средой. Атмосфера разделена на 32 однородных слоя, в каждом из которых заданы коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния и поглоще-

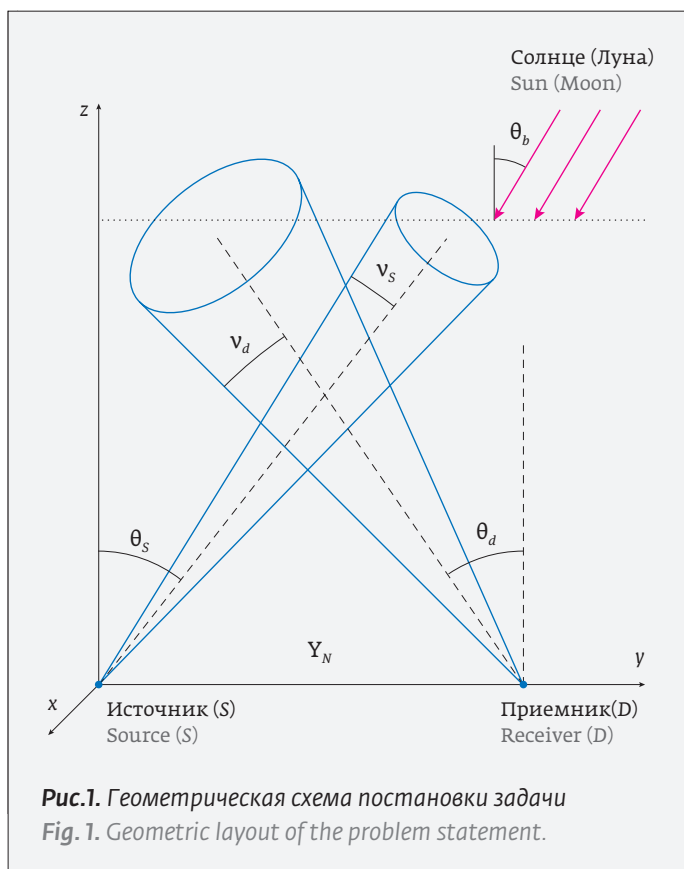


Рис.1. Геометрическая схема постановки задачи
Fig. 1. Geometric layout of the problem statement.

nication channel [12, 22-30]. Within the framework of [12, 22, 23], the OOK (On-Off-Keying) data encoding is considered; it is an approach where "0" is set by the absence of a pulse, and "1" by its availability. The papers [12, 22, 23] consider the PPM (Pulse Position Modulation) data encoding, namely an approach according to which the encoded symbol depends on the pulse position in the time slot. In [12, 23-27], the DPIM (Digital Pulse Interval Modulation) coding is applied, an approach according to which information is encoded by a delay between the pulses. The papers [28] use coding at several wavelengths. In [29], information is encoded by controlling the sent radiation polarization. The papers [25, 30] show that the application of DPIM can significantly increase the information transfer rate compared to the PPM, however, the bit error rate will be somewhat higher. As a part of the experimental works previously performed at the Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences [8, 31], the DPIM information encoding method was also used, namely a delay between the pulses of 65 μs corresponded to the symbol "1", and of 67 μs – to the symbol "0". In the daytime, the sustainable optical communication was established at a wavelength of $\lambda=250$ nm at a baseline distance of up to 1.3 km [31].



ния, а также индикатрисы аэрозольного рассеяния. Оптические параметры атмосферы задаются моделями лета средних широт LOWTRAN-7 [32] безоблачного неба и данными из работ [33–35] о молекулярном рассеянии и поглощении. На земной поверхности располагается импульсный лазерный источник S , передающий через атмосферу информацию в спектральных интервалах с центрами на длинах волн $\lambda=205, 215, \dots, 395$ нм и шириной $\Delta\lambda=10$ нм. Информация кодируется задержкой между импульсами (DPIM). Ось источника направлена под зенитным углом θ_s от вертикали, угол расходимости источника равен ν_s , энергия одного импульса $Q_0=0,3$ мДж, а длительность $\Delta t_0=30$ нс. Предполагается, что форма импульса по времени прямоугольная. На базовом расстоянии Y_N от источника располагается приемная система D , ось которой ориентирована под зенитным углом θ_d , а угол поля зрения равен ν_d . Рассматривается компланарная схема канала (оси источника и приемной системы лежат в одной плоскости). Приемная система предполагается идеальной с площадью апертуры $S_d=0,01$ м², содержащая ФЭУ УФК-4Г-4 [36]. Параметры ФЭУ: коэффициент усиления ФЭУ $M_{\text{PMT}}=10^6$, темновой ток $I_T=10^{-15}$ А, полоса пропускания частот $\Delta f=11$ кГц. Значения спектральной чувствительности фотокатода Σ_K на рассматриваемых длинах волн приведены в таблице 1. Параметры приемной системы соответствуют системе, используемой нами в работе [31].

На верхнюю границу атмосферы падает солнечное (либо лунное) излучение под зенитным углом θ_b и азимутальным углом ϕ_b . Требуется, зная оптико-геометрические условия и характеристики приемо-передающей аппаратуры, определить импульсную реакцию канала связи и интенсивность фонового излучения и по их значениям оценить вероятность регистрации ошибочных символов P_e .

Полезный сигнал в рассматриваемой схеме оптической связи целиком формируется рассеянным излучением. Для моделирования импульсной реакции использовались две программы метода Монте-Карло (рисунок 2): однократно рассеянная часть импульсной реакции $h_1(t)$ моделировалась программой метода Монте-Карло с локальными оценками в точках столкновения «фотонов» со средой (рисунок 2а), а многократно рассеянная часть импульсной реакции $h_{\text{msc}}(t)$ моделировалась программой метода Монте-Карло с модифицированными двойными локальными оценками в точках столкновения (рисунок 2б). Далее кратко об этих алгоритмах.

Таблица 1. Спектральная чувствительность фотокатода для ФЭУ УФК-4Г-4 [36]

Table 1. Spectral sensitivity of photocathode for PMT UFK-4G-4 [36]

λ , нм	Σ_K , мА/Вт	λ , нм	Σ_K , мА/Вт
200	30	300	52
210	36	310	50
220	45	320	49
230	51	330	48
240	53	340	47
250	54	350	42
260	54	360	25
270	54	370	7
280	53	380	3
290	53	390	1

In general, the existing literature review shows that the previously published works almost do not consider the wavelengths in the range of $\lambda>270$ nm. We can do no more than mention the paper [16], where the wavelengths $\lambda=230\text{--}310$ nm are considered. Therefore, below we consider how the bit error rate P_e depends on the optical and geometric conditions in the wavelength range from 200 to 400 nm.

PROBLEM STATEMENT AND SOLUTION METHOD

The problem was considered using the following statement (Fig. 1). Let there be a planar system consisting of an atmosphere and the ground surface. The atmosphere is a scattering and absorbing aerosol-gas medium. The atmosphere is divided into 32 homogeneous layers in each of which the molecular and aerosol scattering and absorption rates, as well as the phase function of aerosol scattering are given. The optical parameters of the atmosphere are determined by LOWTRAN-7 mid-latitude summer models [32] of a cloudless sky and information from the papers [33–35] on molecular scattering and absorption. An impulse laser source S located on the ground surface is transmitting information through the atmosphere in the spectral intervals with the centers at wavelengths $\lambda=205, 215, \dots, 395$ nm and a width $\Delta\lambda=10$ nm. The information is encoded by the delay between pulses (DPIM). The source axis is located at the zenith angle

Суть алгоритма с локальными оценками сводится к следующему (рис. 2а). Из точки источника запускаются траектории блуждания фотонов в атмосфере в соответствии с оптическими параметрами среды. Алгоритм моделирования блуждания фотонов можно считать классическим [37]. В каждой точке столкновения фотонов со средой (на рисунке отмечены как M_1 и M_2) делается локальная оценка энергии фотона, который придет в приемник из точки M_i с временем блуждания, попадающим в i -й временной интервал $I_{i,pnk}$. При выполнении условий $t_i < t_{pnk} + \frac{r_{MR}}{c} \leq t_{i+1}$, и $\cos v_d \leq (\omega_d, \omega_{pnk}) I_{ipnk}$ равна:

$$I_{ipnk} = q_M \frac{\sigma_{sa,M} g_a(\mu_M) + \sigma_{sm,M} g_m(\mu_M)}{\sigma_{t,M} r_{MD}^2} \exp(-\tau_{MD}), \quad (1)$$

где i – номер временного интервала, куда делается локальная оценка, q_M – энергия фотона, пришедшая в точку столкновения M , r_{MR} – расстояние от точки столкновения M до приемной системы D , τ_{MR} – оптическая толщина трассы от точки столкновения M до приемной системы D , $\sigma_{sa,M}$, $\sigma_{sm,M}$ – коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния в точке столкновения M соответственно, $\sigma_{t,M}$ – коэффициент ослабления в точке столкновения M , $g_a(\mu_M)$, $g_m(\mu_M)$ – индикатрисы аэрозольного и молекулярного рассеяния в точке столкновения M соответственно, μ_M – косинус угла рассеяния между направлением траектории фотона в точке столкновения до рассеяния и направлением на приемник, c – скорость света в среде, ω_d – направление оптической оси приемника, ω_{pnk} – направление из точки приемника в точку столкновения M .

В противном случае $I_{ipnk} = 0$.

Тогда однократно рассеянная часть импульсной реакции $h_1(t)$ определится как:

$$h_i = \frac{1}{PN} \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_{pn}} I_{ipnk}, \quad (2)$$

где $i=1, \dots, N_{time}$ – номер временного интервала, N_{time} – количество временных интервалов, t_{i+1} , t_i – границы i -го временного интервала, P – количество пачек траекторий, N – количество траекторий в пачке, K_{pn} – количество столкновений в n -й траектории p -й пачки.

Алгоритм с модифицированными двойными локальными оценками строится следующим образом (рисунок 2б). Моделируется блуждание фотонов в среде. Для каждой точки столкновения (отмечена

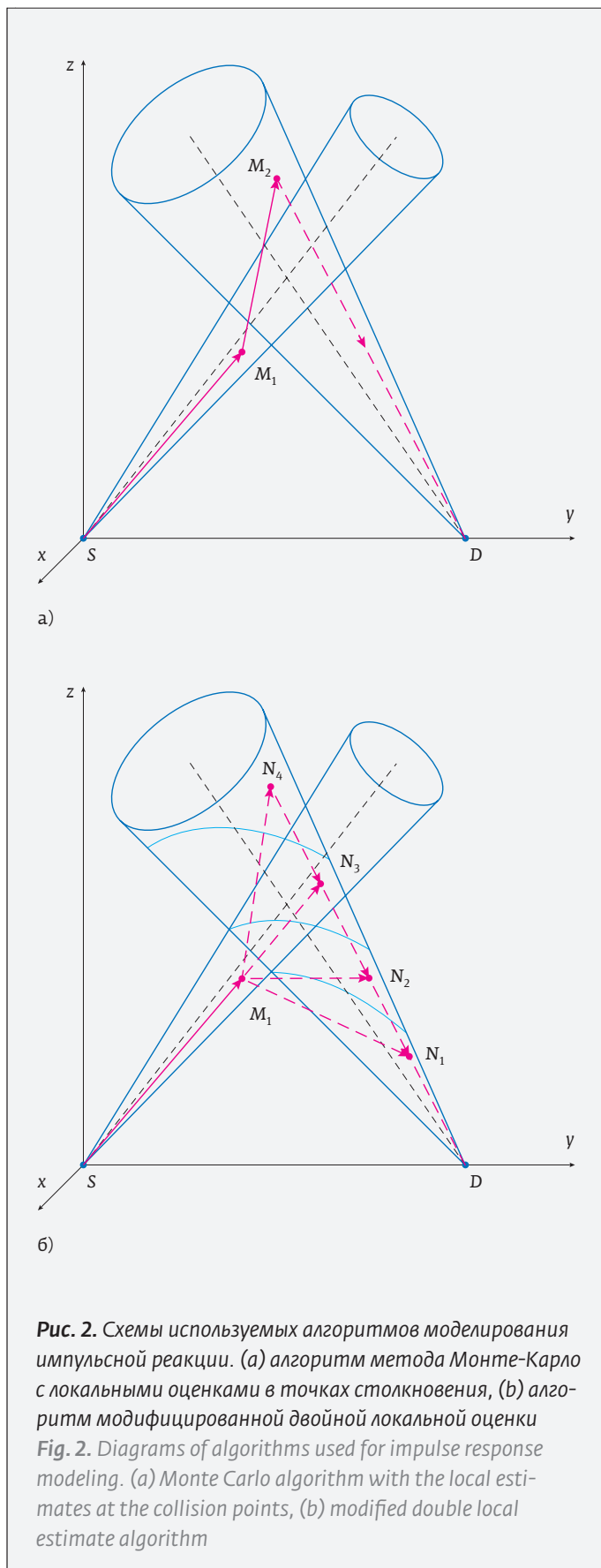


Рис. 2. Схемы используемых алгоритмов моделирования импульсной реакции. (а) алгоритм метода Монте-Карло с локальными оценками в точках столкновения, (б) алгоритм модифицированной двойной локальной оценки
 Fig. 2. Diagrams of algorithms used for impulse response modeling. (a) Monte Carlo algorithm with the local estimates at the collision points, (b) modified double local estimate algorithm



на рисунке как M_1) поле зрения приемника разбивается на подобласти, соответствующие временным интервалам, для которых ищется импульсная реакция. Алгоритм разделения поля зрения на подобласти описан в работе [38]. Подобласти ограничены двумя эллипсоидами вращения, фокусами которых являются точка столкновения M_1 и приемная система D , и конусом поля зрения приемника. В поле зрения приемной системы выбирается случайное направление ω . В каждом из построенных подобластей выбирается по одной фиктивной точке столкновения (на рисунке отмечены как N_1, N_2 и т.д.), расположенные на луче, задаваемом направлением ω . И в каждый из возможных временных интервалов делается двойная локальная оценка излучения, которое придет в приемную систему, рассеявшись в точках M и N_1 для первого временного интервала и т.д. Оценка задается формулой:

$$I_{ipnk} = q_M \frac{\sigma_{sa,M} g_a(\mu_M) + \sigma_{sm,M} g_m(\mu_M)}{\sigma_{t,M} r_{MN_i}^2} \times \\ \times (\sigma_{sa,N_i} g_a(\mu_{N_i}) + \sigma_{sm,N_i} g_m(\mu_{N_i})) \times \\ \times \Omega_d \left(\frac{P_{i+1}}{1 - e_{i+1} b} - \frac{P_i}{1 - e_i b} \right) \exp(-\tau_{MN_i}) \exp(-\tau_{N_i,D}), \quad (3)$$

где μ_{Mi} – косинус угла рассеяния между направлением фотона в точке столкновения M до рассеяния и направлением в фиктивную точку столкновения N_i , соответствующей i -му временному интервалу, μ_{Ni} – косинус угла рассеяния между направлениями MN_i и N_iD , P_i, e_i – фокальный параметр и эксцентриситет эллипсоида вращения, соответствующего времени t_i , b – скалярное произведение вектора ω и единичного вектора, направленного в направлении DM , τ_{MN_i} – оптическая толщина трассы от точки столкновения M до фиктивной точки N_i , $\tau_{N_i,D}$ – оптическая толщина трассы от фиктивной точки столкновения N_i до приемной системы D .

Тогда многократно рассеянная часть импульсной реакции $h_{msc}(t)$ определится по формуле (2) из значений I_{ipnk} , полученных по формуле (3).

Зная импульсную реакцию канала связи, легко определить среднюю мощность полезного сигнала:

$$\bar{P} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} P(t) dt, \quad (4)$$

$$P(t) = S_d \int_0^{+\infty} P_0(t_1) [h_1 + h_{msc}](t - t_1) dt_1. \quad (5)$$

θ_s from the vertical, the source divergence angle is v_s , the energy of one pulse is $Q_0 = 0.3$ mJ, and the duration is $\Delta t_0 = ns$. It is assumed that the pulse shape is rectangular in time. At the baseline distance Y_N from the source, the receiving system D is located, the axis of which is oriented at the zenith angle θ_d , and the field of view angle is equal to v_d . A coplanar channel circuit is considered (the axes of the source and the receiving system are located in the same plane). The receiving system is assumed to be ideal with an aperture area of $S_d = 0.01$ m², containing a UFK-4G-4 PMT [36]. The PMT parameters are as follows: PMT gain ratio $M_{PMT} = 10^6$, dark current $I_T = 10^{-15}$ A, frequency bandwidth $\Delta f = 11$ kHz. The spectral sensitivity values of the photocathode Σ_k at the considered wavelengths are given in Table 1. The receiving system parameters correspond to the system used by us in [31].

The solar (or lunar) radiation is incident on the upper boundary of the atmosphere at a zenith angle θ_b and an azimuth angle φ_b . While knowing the optical and geometric conditions and the specifications of the transmit/receive equipment, it is required to determine the impulse response of the communication channel and the background radiance and, by using their values, to estimate the bit error rate P_e recording.

The desired signal in the optical communication circuit under consideration is entirely generated by scattered radiation. To simulate the impulse response, we used two programs of the Monte Carlo method (Figure 2): the singly scattered part of the impulse response $h_1(t)$ was simulated by a Monte Carlo program with local estimates at the points of "photon" collision with the medium (Figure 2a), and the multiply scattered part of the impulse response $h_{msc}(t)$ was simulated by a Monte Carlo program with the modified double local estimates at the collision points (Figure 2b). A brief description of these algorithms is given below.

The algorithm with local estimates is as follows (Figure 2a). The photon wandering trajectories in the atmosphere begin in the source point in accordance with the optical parameters of the medium. The modeling algorithm for photon wandering can be considered as classical [37]. At each collision point of photons with the medium (marked as M_1 and M_2 in the figure), a local energy estimate is made in relation to the photon that will arrive at the receiver from the point M_i with a wandering time falling into the i -th time interval $I_{i,pnk}$. If the conditions $t_i < t_{pnk} + \frac{r_{MR}}{c} \leq t_{i+1}$, and $\cos v_d \leq (\omega_d, \omega_{pnk})$ are met, I_{ipnk} is equal to:



Мощность фонового излучения определялась по формуле:

$$P_b = \pi S_\lambda S_d 2\pi(1 - \cos v_d) I_b, \quad (6)$$

где πS_λ – значение солнечной (лунной) постоянной, I_b – значение интенсивности фонового излучения Солнца (Луны) при зенитном угле Солнца (Луны) θ_b и относительном азимутальном угле φ_b , отсчитываемого от направления оси приемной системы.

Значения солнечных постоянных брались из работы [39]. Значения лунных постоянных для полнолуния брались из работы [40].

Величина I_b рассчитывалась методом Монте-Карло сопряженных траекторий с локальными оценками в точках столкновения, основанным на работе [37].

В работах [38, 41] для тестирования программ расчета h_1 и h_{msc} выполнялось сопоставление с результатами [20, 42]. В работе [43] выполнялось тестовое сравнение с результатами расчетов I_b из работы [44]. Сопоставление показывает, что отличие результатов лежит в пределах статистической погрешности расчетов.

Для способа кодирования информации DRIM в работах [24–27] предлагается формула для расчета вероятности регистрации ошибочных символов. В случае, если кодирование информации производится аналогично нашей работе [31], то вероятность регистрации ошибочного символа определяется как:

$$P_e = 1 - \left(1 - P_{\frac{0}{1}}\right) \left(1 - P_{\frac{1}{0}}\right), \quad (7)$$

где $1 - P_{\frac{0}{1}}$ – это вероятность регистрации посланного импульса, $1 - P_{\frac{1}{0}}$ – это вероятность того, что отсутствие импульса регистрируется правильно.

При высоком уровне полезного сигнала согласно работе [25] величины $P_{0/1}$ и $P_{1/0}$ определяются по формулам:

$$P_{\frac{0}{1}} = \int_{\gamma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(x-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dx = 1 - F\left(\frac{\gamma-I_1}{\sigma_1}\right), \quad (8)$$

$$P_{\frac{1}{0}} = \int_{-\infty}^{\gamma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(x-I_1-I_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx = F\left(\frac{\gamma-I_1-I_2}{\sigma_2}\right), \quad (9)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (10)$$

$$I_1 = P_b \sum_k M_{PMT}, \quad (11)$$

$$I_{ipnk} = q_M \frac{\sigma_{sa,M} g_a(\mu_M) + \sigma_{sm,M} g_m(\mu_M)}{\sigma_{t,M} r_{MD}^2} \exp(-\tau_{MD}), \quad (1)$$

where i is the number of the time interval where the local estimate is made; q_M is the photon energy arriving to the collision point M , r_{MR} is the distance from the collision point M to the receiving system D , τ_{MR} is the optical path thickness from the collision point M to the receiving point D , $\sigma_{sa,M}$, $\sigma_{sm,M}$ are the aerosol and molecular scattering coefficients at the collision point M , respectively, $\sigma_{t,M}$ is the attenuation coefficient at the collision point M , $g_a(\mu_M)$, $g_m(\mu_M)$ are the phase functions of aerosol and molecular scattering at the collision point M , respectively, μ_M is the scattering angle cosine between the photon trajectory direction at the collision point before scattering and the direction to the receiver, c is the light velocity in the medium, ω_d is the direction of the receiver's optical axis, ω_{pnk} is the direction from the receiver point to the collision point M .

Otherwise $I_{ipnk} = 0$.

Then the singly scattered part of the impulse response $h_1(t)$ is determined as follows:

$$h_i = \frac{1}{PN} \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_{pn}} I_{ipnk}, \quad (2)$$

where $i=1, \dots, N_{\text{time}}$ is the number of the time interval, N_{time} is the number of time intervals, t_{i+1} , t_i are the boundaries of the i -th time interval, P is the number of sets of trajectories, N is the number of trajectories in a set, K_{pn} is the number of collisions in the n -th trajectory of the p -th set.

An algorithm with modified double local estimates is made as follows (Figure 2b). The wandering of photons in the medium is simulated. For each collision point (marked as M_1 in the figure), the receiver's field of view is divided into the subregions corresponding to the time intervals for which the impulse response is sought. The algorithm for dividing the field of view into the subregions is described in [38]. The subregions are bounded by two ellipsoids of revolution which foci are the collision point M_1 and the receiver system D , and the cone of the receiver's field of view. A random direction ω is selected in the field of view of the receiving system. One ghost collision point is selected in each of the obtained subregions (marked in the figure as N_1 , N_2 , etc.). Such points are located on the ray determined by the direction ω . In each of the possible time intervals, there is a double local estimate of radiation arrived at the receiving system, having scattered



$$I_2 = \bar{P}\Sigma_k M_{\text{PMT}}, \quad (12)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{e\Delta f M_{\text{PMT}}^2 (I_T + P_b \Sigma_k)}, \quad (13)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{e\Delta f M_{\text{PMT}}^2 (I_T + P_b \Sigma_k + \bar{P}\Sigma_k)}, \quad (14)$$

$$\gamma = I_1 + \frac{I_2}{2}, \quad (15)$$

где e – заряд электрона; I_1 – ток, создаваемый фоновым излучением, I_2 – ток, создаваемый полезным сигналом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для решения поставленной задачи была выполнена серия расчетов для следующих оптико-геометрических условий: $\lambda=200\text{--}400$ нм с шагом 10 нм; метеорологическая дальность видимости $S_M=50$ км, что соответствует модели LOWTRAN-7 с вертикальной аэрозольной оптической толщиной (АОТ) на длине волны $\lambda=550$ нм $\text{АОТ}_{550}=0,16$, $Y_N=0,05\text{--}50$ км, $\theta_s=85^\circ$, $\nu_s=0,06$ мрад, $\theta_d=85^\circ$, $\nu_d=1^\circ$, $\theta_b=0^\circ$, расчеты для дня и ночи. Выбор значений θ_s и θ_d обосновывается тем, что для данных условий принимаемый полезный сигнал будет наибольшим.

Используя разработанные программы метода Монте-Карло и формулы (4)–(14), была вычислена вероятность регистрации ошибочных символов P_e в зависимости от длины волны λ и базового расстояния Y_N . Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Из рис. 3а видно, что длина волны $\lambda=295$ нм будет лучше других подходить для организации дальней связи днем, так как для этой длины волны расстояние, на котором P_e становится больше 10%, наибольшее. Причина этого состоит в том, что, с одной стороны, на этой длине волны в силу существенного поглощения озоном мало фоновое излучение Солнца. С другой стороны, в приземном слое атмосферы концентрация озона меньше, чем в стратосфере, поэтому излучение в приземном слое на этой длине волны ослабляется меньше, чем на остальных длинах волн диапазона $\lambda=200\text{--}300$ нм.

Из рис. 3б видно, что связь в ночных условиях для большинства длин волн существенно лучше, чем в дневных условиях. Это связано с тем, что лунный фон существенно меньше солнечного. Из рис. 3в видно, что лучшей длиной волны в условиях ночи для дальней связи будет $\lambda=395$ нм, а длины волн дальнего УФ-диапазона (200–250 нм) будут наименее подходящими.

at points M and N_1 for the first time interval, etc. The estimate is given by the following formula:

$$I_{ipnk} = q_M \frac{\sigma_{sa,M} g_a(\mu_M) + \sigma_{sm,M} g_m(\mu_M)}{\sigma_{t,M} M_{MN_i}^2} \times \\ \times (\sigma_{sa,N_i} g_a(\mu_{N_i}) + \sigma_{sm,N_i} g_m(\mu_{N_i})) \times \\ \times \Omega_d \left(\frac{P_{i+1}}{1-e_{i+1}b} - \frac{P_i}{1-e_i b} \right) \exp(-\tau_{MN_i}) \exp(-\tau_{N_i,D}), \quad (3)$$

where μ_{Mi} is the scattering angle cosine between the photon direction at the collision point M before scattering and direction to the ghost collision point N_i corresponding to the i -th time interval, μ_{Ni} is the scattering angle cosine between the directions MN_i and N_iD , P_i , e_i are the focal parameter and eccentricity of the ellipsoid of revolution, relevant to the time t_i , b is the dot product of the vector ω and the unit vector aimed in the direction DM , τ_{MN_i} is the optical thickness of the path from the collision point M to the ghost point N_i , $\tau_{N_i,D}$ is the optical thickness of the path from the ghost collision point N_i to the receiving system D .

Thus, the multiply scattered part of the impulse response $h_{msc}(t)$ is determined by the formula (2) using the values of I_{ipnk} obtained by the formula (3).

Having known the impulse response of the communication channel, it is possible to determine the average desired signal power:

$$\bar{P} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} P(t) dt, \quad (4)$$

$$P(t) = S_d \int_0^{+\infty} P_0(t_1) [h_1 + h_{msc}] (t - t_1) dt_1. \quad (5)$$

The background radiation power is determined by the following formula:

$$P_b = \pi S_\lambda S_d 2\pi(1 - \cos \nu_d) I_b, \quad (6)$$

where πS_λ is the value of the solar (lunar) constant, I_b is the radiance value of the background radiation of the Sun (Moon) at the zenith angle of the Sun (Moon) θ_b and the relative azimuthal angle φ_b , measured from the direction of the receiving system axis.

The values of solar constants were taken from [39]. The values of the lunar constants for the full moon conditions were taken from [40].

The value of I_b was calculated by the Monte Carlo method of backward trajectories with the local estimates at the collision points, based on [37].

In [38, 41], to test the calculation programs for h_1 and h_{msc} , a comparison was made with the results

ВЫВОДЫ

Выполненные расчеты вероятности регистрации ошибочных символов в условиях дня и ночи показали, что:

1. Для организации атмосферной оптической связи на рассеянном излучении днем длина волны $\lambda=295$ нм лучше других подходит для организации дальней связи на рассеянном излучении.
2. В условиях ночи лучшей длиной волны для организации дальней связи будет $\lambda=395$ нм, а длины волн дальнего УФ диапазона (200–250 нм) будут наименее подходящими.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

REFERENCES

1. Sunstein D. E. A scatter communications link at ultraviolet frequencies. B.Sc. thesis. Dept. Elect. Eng., Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA. USA. 1968. <http://hdl.handle.net/1721.1/13670>.
2. Harvey G. L. A survey of ultraviolet communication systems. Naval Research Laboratory Technical Report. Washington D. C. March 13, 1964.
3. Vavoulas A., Sandalidis H. G., Chatzidihamantis N. D., Xu Z., Karagiannidis G. K. A Survey on Ultraviolet C-Band (UV-C) Communications. *IEEE Communication surveys & tutorials*. 2019; 21(3): 2111–2133. DOI 10.1109/COMST.2019.2898946.
4. Zhanwei Liu, Huang Yiwen, Haigang Liu, and Xianfeng Chen. Non-line-of-sight optical communication based on orbital angular momentum. *Opt. Lett.* 2021; 46(20): 5112–5115. DOI:10.1364/OL.441441.
5. Hamza A. S., Deogun J. S. and Alexander D. R. Classification Framework for Free Space Optical Communication Links and Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019; 21(2): 1346–1382. doi: 10.1109/COMST.2018.2876805.
6. Arya S. and Chung Y. H. Novel Optical Scattering-Based V2V Communications With Experimental Analysis. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022; doi: 10.1109/TITS.2022.3145437.
7. Drost R. J., Sadler B. M. Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications. *Semiconductor Science and Technology*. 2014; 29(8). DOI:10.1088/0268-1242/29/8/084006.
8. Abramochkin V. N., Belov V. V., Gridnev Yu. V., Kudryavcev A. N., Tarasenkov M. V., Fedosov A. V. Оптико-электронная связь в атмосфере на рассеянном лазерном излучении. Полевые эксперименты. *Светотехника*. 2017; 4: 24–30. (In Russ.). Абрамочкин В. Н., Белов В. В., Гриднев Ю. В., Кудрявцев А. Н., Тарасенков М. В., Федосов А. В. Оптико-электронная связь в атмосфере на рассеянном лазерном излучении. Полевые эксперименты. *Светотехника*. 2017; 4: 24–30.
9. Ding J., Mei H., I C-L., Zhang H., Liu W. Frontier Progress of Unmanned Aerial Vehicles Optical Wireless Technologies. *Sensors*. 2020; 20(19): 5476. doi:10.3390/s20195476.
10. Tadayoni H. and Uysal M. Ultraviolet Communications for Ground-to-Air Links. 2019. *27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 2019; 1–4, doi: 10.1109/SIU.2019.8806490.
11. Gang Chen, Feras Abou-Galala, Zhengyuan Xu, and Brian M. Sadler. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links. *Opt. Express*. 2008; 16: 15059–15068. DOI: 10.1109/SIU.2019.8806490.
12. Pengfei Luo, Min Zhang, Dahai Han, and Qing Li. Performance analysis of short-range NLOS UV communication system using Monte Carlo simulation based on measured channel parameters. *Opt. Express*. 2012; 20(21): 23489–23501. <https://doi.org/10.1364/OE.20.023489>.
13. Gang Chen, Zhengyuan Xu, and Brian M. Sadler. Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels. *Opt. Express*. 2010; 18(10): 10500–10509. <https://doi.org/10.1364/OE.18.010500>.
14. Peng D., Shi J., Peng G. et al. An ultraviolet laser communication system using frequency-shift keying modulation scheme. *Optoelectron. Lett.* 2015; 11: 65–68.

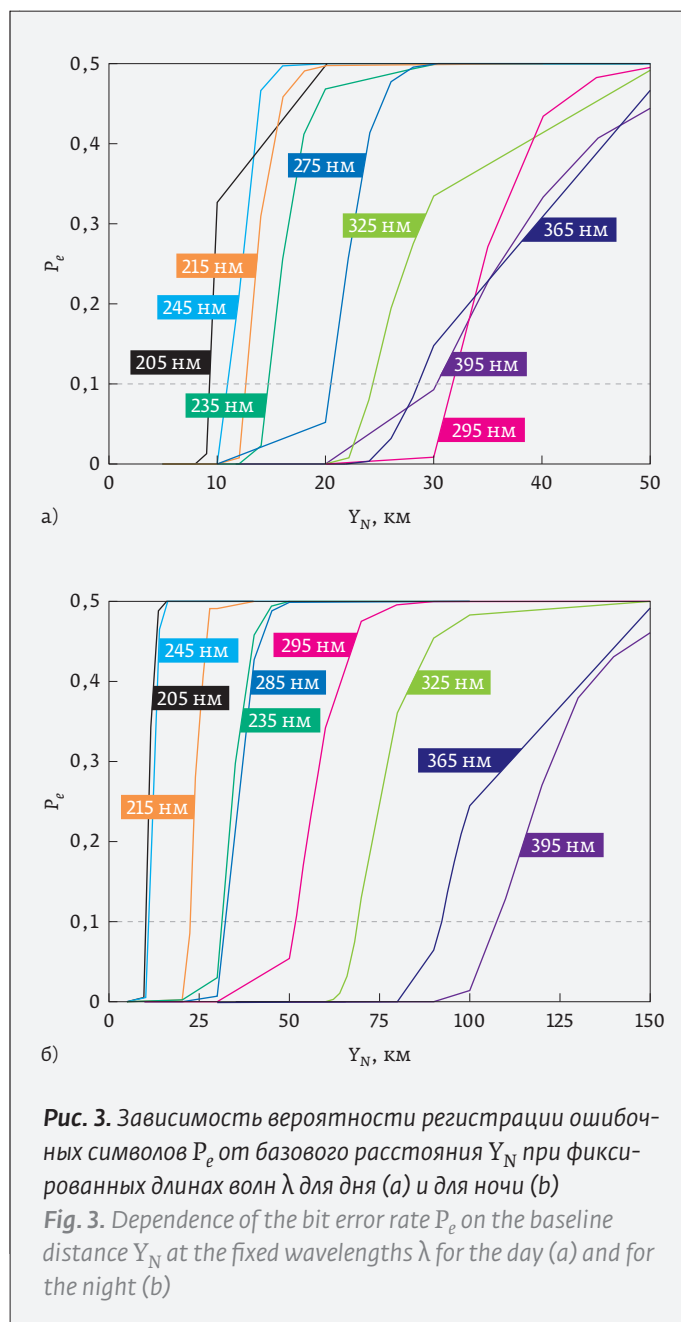


Рис. 3. Зависимость вероятности регистрации ошибочных символов P_e от базового расстояния Y_N при фиксированных длинах волн λ для дня (а) и для ночи (б)

Fig. 3. Dependence of the bit error rate P_e on the baseline distance Y_N at the fixed wavelengths λ for the day (a) and for the night (b)

of [20, 42]. In [43], a test comparison was made with the results of calculations I_b from [44]. The comparison demonstrates that the difference between the results is within the limits of the statistical calculation error.

For the DPIM information coding method, the papers [24–27] propose a formula for calculating the bit error rate. If information encoding is performed similarly to our work [31], then the bit error rate is determined as follows:

$$P_e = 1 - \left(1 - \frac{P_0}{1} \right) \left(1 - \frac{P_1}{0} \right), \quad (7)$$



- <https://doi.org/10.1007/s11801-015-4196-x>.
15. **Linchao Liao, Zening Li, Tian Lang, and Gang Chen.** UV turbulence channel modeling and experimental verification. *Opt. Express*. 2015; 23(17): 21825–21835. <https://doi.org/10.1364/OE.23.021825>.
 16. **Ding H., Chen G., Majumdar A. K., Sadler B. M. and Xu Z.** Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2009; 27(9): 1535–1544. doi:10.1109/JSA.2009.091203.
 17. **Drost Robert J., & Sadler Brian M.** Survey of ultraviolet non-line-of-sight communications. *Semiconductor Science and Technology*. 2014; 29(8): 11. doi:10.1088/0268-1242/29/8/084006.
 18. **Yu Sun and Yafeng Zhan.** Closed-form impulse response model of non-line-of-sight single-scatter propagation. *J. Opt. Soc. Am. A*. 2016; 33(4): 752–757. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.33.000752>.
 19. **Mohamed A. Elshimy and Steve Hranilovic.** Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries. *J. Opt. Soc. Am. A*. 2011; 28(3): 420–428. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.000420>.
 20. **Robert J. Drost, Terrence J. Moore, and Brian M. Sadler.** UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions. *J. Opt. Soc. Am. A*. 2011; 28(4): 686–695. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.000686>.
 21. **Gang Chen, Zhengyuan Xu, Haipeng Ding, and Brian M. Sadler.** Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications. *Opt. Express*. 2009; 17(5): 3929–3940. <https://doi.org/10.1364/OE.17.003929>
 22. **Qunfeng He, Brian M. Sadler, Zhengyuan Xu.** Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications. *Free-Space Laser Communications IX: proc. SPIE of 2009*; 7464: 74640H. <https://doi.org/10.1117/12.826301>.
 23. **Xu C. and Zhang H.** Packet error rate analysis of IM/DD systems for ultraviolet scattering communications. *MILCOM 2015–2015. IEEE Military Communications Conference*. Tampa, FL. 2015; pp. 1188–1193. doi:0.1109/MILCOM.2015.7357607.
 24. **Ghassemlooy Z., Hayes A. R., Seed N. L. and Kaluarachchi E. D.** Digital pulse interval modulation for optical communications. *IEEE Communications Magazine*. 1998; 36(12): 95–99. doi:10.1109/35.735885.
 25. **Jing Ma, Yijun Jiang, Siyuan Yu, Liying Tan, Wenhe Du.** Packet error rate analysis of OOK, DPIM and PPM modulation schemes for ground-to-satellite optical communications. *Optics Communications*. 2010; 283(2): 237–242. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.10.007>.
 26. **Aldibbiat N. M., Ghassemlooy Z., McLaughlin R.** Error performance of dual header pulse interval modulation (DH-PIM) in optical wireless communications. *IEE Proceedings – Optoelectronics*. 2001; 148(2): 91–96. DOI: 10.1049/ip-opt:20010451.
 27. **Zongmin Hu, Junxiong Tang.** Performance of digital pulse interval modulation of atmospheric optical wireless communication system. *Optical Transmission, Switching, and Subsystems II: proc. SPIE*. 2005; 5625. <https://doi.org/10.1117/12.574827>.
 28. **Noshad M., Brandt-Pearce M. and Wilson S. G.** NLOS UV Communications Using M-ary Spectral-Amplitude-Coding. *IEEE Transactions on Communications*. 2013; 61(4): 1544–1553. doi: 10.1109/TCOMM.2013.020813.120371.
 29. **Hongwei Yin, Honghui Jia, Hailiang Zhang, Xiaofeng Wang, Shengli Chang, Juncai Yang.** Extending the data rate of non-line-of-sight UV communication with polarization modulation. *Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks IX: Proc. SPIE*. 2012; 8540: 854001. <https://doi.org/10.1117/12.974284>.
 30. **Jinlong Zhang.** Modulation analysis for outdoors applications of optical wireless communications. *WCC 2000 – ICCT 2000. 2000 International Conference on Communication Technology Proceedings (Cat. No.00EX420)*. 2000; 2: 1483–1487. doi:10.1109/ICCT.2000.890940.
 31. **Belov V. V., Juviler I., Blaunstein N., Tarasenkov M. V., Poznakharev E. S.** NLOS Communication: Theory and Experiments in the Atmosphere and Underwater. *Atmosphere*. 2020, 11(1122). 15 p. <https://doi.org/10.3390/atmos1101122>
 32. **Kneizys F. X., Shettle F. P., Anderson G. P., Abreu L. W., Chetwynd J. H., Selby J. E. A., Clough S. A., Gallery W. O.** *User Guide to LOWTRAN-7*. – ARGL-TR-86–0177. ERP 1010. Hansom AFB. MA 01731. 1988. 137 p.
 33. **Bucholtz A.** Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied optics*. 1995; 34(15): 2765–2773. <https://doi.org/10.1364/AO.34.002765>.
 34. **Reilly D. M.** *Atmospheric optical communications in the middle ultraviolet*. M.S. thesis. Massachusetts Institute of Technology. 1976; <http://hdl.handle.net/1721.1/27480>.
 35. **Voigt S., Orphal J., Bogumil K., Burrows J. P.** The temperature dependence (203–293 K) of the absorption cross-sections of O₃ in the 230–850 nm region

where $1 - P_{\frac{0}{1}}$ is the probability of sent pulse recording, $1 - P_{\frac{1}{0}}$ is the probability that the pulse absence is registered correctly.

At a high level of the desired signal, according to [25], the values $P_{0/1}$ and $P_{1/0}$ are determined by the following formulas:

$$P_{\frac{1}{0}} = \int_{\gamma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(x-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dx = 1 - F\left(\frac{\gamma-I_1}{\sigma_1}\right), \quad (8)$$

$$P_{\frac{0}{1}} = \int_{-\infty}^{\gamma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(x-I_1-I_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) dx = F\left(\frac{\gamma-I_1-I_2}{\sigma_2}\right), \quad (9)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (10)$$

$$I_1 = P_b \Sigma_k M_{PMT}, \quad (11)$$

$$I_2 = \bar{P} \Sigma_k M_{PMT}, \quad (12)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{e \Delta f M_{PMT}^2 (I_r + P_b \Sigma_k)}, \quad (13)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{e \Delta f M_{PMT}^2 (I_r + P_b \Sigma_k + \bar{P} \Sigma_k)}, \quad (14)$$

$$\gamma = I_1 + \frac{I_2}{2}, \quad (15)$$

where e is the elementary charge; I_1 is the current generated by the background radiation, I_2 is the current generated by the desired signal.

RESULTS

To solve the problem set, a series of calculations was performed for the following optical and geometric conditions: $\lambda=200-400$ nm with a step of 10 nm; meteorological range of visibility $S_M=50$ km that corresponds to the LOWTRAN-7 model with the vertical aerosol optical depth (AOD) at a wavelength of $\lambda=550$ nm $AOT_{550}=0.16$, $Y_N=0.05-50$ km, $\theta_s=85^\circ$, $v_s=0.06$ mrad, $\theta_d=85^\circ$, $v_d=1^\circ$, $\theta_b=0^\circ$, calculations for the daytime and night. The selection of values θ_s and θ_d is justified by the fact that the received desired signal will be the largest for such conditions.

Using the developed programs of the Monte Carlo method and formulas (4)–(14), the bit error rate P_e recording was calculated depending on the wavelength λ and the baseline distance Y_N . The calculation results are given in Figure 3.

It can be seen from Figure 3a that the wavelength $\lambda=295$ nm will be the best choice for arranging the long-distance communications in the daytime, since the distance at which P_e becomes more than 10% is the largest for such a wavelength. The reason for such



- measured by Fourier-transform spectroscopy. *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 2001; 143(1): 1–9. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(01\)00480-4](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(01)00480-4).
36. <https://katodnv.com>
37. **Marchuk G. I., Mihajlov G. A., Nazaraliev M. A., Darbinyan R. A., Kargin B. A., Elepov B. S.** *Metod Monte-Karlo v atmosfernoj optike*. – Novosibirsk: Nauka. 1976. 284p. (In Russ.).
Марчук Г. И., Михайлов Г. А., Назаралиев М. А., Дарбинян Р. А., Каргин Б. А., Елепов Б. С. *Метод Монте-Карло в атмосферной оптике*. – Новосибирск: Наука. 1976. 284 с.
38. **Belov V. V., Tarasenkov M. V.** Tri algoritma statisticheskogo modelirovaniya v zadachah opticheskoj svyazi na rasseyannom izluchenii i bistaticheskogo zondirovaniya. *Optika atmosfery i okeana*. 2016; 29(05): 397–403. DOI: 10.15372/AOO20160506. (In Russ.).
Белов В. В., Тарасенков М. В. Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатистического зондирования. *Оптика атмосферы и океана*. 2016; 29(05): 397–403. DOI: 10.15372/AOO20160506.
39. **Gueymard C. A.** The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*. 2004; 76(4): 423–453. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.039>.
40. **Miller S. D. and Turner R. E.** A Dynamic Lunar Spectral Irradiance Data Set for NPOESS/VIIRS Day/Night Band Nighttime Environmental Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009; 47(7): 2316–2329. doi: 10.1109/TGRS.2009.2012696.
41. **Tarasenkov M. V., Belov V. V., and Poznakharev E. S.** Estimation of optimal wavelengths for atmospheric non-line-of-sight optical communication in the UV range of the spectrum in daytime and at night for baseline distances from 50 m to 50 km. *J. Opt. Soc. Am. A*. 2022; 39(2): 177–188. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.440875>.
42. **Lotova G. Z.** Modification of the «double local estimate» of the Monte-Carlo method in radiation transfer theory. *Rus. J. Numerical Analysis and Mathematical Modeling*. 2011; 26(5): 491–500. <https://doi.org/10.1515/rjnamm.2011.027>.
43. **Belov V. V., Tarasenkov M. V., Piskunov K. P.** Parametricheskaya model' solnechnoj dymki v vidimoi i UF-oblasti spektra. *Optika atmosfery i okeana*. 2010; 23(04): 294–297. (In Russ.).
Белов В. В., Тарасенков М. В., Пискунов К. П. Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра. *Оптика атмосферы и океана*. 2010; 23(04): 294–297.
44. **Perenos radiacii v rasseivayushchih i pogloshchayushchih atmosferah. Standartnye metody scheta / Red. Zh. Lenobl';** Per. s angl. Zh. K. Zolotovoj; pod red. K. S. Shifrina. – L.: Gidrometeoizdat. 1990. 263 p. (In Russ.).
Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы счета / Ред. Ж. Ленобль; Пер. с англ. Ж. К. Золотовой; под ред. К. С. Шифрина. – Л.: Гидрометеоиздат. 1990. 263 с.

АВТОРЫ

Тарасенков Михаил Викторович, к. ф.-м. н, старший научный сотрудник, Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия.

ORCID: 0000-0002-8826
WOS Research ID: P-7844-2014
Scopus Author ID: 55144149500
ID РИНЦ: 567863

Познахареv Егор Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия.

Scopus Author ID: 5719595177
ID РИНЦ: 1083964

Пешков Семен Алексеевич, студент, Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия.

ВКЛАД АВТОРОВ

Тарасенков М. В.: идея, дизайн, организация работы, обсуждения, предложения и замечания, подготовка рукописи; Познахареv Е. С.: обсуждения, предложения и замечания; Пешков С. А.: проведение расчетов, обработка результатов, обсуждения.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

result is that, on the one part, due to the significant absorption by ozone, there is little background radiation from the Sun at this wavelength. On the other part, the ozone concentration in the atmospheric ground layer is less than in the stratosphere, thus, the ground layer radiation at this wavelength is attenuated less than at other wavelengths in the range of $\lambda=200\text{--}300\text{ nm}$.

It can be seen from Fig. 3 that communication during the night for most wavelengths is significantly better than in the daytime conditions. This is due to the fact that the lunar background is much less than the solar one. Figure 3b shows that the best wavelength for the long-distance communications at night would be $\lambda=395\text{ nm}$, and the far UV band wavelengths (200–250 nm) would be the least suitable.

CONCLUSIONS

The performed calculations of the bit error rate in the daytime and night conditions have shown the following:

1. The wavelength $\lambda=295\text{ nm}$ is better than others for the arrangement of atmospheric long-distance optical communication based on scattered radiation during the day.
2. During the night, the best wavelength for arranging the long-distance communications will be $\lambda=395\text{ nm}$, and the far UV band wavelengths (200–250 nm) will be the least suitable.

The work was performed as a part of the public task of the Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

AUTHORS

Tarasenkov M. V., Cand. phys.-math. sci. V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia.

ORCID: 0000-0002-8826

Field of scientific interests: analysis of regularities of imaging through the atmosphere, atmospheric correction of images in the visible and UV ranges, theoretical investigation of non-line-of-sight communication channels.

Poznakharev E. S., V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia.

Field of scientific interests: experimental and theoretical investigation of non-line-of-sight communication channels.

Peshkov S. A., V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia.

Field of scientific interests: theoretical investigation of non-line-of-sight communication channels.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tarasenkov M. V.: idea, design, workflow management, discussions, suggestions and remarks, literary work preparation; Poznakharev E. S.: discussions, suggestions and remarks; Peshkov S. A.: calculations, processing of results, discussions.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest.

NMF

НАЦИОНАЛЬНЫЙ
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ
ФОРУМ

2023

#ТЕХНОЛОГИЧНЫЙ #МЕЖДУНАРОДНЫЙ #ИННОВАЦИОННЫЙ #ДОСТУПНЫЙ

#НЕ ТАКОЙ КАК ВСЕ – **ЛУЧШЕ!**

#ПОНЯТНЫЙ #СОВРЕМЕННЫЙ

УБЕДИТЕСЬ В ЭТОМ **ЛИЧНО!**



23-25.05.2023

Москва, «Крокус Экспо»

Абсолютно новое мероприятие в
станкоинструментальной отрасли

Обширная выставочная экспозиция
Российские и зарубежные производители
и поставщики металлообрабатывающего
оборудования, инструмента, программного
обеспечения, средств измерения
и комплектующих



16 000 за кв.м.

Насыщенная деловая программа

Тематические конференции / Круглые столы / Панельные дискуссии -
в числе спикеров только ТОП-эксперты в сфере металлообработки

Регистрация:

Премия лучшим спикерам

Биржа деловых контактов

www.nmf-expo.ru

При поддержке:



КРОКУС ЭКСПО

Международный выставочный центр

