- Richard G. Milner. A Short History of Spin, Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. Charlottesville, Virginia, USA, September 9 - 13, 2013. arXiv:1311.5016.
- Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator, Computer Physics Communications, 176, pp. 121-136.
- 22. Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis, J.M., and Neven H. Characterizing quantum supremacy in near-term devices, arXiv pre-print arXiv:1608.00263.
- Stierhoff G.C., Davis A.G. A History of the IBM Systems Journal In: IEEE Annals of the History of Computing, Vol. 20, Issue1, pp. 29-35.
- 24. *Collier, David.* The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association, pp. 105-119.
- 25. Hales S. Hallgren An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. November 12–14, 2000, P. 515.
- 26. *Kleppner D., Kolenkow R.* An Introduction to Mechanics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Гушанский Сергей Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.ж доцент.

Потапов Виктор Сергеевич – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Potapov Viktor Sergeevich – e-mail: vpotapov@sfedu.ru; phone: +78634371656; the department of computer engineering; assistant.

УДК 621.396.946

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд, К.Е. Румянцев, Аль-Бегат Адиль Хамид Шакир

АНАЛИЗ ВОСХОДЯЩЕГО ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ КОММУНИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

По сравнению с традиционной спутниковой радиосвязью методы лазерной связи демонстрируют более высокую производительность с точки зрения доступных скоростей передачи данных, а также гарантируют снижение массогабаритных показателей, уменьшение веса и мощности аппаратуры на летательном аппарате. В системе спутниковой связи лазерный передатчик генерирует узкий пучок модулированного излучения. Лазерный луч, распространяющийся в атмосфере по направлению к оптическому приемнику, может испытывать значительные случайные флуктуации оптической интенсивности из-за турбулентности, что приводит к потере мощности и ухудшению характеристик системы. В системе с мультиплексированием поднесущих (SCM) несколько несущих информацию радиосигналов электрически модулируются на разных поднесущих радиочастотах. Аналоговые или цифровые сигналы, несущие информацию, могут иметь различные форматы модуляции. Высокая устойчивость к воздействию турбулентности атмосферы достигается с помощью однополосной модуляции. Оптическое излучение с одной боковой полосой (OSSB) обычно генерируется с использованием модулятора Маха-Цендера (MZM) с двумя плечами. В статье проанализирован канала спутниковой связи в условиях атмосферной турбулентности, где однополосное оптическое излучение с модулировано радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Разработана модель канала связи, учитывающая как атмосферную турбулентность, так и основные параметры передающей и приёмной станций. Численные результаты, представленные в исследовании лазерной спутниковой связи, основаны на атмосферной высотной модели структурной характеристики флуктуаций показателя преломления Хафнагеля-Валли. Проведенный анализ позволяет оценить влияние на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра приёмной апертуры телескопов при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутником для системы лазерной связи.

Спутниковая связь; лазерная система; однополосное оптическое излучение; квадратурная фазовая манипуляция; радиосигнал на поднесущей частоте; атмосферная турбулентность; ошибка наведения; оптический модулятор Маха-Цендера.

Hussein Ahmed Mahmood, K.Y. Rumyantsev, Al-Begat Adil Hameed Shakir

CHANNEL ANALYSIS OF OPTICAL SINGLE SIDEBAND QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING WITH SUBCARRIER RADIO SIGNAL FOR LASER SATELLITE COMMUNICATIONS UNDER ATMOSPHERIC TURBULENCE

Compared to traditional satellite radio communication, laser communication techniques demonstrate greater performance in terms of available data rates, and also guarantee a reduction in size, weight and power of the communication subsystem. In a satellite laser communication system, a laser source generates a narrow beam of radiation at the transmitter. A laser beam propagating through the atmosphere towards an optical receiver can experience large random fluctuations in optical intensity due to turbulence, which can lead to loss of power in the receiver and degrade system performance. In a subcarrier multiplexing (SCM) system, multiple information is electrically modulated at different radio carrier frequencies. Analog or digital signals carrying information may have different modulation formats. Optical single sideband radiation (OSSB) is typically generated using a dual drive Mach–Zehnder modulator (MZM). In the article, the analysis channel for optical single-sideband quadrature phase-shift keying transmitted signal was proposed for different distances under atmospheric turbulence conditions. The numerical results of laser satellite communications are based on an atmospheric altitude model of the structural characteristic of Hufnagel-Valley (H-V) refractive index fluctuations. The performance analysis makes it possible to estimate the effect of atmospheric turbulence, pointing error, and the diameter of the received aperture on the received power during transmission of a laser signal between a ground station and a satellite for a laser communication system, where the optical wave is a collimated beam with a wavelength of 1550 nm.

Satellite communications; laser system; single-sideband optical radiation; quadrature phase shift keying; radio signal at subcarrier frequency; atmospheric turbulence; pointing error; Mach-Zehnder optical modulator.

Введение. Объем данных, генерируемых и передаваемых в системах спутниковой связи, постоянно увеличивается. Поскольку радиочастотные системы работают на пределе своих возможностей из-за технологических и нормативных проблем, лазерная связь определена как ключевая технология, ведущая к смене парадигмы спутниковой связи.

К преимуществам оптической связи по сравнению с радиосвязью относятся более широкая полоса пропускания, большая пропускная способность, меньшее энергопотребление, более компактное оборудование, высокая защищенность от прослушивания и лучшая защита от помех [1, 5, 6]. Более того, спрос на высокоскоростную передачу данных с космических наблюдательных платформ неуклонно растет [2]. Оптическая связь играет важную роль для передачи данных с высокой скоростью по линиям земля-космос и космос-земля [3–5]. В нисходящей линии при распространении лазерного луча в вакууме исключено поглощение и рассеяние излучения, а также не учитываются фазовые искажения. Лазерный луч подвергается воздействию плотной атмосферы тропосферы лишь на конечном участке трассы распространения. Наоборот, в восходящей линии лазерный луч, генерируемый наземной станцией, по направлению к искусственному спутнику Земли (ИСЗ) подвергается воздействию плотной атмосферы тропосферы. Помимо атмосферного затухания и мерцаний излучения [8] в восходящей линии необходимо учитывать дрейф луча, который увеличивает ошибку наведения лазерной системы спутниковой связи [9]. Экспериментальные исследования спутниковой связи показывают, что при передаче информации по восходящей линии не гарантируется непрерывное отслеживание направления на корреспондента и временная синхронизация, часто наблюдается прерывание связи.

Атмосферная турбулентность вызывает флуктуации принимаемой оптической мощности [16]. На качество лазерной связи влияют прежде всего сцинтилляции излучения. Поэтому актуальной задачей является оценка влияния турбулентности атмосферы на спутниковую связь, особенно в восходящей линии связи [6, 7]. Следовательно, особую важность приобретает оценка влияния на качество спутниковой связи возникающих за счет атмосферной турбулентности таких параметров как расширение и дрейф луча, ослабление и мерцание излучения в атмосфере на соответствующих длинах волн оптического излучения, искажение волнового фронта, флуктуации угла прихода и ошибка наведения.

Для организации высокоскоростной спутниковой связи предусматривается мультиплексирование радиосигналов на разных поднесущих частотах (SCM). После переноса в оптический диапазон длин волн сформированное излучение передается в свободном пространстве на оптической несущей частоте [10, 28]. Возможна чисто аналоговая оптическая однополосная схема SCM, совместимая с требуемыми скоростями основной полосы частот с использованием микроволновых фильтров нижних частот, смесителей, сумматоров и делителей [11]. Кроме того, общий электрический приемопередатчик может быть интегрирован с использованием технологии монолитных микроволновых интегральных схем [12]. Высокая устойчивость к хроматической дисперсии достигается с помощью оптической модуляции с одной боковой полосой (OSSB) [13]. Генерация сигналов OSSB методом фазового сдвига изучена с использованием внешнего модулятора Маха-Цендера (MZM) с двумя печами [14].

Для эффективного подавления одной из оптических боковых полос разность мощностей модулирующих сигналов в обеих плечах и отклонение фазы от требуемого значения в $\pi/2$ в нижнем плече должны быть ограничены погрешностями до 3 дБ и ±5° соответственно [15].

Цель настоящего исследования состоит в оценке влияния на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра принимаемой апертуры при передаче данных между наземной станцией и спутником для лазерной системы, где оптическая волна представляет собой коллимированный пучок.

Генерация оптического излучения с квадратурной фазовой манипуляцией радиосигналов на поднесущей частоте с одной боковой полосой. На рис. 1 представлена структура оптического когерентного передатчика [19] на основе двух параллельно соединенных интерферометров Маха-Цендера (I/Q оптических модуляторов) с использованием преобразования Гильберта для генерации оптического излучения с одной боковой полосой и передачей данных радиосигналами на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Лазерный источник генерирует непрерывное излучение с длиной волны λ_{opt} , круговой частотой $w_{opt} = c/\lambda_{opt}$, начальной фазой φ_{opt} и постоянной интенсивностью (мощностью) P_{opt} . Здесь с = 300 000 км/с – скорость распространения оптического излучения в вакууме.

Интенсивность электрического поля непрерывного лазерного сигнала определяется формулой

$$E_{in}(t) = \frac{\sqrt{P_{opt}}}{2} \cdot \left[exp(j \cdot w_{opt}t + j \cdot \varphi_{opt}) \right].$$
(1)

Входная волна оптического модулятора I/Q от оптического когерентного источника (лазера) разделяется на две составляющие $E_{SP1}(t)$ и $E_{SP2}(t)$ в оптическом делителе излучения с коэффициентами ветвления соответственно K_{SP1} и K_{SP2} и внутренними потерями γ_{SP} . Кроме того, $K_{SP1} + K_{SP2} = 1$ и





Рис. 1. Оптический передатчик, формирующий оптическое излучение с одной боковой полосой с квадратурной фазовой манипуляцией радиосигналов на поднесущей частоте

При идеальном делении $K_{SP1} = K_{SP2} = K_{SP} = 0,5$ на выходах оптического разветвителя формируются два одинаковых излучения

$$E_{SP1}(t) = E_{SP2}(t) = E_{SP}(t) = 0.5 \cdot 10^{-0.1 \cdot \gamma_{SP}[\Delta B]} \cdot E_{in}(t).$$
(2)

Входной лазерный сигнал, поступающий в интерферометр Maxa-Цендера, имеет отдельные верхний и нижний электроды, на которые подаются напряжения

$$u_{MZM1h}(t) = u_{1h}(t) + U_{b1h};$$

$$u_{1h}(t) = u_{1h}(t) + U_{b1h};$$
(3)

$$u_{MZM1d}(t) = u_{1d}(t) + 0_{b1d},$$

которые переключают электрические поля в плечах оптического интерферометра Маха Цендера.

Для достижения максимальной эффективности электрооптического устройства в качестве подложки в интерферометрах используются кристаллы ниобата лития LiNbO₃. Выбор рабочей точки модулятора достигается подачей на отдельную систему электродов постоянных напряжений смещения U_{b1h} и U_{b1d} , обеспечивающих заданный фазовый сдвиг между оптическими волнами в плечах интерферометра.

Выходная оптическая волна интерферометра Маха-Цандера с коэффициентом передачи *К_{МZM1}* описывается формулой [18]

$$E_{PM1}(t) = \frac{K_{MZM1}E_{SP1}(t)}{2} \left\{ exp\left[j\frac{\pi}{U_{\pi}} u_{MZM1h}(t) \right] + exp\left[j\frac{\pi}{U_{\pi}} u_{MZM1d}(t) \right] \right\}.$$
(4)

На рис. 2 представлена векторная диаграмма распределения сигналов с квадратурной фазовой манипуляцией QPSK. Точки на диаграмме образуют созвездие фазовых манипуляций из четырех точек. Все точки созвездия расположены на единичной окружности.



Рис. 2. Векторная диаграмма сигналов с манипуляцией QPSK

Квадратурная фазовая манипуляция требует двух колебаний, синфазной и квадратурной составляющих с одной и той же круговой поднесущей радиочастотой ω_{RF} , но сдвинутых по фазе на 90°. Это достигается использованием генератора синусоидальных сигналов поднесущей радиочастоты ω_{RF} и электронного фазовращателя на $\varphi_{RF} = \pi/2$.

При использовании электронного фазовращателя с коэффициентом передачи K_E на входах электронных умножителей появляются радиосигналы с одинаковой круговой частотой поднесущей ω_{RF} и начальной фазой φ_{RF} :

$$u_{G,I}(t) = I(t) \cdot U_G \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}); \tag{5}$$

$$u_{G.Q}(t) = K_E \cdot Q(t) \cdot U_G \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF} + \pi/2) =$$

= $-K_E \cdot Q(t) \cdot U_G \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}).$ (6)

На выходах электронных умножителей с коэффициентами передачи $K_{\times 1}$ и $K_{\times 2}$ формируются радиосигналы $u_I(t)$ и $u_Q(t)$ с одинаковой круговой частотой поднесущей ω_{RF} и начальной фазой φ_{RF} :

$$u_I(t) = K_{\times 1} \cdot u_{G,I}(t) = K_{\times 1} \cdot I(t) \cdot U_G \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}); \tag{7}$$

$$u_Q(t) = K_{\times 2} \cdot u_{G,Q}(t) = -K_{\times 2} \cdot K_E \cdot Q(t) \cdot U_G \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}).$$
(8)

После преобразований Гильберта над радиосигналами (7) и (8) формируются радиосигналы с квадратурной фазовой манипуляцией, направляемые на электроды интерферометров Маха-Цендера в оптическом I/Q-модуляторе [19]

$$u_{1h}(t) = u_{1d}(t) = K_{+}U_{G} [K_{\times 1}I(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) - K_{\times 2}K_{E}Q(t)\sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF})];$$

$$u_{2h}(t) = u_{2d}(t) =$$

$$= K_{-}U_{G}[K_{Y1} \cdot K_{\times 1} \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) + K_{Y2}K_{\times 2}K_{E} \cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF})].$$
(9)

На рис. 3 показан рассчитанный по формуле (9) спектр радиосигнала с поднесущей частотой 10 ГГц, начальной фазой $\varphi_{RF} = 0$ и квадратурной фазовой манипуляцией. Коэффициенты передачи всех функциональных устройств, присутствующие в формуле (9), приняты равными 1.



Рис. 3. Спектральная плотность мощности для радиосигнала QPSK

После подстановки (9) в (4) находим интенсивность выходной оптической волны верхнего интерферометра Маха-Цандера с коэффициентом пропускания K_{MZM1} и базовым напряжением 2 В для обеспечения сдвига фаз на $\pi/2$

$$E_{PM1}(t) = j \cdot K_{MZM1} E_{SP1}(t)$$

$$\cdot exp \left[j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{+} K_{\times 1} U_{G} \cdot I(t) \cdot cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) - \rightarrow \right.$$

$$\left. \left. \left. \left. \left. \left. -j \frac{\pi}{U_{\pi}} K_{+} K_{\times 2} K_{E} U_{G} \cdot Q(t) \cdot sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) \right] \right] \right] \right]$$

$$(10)$$

Интенсивность оптической волны $E_{PM2}(t)$ на выходе нижнего интерферометра Маха-Цендера с коэффициентом передачи K_{MZM2}

$$E_{PM2}(t) = j \cdot K_{MZM2} \cdot E_{SP2}(t)$$

$$\cdot \exp\left[j\frac{\pi}{U_{\pi}}K_{-}K_{Y1}K_{\times 1}U_{G} \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}) + j\frac{\pi}{U_{\pi}}K_{-}K_{Y2}K_{\times 2}K_{E}U_{G} \right]$$

$$\cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \varphi_{RF})$$
(11)

после оптического фазовращателя на $\pi/2$ с коэффициентом передачи K_{OPS} , оптическое излучение приобретает вид

$$E_{OPS}(t) = -K_{OPS}K_{MZM2}E_{SP2}(t) \cdot \exp\left[j\frac{\pi}{U_{\pi}}K_{-}K_{Y1}K_{\times 1}U_{G}I(t) \cdot \sin\left(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}\right) + \rightarrow \leftarrow +j\frac{\pi}{U_{-}}K_{-}K_{Y2}K_{\times 2}K_{E}U_{G}Q(t) \cdot \cos\left(\omega_{RF}t + \varphi_{RF}\right)\right].$$
(12)

На выходе оптического сумматора формируется оптическое поле с интенсивностью

$$E_{QM}(t) = E_{PM1}(t) + E_{OPS}(t).$$

С учетом (10) и (12) на выходе оптического телескопа с коэффициентом пропускания *K_{opt}* формируется выходной сигнал передающей станции

$$E_{TS}(t) = K_{opt} \cdot E_{QM}(t) = K_{opt} \cdot [E_{PM1}(t) + E_{OPS}(t)].$$

Причём

$$\begin{split} & E_{TS}(t) = j \cdot K_{opt} K_{MZM1} \cdot E_{SP1}(t) \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi}{U_{\pi}}K_{+}K_{\times 1}U_{G} \cdot I(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \phi_{RF})\right] \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{\pi}{U_{\pi}}K_{+}K_{\times 2}K_{E}U_{G} \cdot Q(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \phi_{RF})\right] \longrightarrow \\ & \leftarrow -K_{opt}K_{OPS}K_{MZM2} \cdot E_{SP2}(t) \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi}{U_{\pi}}K_{-}K_{Y1}K_{\times 1}U_{G} \cdot I(t) \cdot \sin(\omega_{RF}t + \phi_{RF})\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{\pi}{U_{\pi}}K_{-}K_{Y2}K_{\times 2}K_{E}U_{G} \cdot Q(t) \cdot \cos(\omega_{RF}t + \phi_{RF})\right] \end{split}$$
(13)

Применяя разложение Якоби–Ангера [20, 21] к формуле (13), получаем представление комплексного сигнала I/Q модулятора в спектральной (а) и временной (б) областях, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Представление оптического сигнала с однополосной квадратурной фазовой манипуляцией в спектральной (а) и временной (б) областях

В соответствии с предложенной структурой когерентной оптической передачи, показанной на рис. 1, с использованием преобразований Гильберта реализован метод формирования оптического излучения с одной боковой полосой, модулированного в I/Q оптическом модуляторе радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. На рис. 4 представлен формируемый однополосный оптический сигнал с длиной волны 1550 нм в частотной (а) и временной (б) областях.

Оценка влияния параметров оптической турбулентности на параметры лазерный системы спутниковой связи. Для приложений лазерной связи как по восходящей, так и по нисходящей линии связи модель профиля структурной характеристики флуктуаций показателя преломления $C_n^2(h)$ необходима для правильного описания изменений оптической турбулентности в зависимости от высоты орбиты ИСЗ h.

Несколько высотных моделей профилей $C_n^2(h)$ используются техническим сообществом для трасс «Земля-космос» или «космос-Земля». Большинство этих моделей предсказывают близкие результаты, даже если они ориентируются на средние условия турбулентности с небольшими флуктуациями показателя преломления.

Одной из наиболее универсальных моделей структуры показателя преломления является высотная модель Хафнагеля-Валли (Hufnagel-Valley, HV), описанная в [25]. Модель определяет связь структурной характеристики флуктуаций показателя преломления с номинальным значением структурной характеристики $C_n^2(0)$ на уровне Земли в м^{-2/3}:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27}\right)^2 \left(\frac{h}{100000}\right)^{10} exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + \rightarrow \\ \leftarrow +2.7 \cdot 10^{-16} exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + C_n^2(0) \cdot exp\left(-\frac{h}{100}\right).$$
(14)

Псевдоскорость ветра v в формуле (14) рассчитывается исходя из модели скорости ветра Бафтона, где скорость ветра у земной поверхности обычно полагают равной 5 м/с.

На рис. 5 показано изменение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления $C_n^2(h)$ от высоты орбиты ИСЗ *h* для модели Хафнагеля-Валли при $C_n^2(0) = 1.7 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ и псевдоскорости ветра v=21 м/с. Модель соответствует условиям наблюдения в дневного время суток для обсерватории Альбукирки (Нью Мексико, США).



Рис. 5. Изменение структурной характеристики флуктуаций показателя преломления от высоты орбиты ИСЗ для модели Хафнагеля-Валли

Гауссов пучок, распространяющийся вдоль оси z, можно охарактеризовать на апертуре телескопа передатчика (z = 0) радиусом пятна луча W₀, при котором оптическая интенсивность падает до уровня $1/e^2$ от максимума на оси луча, волновым числом $k=2\pi/\lambda_{opt}$ и радиусом кривизны F₀, определяющим формирование луча. Случаи F₀ = ∞ , F₀ > 0 и F₀ < 0 соответствуют формам коллимированного, сходящегося и расходящегося луча соответственно.

Для описания интенсивности оптического луча в заданном пространственном положении z = L используются параметры луча во плоскости передатчика z = 0: параметр кривизны Θ_0 и коэффициент Френеля Λ_0 . Причём [17, 22, 23]

$$\Theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0};$$
 (15)

$$\Lambda_0 = \frac{2 \cdot L}{k \cdot W_0^2} \,. \tag{16}$$

Аналогичным образом при радиусе кривизны F определяются параметры луча в плоскости z = L (удалении на L от передатчика),

$$\Theta = \frac{\Theta_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} = 1 + \frac{L}{F} ; \qquad (17)$$

$$\Lambda = \frac{2 \cdot L}{k \cdot W^2}.$$
(18)

С учетом (15)–(18) радиус пятна луча в плоскости на расстоянии *L* от передатчика (на телескопе) может быть рассчитан по формуле [24]

$$W = W_0 \cdot \sqrt{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} = \sqrt{W_0^2 + \frac{\lambda_{opt}^2 \cdot L^2}{\pi^2 \cdot W_0^2}}.$$
 (19)

Интенсивность оптической волны представляет квадрат амплитуды оптического поля [24]. На радиальном отклонении *r* от оптической оси интенсивность определяется

$$I(r,L) = I_0 \cdot \left[\frac{W_0}{W}\right]^2 \cdot exp\left[-\frac{2 \cdot r^2}{W^2}\right],$$
(20)

где $I_0 = I_0(0,0)$ – излучение на выходе передатчика на центральной линии оси, а индекс 0 обозначает излучение в свободном пространстве (без турбулентности).

Функция плотности вероятности нормированной интенсивности оптического излучения I (PDF) указанной выше модели может быть выражена как [25]

$$P(I) = \frac{2 \cdot (\alpha \cdot \beta)^{(\alpha + \beta)/2}}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} I^{\{(\alpha + \beta)/2\} - 1} K_{\alpha - \beta} \left(2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot \beta \cdot I} \right), I > 0, \qquad (21)$$

где Г(·)– гамма-функцию; К $_{n}(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя
n-го порядка.

Эффективное количество мелкомасштабных α и крупномасштабных β вихрей в рассеивающей среде определяется формулами

$$\alpha = \left\{ exp\left[\frac{0.49 \cdot \sigma_R^2}{\left(1 + 1.11 \cdot \sigma_R^{12/5} \right)^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} ; \qquad (22)$$

$$\beta = \left\{ exp\left[\frac{0.51 \cdot \sigma_R^2}{\left(1 + 0.69 \cdot \sigma_R^{12/5} \right)^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1},$$
(23)

а индекс мерцания - выражением

$$\sigma_I^2(L) = exp\left(\frac{0.49 \cdot \sigma_R^2}{(1+1.11 \cdot \sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51 \cdot \sigma_R^2}{(1+0.69 \cdot \sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right) - 1.$$

Дисперсия Рытова

$$\sigma_R^2 = 1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} L^{11/6} \tag{24}$$

определяется структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления C_n^2 . Вероятностное распределение гамма-гамма-функции модели атмосферной турбулентности в зависимости от распределения интенсивности показано на рис. 6.



Рис. 6. Функция плотности вероятности гамма-гамма как функция интенсивности на разном расстоянии от наземной станции

Процессы, такие как поглощение, рассеяние, мерцание, затухание и многолучевое распространение, влияющие на качество принимаемого сигнала, будут доминировать над эффектом неопределенности в прямой видимости. В частности, пространственные потери мощности сигнала при его прохождении через свободное пространство равны [26]

$$Losses = \left(\frac{\lambda_{opt}}{4 \cdot \pi \cdot L}\right)^2.$$
⁽²⁵⁾

Следовательно, электрооптические компоненты, такие как оптические компоненты телескопа, блок слежения, блок оптического интерфейса между передатчиком и приемником и рулевые зеркала, все содержатся в структуре двухосного подвеса (азимут и угол места), в то время как другие электронные блоки расположены вне карданного подвеса. Таким образом, из-за углового смещения спутника (т. е. вращения вокруг центра тяжести тела и движения по орбите) незначительная вибрация пространственного положения ИСЗ будет усиливаться несоосностью направленности телескопов и оказывать значительное влияние на интенсивность принимаемого лазерного луча. Более того, в сочетании с большим расстоянием, на которое распространяется лазерное излучение при связи со спутниками, результирующая ошибка наведения передаваемого лазерного луча будет расти.

Математически ошибка наведения θ_r (в радиальном) из-за механической вибрации определяется ошибками по двум осям (ошибками по углу возвышения $\theta_{elevation}$ и по углу азимута $\theta_{azimuth}$):

$$\theta_r = \sqrt{\theta_{azimuth}^2 + \theta_{elevation}^2} \,. \tag{26}$$

При стандартном отклонении угла ошибки наведения σ_{θ} распределение вероятностей угла радиальной ошибки наведения определяется функцией [26]

Izvestiya SFedU. Engineering Sciences

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma_{\theta}^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2 \cdot \sigma_{\theta}^2}\right).$$
(27)

Мощность оптического сигнала в приемнике

$$P_R = P_T \times \eta_T \times G_T \times l_T \times \left(\frac{\lambda_{opt}}{4 \cdot \pi \cdot L}\right)^2 \times \eta_R \times G_R \times l_R$$
(28)

определяется мощностью оптического излучения, генерируемого передатчиком P_T , эффективностью оптического передатчика η_T , усилением телескопа передатчика G_T , ошибкой наведения передатчика l_T , расстоянием между передатчиком и приемником L, эффективностью оптического приемника η_R ; коэффициентом усиления телескопа приемника G_R и ошибкой наведения приемника. l_R .

Коэффициенты усиления телескопов передатчика и приемника с диаметрами D_T и D_R определяются выражениями

$$G_T = \left(\frac{\pi \cdot D_T}{\lambda_{opt}}\right)^2$$
; $G_R = \left(\frac{\pi \cdot D_R}{\lambda_{opt}}\right)^2$. (29)

Заметим, что коэффициенты усиления телескопов могут быть различны для наземной и спутниковой станций. Потери наведения лазерного луча для передатчика и приемника соответственно определяются следующим образом [29]

$$l_T = \exp(-G_T \cdot \theta_T^2); \ l_R = \exp(-G_R \cdot \theta_R^2). \tag{30}$$

Подставляя (29) и (30) в (28), находим

$$P_{R} = P_{T} \frac{t_{DA_{T}}}{A_{T}} \frac{t_{DA_{R}}}{A_{R}} \left(\frac{\pi \cdot D_{T} D_{R}}{4 \cdot \lambda_{opt} \cdot L}\right)^{2} exp\left[-\left(\frac{\pi \cdot D_{T}}{\lambda}\right)^{2} \theta_{T}^{2} - \left(\frac{\pi \cdot D_{R}}{\lambda_{opt}}\right)^{2} \theta_{R}^{2}\right].$$
 (31)

Количественная оценка влияния атмосферы на принимаемую мощность оптического излучения. Полученные соотношения (1)–(32) позволяют перейти к количественной оценке влияния на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра принимаемой апертуры при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутником для системы лазерной связи с помощью программы Optisystem версии 20. Параметры анализируемого атмосферного канала представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры атмосферного канала

Параметр	Значение
	параметра
Длина волны, нм	1550
мощность передачи (дБм)	1.99
Диаметр апертуры передатчика, мм	100
Диаметр апертуры приемника, мм	100, 120, 140
Эффективность передатчика и приемника	0.8
Угол ошибки наведения передатчика и приемника, мкрад	0; 1; 2
Дополнительные потери на трассе Земля-ИСЗ, дБ	1
Высота над уровнем моря, км	20
Структура показателя преломления C_n^2 , м ^{-2/3}	$7.5885 \cdot 10^{-19}$

В соответствии с параметрами атмосферного канала на рис. 7–9 показаны зависимости принимаемой мощности оптического излучения (в дБм) от протяженности канала в отсутствии атмосферной турбулентности при трех значениях углов ошибки наведения (0; 1 и 2 мкрад), диаметре апертуры передатчика 10 см и трех значениях диаметра апертуры приемника (100; 120 и 140 мм).



Рис. 7. Принимаемая мощность оптического излучения как функция протяженности канала при отсутствии атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 100 мм



Рис. 8. Принимаемая мощность оптического излучения как функция протяженности канала при отсутствии атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 120 мм



Рис. 9. Принимаемая мощность оптического излучения как функция протяженности канала при отсутствии атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 140 мм

В данной статье продемонстрированы параметры анализа оптического канала, такие как угол ошибки наведения и диаметр апертуры приемника без учета и с учетом атмосферной турбулентности на различных расстояниях. На этих рисунках отражено поведение принимаемой оптической мощности в зависимости от расстояния при угле ошибки наведения, равном 0,1,2 мкрад, и диаметре апертуры приемника 100, 120, 140 мм. Результат показывает снижение принимаемой оптической мощности при увеличении расстояния передачи. Без учета атмосферной турбулентности на рисунке 7 показана дальность канала передачи от 350 до 700 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 100 мм. Принятая оптическая мощность на 350 км зарегистрирована (-37,734 дБм, – 38,091 дБм и -39,161 дБм), а на 700 км зарегистрирована (-43,755 дБм, -44,112 дБм и -45,182 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1 и 2 соответственно. На рисунке 8 показан диапазон канала передачи от 450 до 800 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 120 мм. Принятая оптическая мощность на 450 км зарегистрирована (-43,331 дБм, -43,766 дБм и -45,072 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1, 2 соответственно. На рисунке 9 показан диапазон дальности канала передачи от 500 до 900 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 140 мм. Полученная оптическая мощность на 500 км зарегистрирована (-37,910 дБм, -38,438 дБм и -40,022 дБм), а на 900 км (-43,015 дБм, -43,543 дБм и -45,128 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1 и 2 мкрад соответственно.

Уровни принимаемой мощность оптического излучения подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние до 700 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм при отсутствии турбулентности в атмосфере. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 450 ... 800 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 900 км.



Рис. 10. Зависимость принимаемой оптической мощности от дальности канала при атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 100 мм



Рис. 11. Зависимость принимаемой оптической мощности от дальности канала при атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 120 мм



Рис. 12. Зависимость принимаемой оптической мощности от дальности канала при атмосферной турбулентности. Диаметр апертуры приемника 140 мм

На рис. 10-12 представлены зависимости принимаемой оптической мощности от дальности канала с учетом атмосферной турбулентности при трех значениях углов ошибки наведения (0; 1 и 2 мкрад), диаметре апертуры передатчика 100 мм и трех значениях диаметра апертуры приемника (100; 120 и 140 мм). Структурная характеристика флуктуаций показателя преломления принята равной $7.5885 \cdot 10^{-19}$ м^{-2/3}. На рисунке 10 показан диапазон канала передачи от 350 до 650 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 100 мм. Принятая оптическая мощность на 350 км зарегистрирована (-38,180 дБм, -38,536 дБм и -39,607 дБм), а на 650 км зарегистрирована (-44,684 дБм, -45,041 дБм и -46,112 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1, 2 соответственно. На рис. 11 показан диапазон канала передачи от 400 до 650 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 120 мм. Принятая оптическая мощность на 400 км была зарегистрирована (-37,956 дБм, -38,392 дБм и -39,698 дБм), а на 650 км зарегистрирована (-43,101 дБм, -43,536 дБм и -44,842 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0,1, 2 соответственно. На рис. 12 показан диапазон канала передачи от 450 до 700 км при диаметре апертуры передатчика 100 мм и диаметре апертуры приемника 140 мм. Принятая оптическая мощность на 450 км была зарегистрирована (-37,842 дБм, -38,390 дБм и -39,954 дБм), а на 700 км зарегистрирована (-42,557 дБм, -43,085 дБм и -44,670 дБм) при угле ошибки наведения, равном 0; 1 и 2 соответственно.

Уровни принимаемой мощность оптического излучения после прохождения через атмосферу с высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние 350 ... 650 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 400 ... 650 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 700 км.

Сравнительный анализ графиков на рис. 7–12 показывает, что из-за высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, дальность связи уменьшается с 900 км до 700 км (на 30 %) при диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 140 мм.

Заключение. Лазерная спутниковая связь считается критически важной технологией для высокоскоростной связи с большой пропускной способностью. Лазерный луч можно использовать в качестве сигнала, передающего информацию и данные в пределах прямой видимости, с высокой пропускной способностью и каналом связи между удаленными объектами. Действительно, наведение лазерного луча на движущийся объект, такой как спутник, или от него, является одним из самых сложных процессов для оптической космической связи.

Предложенное формирование когерентной оптической системы передачи для создания оптической однополосной модуляции с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK) исследуется с помощью теории преобразования Гильберта и интерферометра Маха Цендера с двойным приводом (DD-MZM). Анализ канала оценивается при воздействии атмосферной турбулентности. для трех значений углов ошибки наведения (0; 1 и 2 мрад), диаметра апертуры передатчика 10 см и трех значений диаметра апертуры приемника (100; 120 и 140 мм) при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутник для системы лазерной связи на основе атмосферной высотной модели структурной характеристики флуктуаций показателя преломления Хафнагеля-Валли (H-V), где оптическая волна представляет собой коллимированный пучок с длиной волны 1550 нм.

Использование предложенных моделей для интенсивности принимаемого оптического излучения после прохождения трассы Земля-спутник с учетом воздействия эффектов турбулентной атмосферы и ошибок нацеливания антенн позволяет количественно оценить снижение интенсивности принимаемого спутником оптического излучения при различных высотах орбит спутников, диаметрах и эффективности оптических телескопов. принимаемую мощность определяют под влиянием таких параметров канала, как диаметр апертуры приемника при (100; 120 и 140 мм) и угол ошибки наведения при (1; 2 и 3 мкрад) в зависимости от расстояния. а под действием атмосферной турбулентности со структурой показателя преломления 7,5885·10⁻¹⁹ м^{-2/3}.

Уровни принимаемой мощность оптического излучения подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние до 700 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм при отсутствии турбулентности в атмосфере. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 450 ... 800 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 900 км.

Уровни принимаемой мощность оптического излучения после прохождения через атмосферу с высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, подтверждают возможность работы спутниковой системе лазерной связи при передаче данных на расстояние 350 ... 650 км при диаметрах апертуры передающего и приёмного телескопов 100 мм. При диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние диаметра приёмного телескопа 120 мм возможна передача данных на расстояние 400 ... 650 км. Увеличение диаметра приёмного телескопа до 140 мм увеличивает дальность до 700 км.

Сравнительный анализ графиков на рис. 7–12 показывает, что из-за высотной турбулентностью, описываемой моделью Хафнагеля-Валли для структурной характеристики флуктуаций показателя преломления для трассы Земля-спутник, дальность связи уменьшается с 900 км до 700 км (на 30 %) при диаметре апертуры передающего телескопа 100 мм и приёмного телескопа 140 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Hyde G., Edelson B.I.* Laser satellite communications: Current status and directions // Space Policy. 1997. Vol. 13, No. 1. P. 47-54.
- 2. *Toyoshima M.* Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications // Journal of Optical Networking. 2005. Vol. 4, No. 6. P. 300-311.

- Chan V.W.S. Optical satellite networks // Journal of Lightwave Technology. 2003. Vol. 21, No. 11. – P. 2811.
- Phillips R.L., Andrews L.C. Analysis of a satellite communication channel: optical scintillations and fade statistics // Image Propagation through the Atmosphere. – SPIE, 1996. – Vol. 2828. – P. 189-197.
- Sandalidis H.G. Performance of a laser earth-to-satellite link over turbulence and beam wander using the modulated gamma–gamma irradiance distribution // Applied optics. – 2011. – Vol. 50, No. 6. – P. 952-961.
- Wang F. et al. Wander of a Gaussian-Beam Wave Propagating through Kolmogorov and Non-Kolmogorov Turbulence along Laser-Satellite Communication Uplink // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 162.
- Toyoda M. Intensity fluctuations in laser links between the ground and a satellite // Applied optics. – 2005. – Vol. 44, No. 34. – P. 7364-7370.
- Dios Otín V.F. et al. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station– satellite uplink. – 2004.
- Jingsong X., Xiaolei Z. Scintillation of a tracked Gaussian beam for ground-to-satellite laser communication. – 2010.
- 10. Darcie T.E. et al. Lightwave system using microwave subcarrier multiplexing // Electronics Letters. 1986. Vol. 15, No. 22. P. 774-775.
- 11. *Hui R. et al.* Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission // Journal of lightwave technology. 2002. Vol. 20, No. 3. P. 417.
- Salter M. et al. Circuits and system simulations for 100Gb/s optical SCM transmission // 2009
 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems-(ICECS 2009).
 IEEE, 2009. P. 960-963.
- Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1997. – Vol. 45, No. 8. – P. 1410-1415.
- Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fibre-radio systems // Electronics letters. – 1997. – Vol. 33, No. 1. – P. 74-75.
- Nirmalathas A., Smith G.H., Novak D. Sensitivity analysis of optical SSB generation using a dual-electrode Mach-Zehnder modulator // International Topical Meeting on Microwave Photonics. Technical Digest (including High Speed Photonics Components Workshop) (Cat. No. 98EX181). – IEEE, 1998. – P. 79-82.
- Fernandez E. et al. Link budget model and applications for laser communications through the atmosphere // Free-Space Laser Communication Technologies V. – SPIE, 1993. – Vol. 1866. – P. 191-202.
- 17. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media // Laser Beam Propagation Through Random Media: Second Edition. 2005.
- Щербаков В.В., Солодков А.Ф., Задерновский А.А. Расширенные форматы однополосной модуляции двухэлектродного модулятора Маха-Цендера // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 395-399.
- Хуссейн А.М.М., Румянцев К.Е. Формирование однополосной квадратурной фазовой манипуляции радиосигналов на поднесущих частотах в когерентной оптической системе коммуникации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – №. 5. – С. 209-220.
- Cuyt A.A.M. et al. Handbook of continued fractions for special functions. Springer Science & Business Media, 2008.
- Бейтмен Г., Эрдейи А. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены // Высшие трансцендентные функции. Т. 2. – 2-е изд.: пер. с англ. Н.Я. Виленкина. – М.: Наука, 1974. – 296 с.
- 22. Andrews L.C., Phillips R.L., Hopen C.Y. Laser beam scintillation with applications. T. 99. SPIE press, 2001.
- Alda J. Laser and Gaussian beam propagation and transformation // Encyclopedia of optical engineering. – 2003. – Vol. 999. – P. 1013-1013.
- 24. Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of photonics. John Wiley & sons, 2019.
- 25. *Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S.* Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®. CRC press, 2019.

- 26. *Kaushal H., Jain V.K., Kar S.* Free space optical communication. New Delhi: Springer india, 2017. 60 p.
- Toyoshima M. et al. Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems // JOSA A. – 2002. – Vol. 19, No. 3. – P. 567-571.
- 28. *Mahmood H.A., Yvgen'Evich R.K., Shookor A.K.H.* Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing/amplitude shift keying // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 5 (215). С. 141-149.
- 29. Aviv D. Laser space communications. Artech, 2006.

REFERENCES

- 1. *Hyde G., Edelson B.I.* Laser satellite communications: Current status and directions, *Space Policy*, 1997, Vol. 13, No. 1, pp. 47-54.
- Toyoshima M. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications, Journal of Optical Networking, 2005, Vol. 4, No. 6, pp. 300-311.
- Chan V.W.S. Optical satellite networks, Journal of Lightwave Technology, 2003, Vol. 21, No. 11, pp. 2811.
- Phillips R.L., Andrews L.C. Analysis of a satellite communication channel: optical scintillations and fade statistics, *Image Propagation through the Atmosphere*. SPIE, 1996, Vol. 2828, pp. 189-197.
- Sandalidis H.G. Performance of a laser earth-to-satellite link over turbulence and beam wander using the modulated gamma–gamma irradiance distribution, *Applied optics*, 2011, Vol. 50, No. 6, pp. 952-961.
- Wang F. et al. Wander of a Gaussian-Beam Wave Propagating through Kolmogorov and Non-Kolmogorov Turbulence along Laser-Satellite Communication Uplink, *Atmosphere*, 2022, Vol. 13, No. 2, pp. 162.
- 7. Toyoda M. Intensity fluctuations in laser links between the ground and a satellite, Applied optics, 2005, Vol. 44, No. 34, pp. 7364-7370.
- Dios Otín V.F. et al. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station– satellite uplink. – 2004.
- 9. *Jingsong X., Xiaolei Z.* Scintillation of a tracked Gaussian beam for ground-to-satellite laser communication, 2010.
- 10. Darcie T.E. et al. Lightwave system using microwave subcarrier multiplexing, *Electronics Letters*, 1986, Vol. 15, No. 22, pp. 774-775.
- 11. *Hui R. et al.* Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission, *Journal of lightwave technology*, 2002, Vol. 20, No. 3, pp. 417.
- 12. Salter M. et al. Circuits and system simulations for 100Gb/s optical SCM transmission, 2009 16th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems-(ICECS 2009). IEEE, 2009, pp. 960-963.
- Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators, *IEEE Transactions on microwave theory and tech*niques, 1997, Vol. 45, No. 8, pp. 1410-1415.
- 14. Smith G.H., Novak D., Ahmed Z. Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fibre-radio systems, *Electronics letters*, 1997, Vol. 33, No. 1, pp. 74-75.
- Nirmalathas A., Smith G.H., Novak D. Sensitivity analysis of optical SSB generation using a dual-electrode Mach-Zehnder modulator, International Topical Meeting on Microwave Photonics. Technical Digest (including High Speed Photonics Components Workshop) (Cat. No. 98EX181). IEEE, 1998, pp. 79-82.
- Fernandez E. et al. Link budget model and applications for laser communications through the atmosphere, Free-Space Laser Communication Technologies V. SPIE, 1993, Vol. 1866, pp. 191-202.
- 17. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media, Laser Beam Propagation Through Random Media: Second Edition, 2005.
- Shcherbakov V.V., Solodkov A.F., Zadernovskiy A.A. Rasshirennye formaty odnopolosnoy modulyatsii dvukhelektrodnogo modulyatora Makha-Tsendera [Extended formats of singlesideband modulation of a two-electrode Mach-Zehnder modulator], *Elektronika i* mikroelektronika SVCh [Microwave Electronics and Microelectronics], 2019, Vol. 1, No. 1, pp. 395-399.

- 19. Khusseyn A.M.M., Rumyantsev K.E. Formirovanie odnopolosnoy kvadraturnoy fazovoy manipulyatsii radiosignalov na podnesushchikh chastotakh v kogerentnoy opticheskoy sisteme kommunikatsii [Formation of single-sideband quadrature phase shift keying of radio signals at subcarrier frequencies in a coherent optical communication system], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 5, pp. 209-220.
- 20. *Cuyt A.A.M. et al.* Handbook of continued fractions for special functions. Springer Science & Business Media, 2008.
- Beytmen G., Erdeyi A. Funktsii Besselya, funktsii parabolicheskogo tsilindra, ortogonal'nye mnogochleny [Bessel functions, parabolic cylinder functions, orthogonal polynomials], *Vysshie transtsendentnye funktsii* [Higher transcendental functions]. Vol. 2. 2nd ed.: trans. from engl. N.Ya. Vilenkina. Moscow: Nauka, 1974, 296 p.
- 22. Andrews L.C., Phillips R.L., Hopen C.Y. Laser beam scintillation with applications. Vol. 99. SPIE press, 2001.
- 23. Alda J. Laser and Gaussian beam propagation and transformation, *Encyclopedia of optical engineering*, 2003, Vol. 999, pp. 1013-1013.
- 24. Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of photonics. John Wiley & sons, 2019.
- 25. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®. CRC press, 2019.
- Kaushal H., Jain V.K., Kar S. Free space optical communication. New Delhi: Springer india, 2017, 60 p.
- 27. Toyoshima M. et al. Optimum divergence angle of a Gaussian beam wave in the presence of random jitter in free-space laser communication systems, JOSA A, 2002, Vol. 19, No. 3, pp. 567-571.
- Mahmood H.A., Yvgen'Evich R.K., Shookor A.K.H. Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing/amplitude shift keying, *Izvestiya YuFU*. *Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5 (215), pp. 141-149.
- 29. Aviv D. Laser space communications. Artech, 2006.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н. К.Б. Дахкильгова.

Махмуд Хуссейн Ахмед Махмуд – Дияла университет; e-mail: hussein.ahmed8282@gmail.com; г. Дияла, Ирак; кафедра инженерных коммуникаций.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rke2004@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности и телекоммуникационных систем.

Аль-Бегат Адиль Хамид Шакир – Технический институт Наджафа; Технический университет Аль-Фурат Аль-Авсат; e-mail: albegatadil72@gmail.com; Наджаф, Ирак.

Hussein Ahmed Mahmood – University of Diyala; e-mail: hussein.ahmed8282@gmail.com; Diyala, Iraq; the department of communications engineering.

Rumyantsev Konstantin Yvgen'evich – Southern Federal University; e-mail: rke2004@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems.

Al-Begat Adil Hameed Shakir – Najaf Technical Institute, Al-Furat Al-Awsat Technical University; e-mail: albegatadil72@gmail.com; Najaf, Iraq.