

## Особенности контроля положения оси лазерного излучения с использованием управляемых электрооптических систем в атмосферных оптических линиях связи

С.А. Шагако<sup>1,a,\*</sup>, В.В. Давыдов<sup>1,2,b,†</sup>, В.В. Наумова<sup>2,c,‡</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, факультет инфокоммуникационных сетей и систем, кафедра фотоники и линий связи  
Россия, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт электроники и телекоммуникаций, высшая школа прикладной физики и космических технологий  
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
(Поступила в редакцию 29.05.2024; подписана в печать 17.07.2024)

Рассмотрены перспективы развития и преимущества использования атмосферных оптических линий связи для решения различных задач. Обозначена основная проблема в этих линиях, связанная с рассогласованием положения осей лазерного излучения и фотоприемника при передаче оптического сигнала. Оценены возможности существующих систем подстройки траектории оси лазерного излучения с пассивными оптическими элементами, отмечены ограничения и проблемы возникающие при их эксплуатации. Предложен новый принцип подстройки положения оси лазерного излучения с использованием электрооптической системы, в который изменяется показатель преломления оптического материала под действием управляющих напряжений. Для разработанной нами конструкции автоматической электрооптической системы выведены математические соотношения, которые позволяют выбрать ее оптимальную конфигурацию, а также оптический материал и рассчитать диапазон смещения оптической оси лазерного излучения, в котором возможна её автоматическая подстройка. Представлены результаты оригинальных исследований функциональных возможностей по подстройке положения оси лазерного излучения для различных вариантов оптического материала, параметров оптической пластины и конфигурации их размещения (угол наклона к оси распространения лазерного излучения). Определены оптические материалы, которые целесообразно использовать в разработанной нами конструкции.

PACS: 42.68.Wt

УДК: 535.31

Ключевые слова: система автоматической подстройки лазерного излучения, воздушный оптический канал связи, атмосферные оптические линии связи, лазерное излучение.

### ВВЕДЕНИЕ

В современном мире одним из важных элементов развития человечества являются системы связи [1–4]. Для решения различных задач по передаче информации в настоящее время используются различные системы связи. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) различных модификаций (магистральные, локальные, внутренние и прочие) [3–5] занимают более 80% всего сегмента систем связи. В крупных городах их доля превышает 90%. Системы коммуникаций перегружены большим числом линий [5–8]. Это приводит к большим проблемам при их эксплуатации. Оптическая сеть находится в условиях высокой перегрузки. Использование различных методов передачи информации при росте объемов трафика эту проблему не решают. Требуется прокладка новых линий. В плотной городской среде, особенно с высотными зданиями, в которых находятся большое количество пользователей, возникает много проблем.

Основная из них связана с тем, что подземные коммуникации полностью заполнены (их состояние не все-

гда удовлетворительное). Вторжение в эту систему может привести к обрывам. Поэтому, если прокладывать новые каналы связи в подземных коммуникациях, то необходимо выполнять реконструкцию сетей, что очень дорого и занимает большой объем времени. В это же время прокладка воздушных линий связи с оптическим волокном между зданиями в крупных городах запрещена. Это портит дизайн города, ухудшает экологию и создает много проблем при обрыве кабеля, например от сильного ветра и прочие.

Одним из интересных вариантов решения данной проблемы в городской среде является использования атмосферных оптических каналов связи (лазерное излучение распространяется между передающим и приемным модулем по воздуху на расстояния до 200 м, в ряде случаев и более [9–12]). Например, атмосферный оптический канал связи между зданиями ПАО «Ростелеком» и ПАО «Газпром» через реку Нева (рис. 1). Атмосферная оптическая линия связи (АОЛС) активно используется в горных районах различных стран, так как прокладка оптического волокна в ряде случаев крайне затруднена. В этом случае расстояния увеличиваются до 2000 м. Данный канал связи используется в морском пространстве на расстояниях до 5000 м и более в хорошую погоду [13].

Кроме того, атмосферные оптические линии связи активно внедряются на крупных предприятиях и аэро-

\* as.shagako15@yandex.ru

† davydov\_vadim66@mail.ru

‡ vika\_025898@mail.ru



Рис. 1. Здания соединенные с использованием АОЛС через Неву — здания ПАО «Газпром» и ПАО «Ростелеком»

портах, где прокладка дополнительных линий создаст много проблем. Морские порты, также относятся к случаям использования АОЛС [14].

При передаче данных с помощью АОЛС возникают следующие проблемы:

1. погодные условия, такие как: снег, дождь, туман;
2. атмосферное поглощение;
3. дисперсия (влияние незначительно);
4. помехи от фоновых источников излучения.

Особенностью эксплуатации атмосферной оптической линии связи является то, что данные проблемы незначительны, так как расстояния небольшие по сравнению с магистральными ВОЛС [4–12]. Эти проблемы решаются путем использования длины волны излучения 1550 нм, увеличением оптического бюджета, добавлением резервного передающего оборудования, добавлением резервных оптических каналов (рис. 2).

Другой особенностью эксплуатации АОЛС является наличие ряда негативных факторов, которых не избежать и их влияние до определенного момента времени можно только ослабить. Это следующее:

1. раскачивание (низкочастотные колебания) зданий, стоек, на которых установлено оборудование АОЛС,
2. осадка фундаментов зданий, на которых установлено оборудование АОЛС.

Это приводит к смещению оптической оси лазерного луча на фотоприемном устройстве, что может привести к потере передаваемой информации.

Данная проблема — одна из основных в работе АОЛС. Особенно часто это происходит в холодное и дождливое время. Смещение оси лазерного излучения от центра фоточувствительного слоя фотоприемного модуля приводит к уменьшению амплитуды регистрируемого сигнала. Отношение сигнал/шум (S/N)

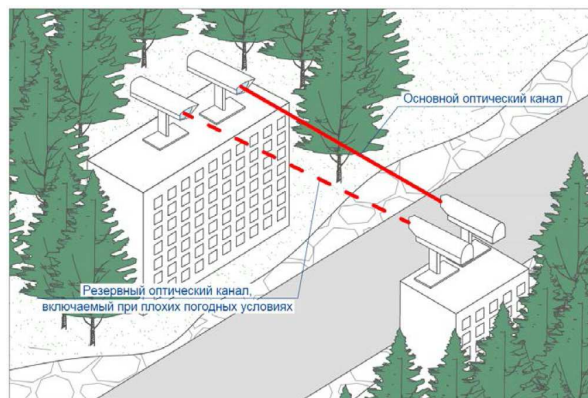


Рис. 2. Схема использования резервного канала, включаемого при плохих погодных условиях

уменьшается, количество битовых ошибок (BER) увеличивается. Это в итоге может привести к потере информации. В настоящее время разработано большое число способов коррекции положения оси лазерного излучения [15–20], которые в основном предназначены для решения локальных задач и не обладают универсальностью применения.

В некоторых конструкциях АОЛС используют фокусирующую линзу или передвижные зеркала [21?–26]. До определенного момента это позволяет сфокусировать лазерное излучение на фоточувствительном слое. Далее лазерное излучение, содержащее информацию, попадает на края линзы и дифракция полностью искажает информацию. Кроме того, за счет отражений от поверхности линзы и неоднократных отражений внутри линзы лазерного луча искажается передаваемая информация, особенно при смещении оси лазерного излучения к краю линзы. Другой способ подстройки положения лазерного излучения на фотоприемнике связан с использованием системы зеркал. Положение этих зеркал определяется использованием данных о положении опорных лазерных лучей на двух фотоприемни-

ках (в ряде случаев используется четыре фотоприемника). Это увеличивает точность подстройки положения зеркал. Недостатком этой системы является износ механики управления положением зеркал по различным причинам, возможное рассогласование положения передающего модуля АОЛС и опорных лазерных лучей. Это приводит к изменению предварительной градуировки в системе и погрешностям при подстройке системы зеркал. В конечном результате это приведет к потере информации и канал станет неработоспособным.

Интересный вариант решения данной задачи представлен в работе [27] с использованием электрооптической системы управления смещением оптической оси лазерного излучения. Наша работа является частично продолжением этой работы, так как в ней учтен при разработке системы контроля ряд полученных результатов в [27], но в основном это новый подход к решению сложной проблемы с поиском новых оптических материалов и расширением функциональных возможностей по подстройке положения оси лазерного излучения.

### 1. КОНСТРУКЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОСИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОГЛОЩАЮЩЕГО СЛОЯ ФОТОПРИЕМНОГО МОДУЛЯ

Принципиальная схема разработанной автоматической электрооптической системы подстройки положе-

$$\Delta L_y = L_1 - L_2 = d \left( \frac{\sin \left( \theta_1 - \arcsin \left( \sin(\theta_1) \cdot \frac{n_a}{n_g} \right) \right)}{\sqrt{\frac{n_g^2 - n_a^2 + n_a^2 \cos^2(\theta_1)}{n_g^2}}} - \frac{\sin \left( \theta_3 - \arcsin \left( \sin(\theta_3) \cdot \frac{n_a}{n_g} \right) \right)}{\sqrt{\frac{n_g^2 - n_a^2 + n_a^2 \cos^2(\theta_3)}{n_g^2}}} \right). \quad (3)$$

Отметим, что значение  $\Delta L_y$  зависит от толщины пластины  $d$ , материала, из которого изготовлены пластины, углов поворота пластин. Углы поворота пластин не связаны друг с другом. Угол падения  $\theta_i$  излучения на грань пластины связан с углом поворота пластины следующим соотношением:

$$\theta_i = 90^\circ - \theta. \quad (4)$$

Управление смещением  $\Delta L_y$  осуществляется за счет изменения показателя преломления  $n_g$ . Для этого на пластины 3 подается постоянное напряжение  $U_{offset}$ . Между пластинами возникает электрическое поле  $E$ , которое изменяет показатель преломления  $n_g$  за счет изменения  $\epsilon$ . В зависимости от оптических свойств материала, а именно, наличия пьезоэффекта, увеличение  $E$  приводит к уменьшению  $n_g$  по квадратичному закону с учетом электрооптического коэффициента Кюри, или к увеличению  $n_g$  по линейному закону с учетом  $r_{ij}$ . Для ниобата лития эти коэффициенты представлены в таблице.

В обоих случаях используется эффект Погкельса.

ния оси лазерного излучения по оси  $FY$  (схема для оси  $FZ$  аналогична) для АОЛС представлена на рис. 3.

Излучение, проходящее через первую пластину, преломляется по закону Снелиуса дважды — на входе в пластину и на выходе. Вследствие этого, излучение отклоняется относительно своего первоначального положения на  $L_1$ . Для определения значения  $L_1$  нами было выведено следующее соотношение:

$$L_1 = d \times \frac{\sin \left( \theta_1 - \arcsin \left( \sin(\theta_1) \cdot \frac{n_a}{n_g} \right) \right)}{\sqrt{\frac{n_g^2 - n_a^2 + n_a^2 \cos^2(\theta_1)}{n_g^2}}}, \quad (1)$$

где:  $n_a$  — показатель преломления воздуха,  $n_g$  — показатель преломления материала, из которого изготовлена пластина.

Далее, излучение, проходя через вторую пластину, также преломляется и приобретает смещение  $L_2$ , которое определяется следующей формулой:

$$L_2 = d \times \frac{\sin \left( \theta_3 - \arcsin \left( \sin(\theta_3) \cdot \frac{n_a}{n_g} \right) \right)}{\sqrt{\frac{n_g^2 - n_a^2 + n_a^2 \cos^2(\theta_3)}{n_g^2}}}, \quad (2)$$

Тогда суммарное смещение оси лазерного излучения в плоскости по оси  $OY$  определим через  $\Delta L_y$ :

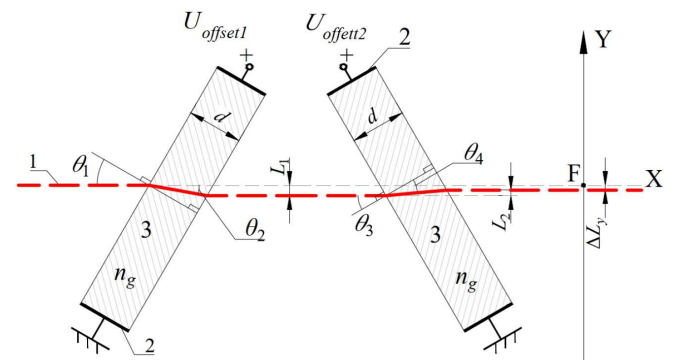


Рис. 3. Принципиальная схема разработанной автоматической электрооптической системы: 1 — Лазерное излучение с информацией, 2 — управляющие плоские электроды с подключенным источником постоянного напряжения, 3 — пластина из оптического материала

Углы поворота пластины и её толщина  $d$  в процессе подстройки не изменяются. Так как это в одном

Таблица. Характеристики типичных материалов с эффектом Поккельса

Кристалл	Симметрия	Электрооптический коэффициент			Показатель преломления
		Обозначение	Численное значение, $\times 10^{10}$ см/В	Длина волны, мкм	
ZnTe	43m	$r_{41}$	4.55	0.5... 0.6	$n_0 = 3.1$
ZnSe			2.0	0.5... 0.6	$n_0 = 2.66$
$\beta$ -ZnS			1.1... 2.0	0.6	$n_0 = 2.364$
GaAs			0.27... 1.2	1.0... 1.8	$n_0 = 3.42$
GaP			1.06	0.5... 0.6	$n_0 = 3.315$
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>			0.95	0.631	$n_0 = 2.11$
Bi <sub>4</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>			0.54	0.631	—
CdTe			6.8	1.06	$n_0 = 2.60$
Bi <sub>40</sub> Ga <sub>2</sub> O <sub>63</sub>	23	$r_{41}$	4.81	0.63	$n_0 = 2.25$
Bi <sub>12</sub> TiO <sub>20</sub>			2.8	0.579	$n_0 = 2.67$
Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub>			3.1	0.85	$n_0 = 2.41$
Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub>			4.35	0.87	$n_0 = 2.45$
LiNbO <sub>3</sub>	3m	$r_{13}$	8.6	0.50... 1.68	$n_0 = 2.286$ $n_e = 2.200$
		$r_{33}$	30.8		
		$r_{51} = r_{42}$	28		
		$r_{12}$	3.4		
		$r_{22}$	7		
LiTaO <sub>3</sub>	3m	$r_{13}$	7	0.50... 0.65	$n_0 = 2.176$ $n_e = 2.180$
		$r_{33}$	30.3		
		$r_{51} = r_{42}$	20		

случае механика, которая имеет определенные условия эксплуатации, рассмотренные ранее, а пластину можно поменять только разобрав систему.

На рис. 4 показана зависимость изменения смещения  $L_1$  оси лазерного излучения от изменения ширины пластины  $d$  для различных оптических материалов, при угле наклона пластины  $\theta_1 = 30^\circ$ . Используется лазерное излучение длиной волны  $\lambda = 1550$  нм:

Дополнительно для значения  $n_g = 1.527$  (кварц) и толщины пластин  $d = 60$  мм была исследована зависимость суммарного смещения  $\Delta L_y$  оси лазерного излучения от угла падения излучения на первую пластину для различных углов падения излучения на вторую пластину  $\theta_3$  (рис. 5).

Полученные результаты (рис. 5) показывают возможность управлением  $\Delta L_y$  в заданных пределах, когда необходимо обеспечить максимальную компенсацию смещения оси лазерного излучения в определенном направлении.

Так как в разработанной системе управление значение  $\Delta L_y$  осуществляется с использованием изменения  $n_g$  были проведены исследования изменения зависимости  $L_1$  от изменения показателя преломления материала, из которого изготовлена пластина для следующих значений углов  $\theta_1 = 80^\circ$  и  $\theta_3 = 10^\circ$  при  $d = 60$  мм. На рис. 6 представлены результаты данного исследования.

Анализ полученных результатов, показывает, что из-

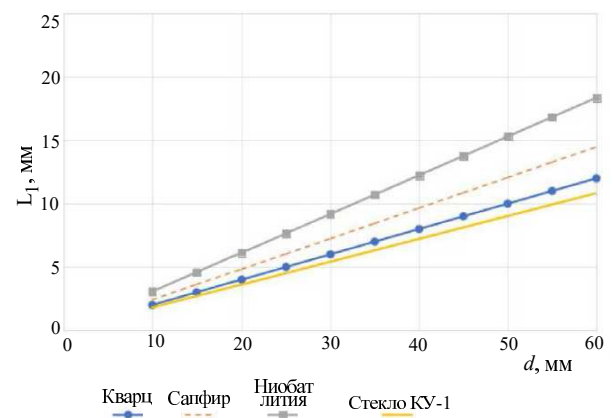


Рис. 4. Зависимость изменения смещения  $L_1$  оси лазерного излучения от изменения ширины пластины  $d$  для различных оптических материалов, при угле наклона пластины  $\theta_1 = 30^\circ$  для длины волны  $\lambda = 1550$  нм

менение значения  $n_g$  обеспечивает диапазон подстройки смещения оси лазерного излучения в пределах  $\pm 12$  мм для заданных значений углов и толщины пластины. Выбором параметров  $\theta_1$ ,  $\theta_3$  и  $d$  можно обеспечить диапазон подстройки смещения оси лазерного излучения больше отмеченного значения при данном

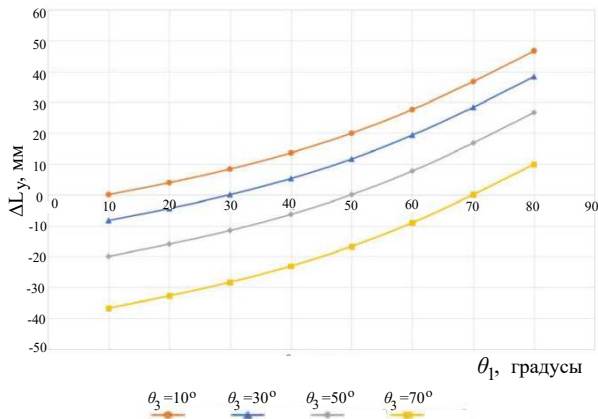


Рис. 5. Зависимость суммарного смещения оси лазерного излучения от угла наклона пластин

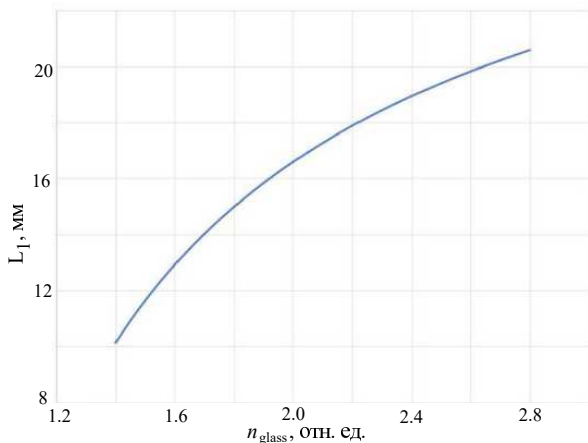


Рис. 6. Зависимость смещения  $L_1$  оси лазерного излучения от показателя преломления материала, из которого изготовлена пластина

диапазоне изменения показателя преломления оптического материала. Это будет следующим этапом нашей работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показал перспективность разработанной нами конструкции для контроля положения оптической оси лазерного излучения в АОЛСВ зависимости от используемого оптического материала (кварц, сапфир, ниобат лития, стекло КИ-1, КИ -2) можно обеспечить различный диапазон подстройки смещения оптической оси.

Значения диапазона подстройки смещения оптической оси определяется толщиной пластины  $d$ , что при использовании ниобата лития накладывает ограничения на размеры пластины по причине его высокой стоимости. При отсутствии серьезных ограничений на бюджет АОЛС использование ниобата лития является наиболее целесообразным по сравнению с другими оптическими материалами. Кроме диапазона подстройки это еще связано с малыми напряжениями (не более 30 В) для управления показателем преломления по сравнению с другими оптическими материалами, в которых как показали проведенные нами эксперименты для управления значением  $n_g$  требуются напряжения до десятка киловольт, что достаточно опасно при эксплуатации.

Отдельного рассмотрения требует вопрос управления смещением оптической оси лазерного излучения если оптические пластины имеют разную толщину  $d$ , что в разработанной конструкции можно обеспечить без больших проблем при условии, что они изготовлены в одной технологической партии, так как может возникнуть сложность в согласовании, которая присутствует в оптических волокнах [28]. Это нами будет рассмотрено в следующих исследованиях.

- [1] Alimi I.A., Monteiro P.P. // Optics and Laser Technology. **176**. 110917 (2022).
- [2] Elsayed E.E // Optical and Quantum Electronics. **56**, N 6. 1020 (2024).
- [3] Abd El-Mottaleb S.A., Singh M., Aly M.H. // Optical and Quantum Electronics. **56**, N 6. 926 (2024).
- [4] Davydov V., Reznikov B., Dudkin V.I. // Energies. **16**, N 3. 1040 (2023).
- [5] Ermolaev A.N., Krishpents G.P., Davydov V.V., Vysoczkiy M.G. // Journal of Physics: Conference Series. **741**, N 1. 012171 (2016).
- [6] Elsayed E.E // Optical and Quantum Electronics. **56**, N 5. 837 (2024).
- [7] Davydov V.V., Dudkin V.I., Velichko E.N., Karseev A.Yu // Journal of Optical Technology. **82**, N 3. 132 (2015).
- [8] Popovskiy N.I., Davydov V.V., Gureeva I.M // ACM International: Conference Proceeding Series. 527 (2021).
- [9] Choudhury P., Nandi D. // Optical and Quantum Electronics. **56**, N 6. 100
- [10] Li L., Ji N., Wu Z., Wu J. // Photonics. **11**, N 4. 334 (2024).
- [11] Chen Y., Ming C., Xie K., Yao H., Dong K // Photonics. **11**, N 4. 326 (2024).
- [12] Cheng Y.-X., Yang M., Lu Z.-J. et al. // Optics Express. **32**, N 7. 12645 (2024).
- [13] Wang J., Li J., Chen D., Ding H., Gao D. // Optics Communications. **557**. 130271 (2024).
- [14] Sathiya Narayanan S.L., Dhanush Devappa B.C., Pawar K. et al. // Results in Optics. **16**. 100689 (2024).
- [15] Kulmer L., Horst Y., Bitachon B.I. et al. // Journal of Lightwave Technology. **42**. 10 (2024).
- [16] Yu Z., Wang W., Zhou X. et al. // Physica Scripta. **99**, N 5. 055540 (2024).
- [17] Hou Y., Lou Y., Chen C. et al. // Hongwai yu Jiguang

- Gongcheng/Infrared and Laser Engineering. **53**, N 4. 20230731 (2024).
- [18] Shishter Y.M., Ali F.H., Young, R.C. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. **72**, N 4. 3607 (2024).
- [19] Zhou X., Lin Z., Gu R. et al. // IEEE Internet of Things Journal. **11**, N 7. 11190 (2024).
- [20] Karpathakis S.F.E., Dix-Matthews B.P., Gozzard D.R., Schediwy S.W. // Appl. Opt. **62**, N 23. 85 (2023).
- [21] Авилов А.А. // Радиооптика МГТУ им Н.Э Баумана Электрон.журн. N 02 11–25. (2016).
- [22] Cernaianu M.O., De Boisdeffre B., Ursescu D. et al. // Romanian Reports in Physics. **68**. S349 (2016).
- [23] Gerbenescu M., Pandelea M., Achim A., Ilescu M. // U.P.B. Sci. Bull. Series A **80**, N 3. 207 (2018).
- [24] Franczek E., Franczek W., Popiolek-Masajada A. // Appl. Sci. **11**, N 16. 7677 (2021).
- [25] Aman W., Al-Kuwari S., Muzzammil M. et al. // Ad Hoc Networks. **142**. 103114. (2023).
- [26] Karpathakis S.F.E., Dix-Matthews B.P., Gozzard D.R., Schediwy S.W. // Appl. Opt. **62**, N 23. G85 (2023).
- [27] Назарова К.С., Давыдов В.В. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. N 4. 2341112 (2023).
- [28] Davydov R.V., Savelev I.K., Lenets V.A. et al. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **10531 LNCS**. 177 (2017).

## Features of controlling the position of the laser radiation axis using controlled electro-optical systems in atmospheric optical communication lines

S.A. Shagako<sup>1,a</sup>, V.V. Davydov<sup>1,2,b</sup>, V.V. Naumova<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич, Faculty of Information and Communication Networks and Systems, Department of Photonics and Communication Lines  
St. Petersburg, 193232, Russia

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Electronics and Telecommunications,  
Higher School of Applied Physics and Space Technologies  
St. Petersburg, 195251, Russia

E-mail: <sup>a</sup>s.shagako15@yandex.ru, <sup>b</sup>davydov\_vadim66@mail.ru, <sup>c</sup>vika\_025898@mail.ru

The prospects for the development and advantages of using atmospheric optical communication lines for solving various tasks are considered. The main problem in these lines is identified, related to the mismatch of the position of the axes of the laser radiation and the photodetector during the transmission of an optical signal, and the possibilities of existing systems for adjusting the trajectory of the axis of laser radiation with passive optical elements are evaluated. The features of the construction of the position of the laser radiation axis using an electro-optical system have been determined and a new automatic adjustment system has been developed. Mathematical relations have been derived for this design of the automatic system, which make it possible to choose its optimal configuration and material for control plates. The functional capabilities of adjusting the position of the laser radiation axis for various design options of an atmospheric optical communication line have been studied.

PACS: 42.68.Wt

**Keywords:** automatic adjustment system of laser radiation, aerial optical communication channel, atmospheric optical communication lines, laser radiation.

Received 29 May 2024.

### Сведения об авторах

1. Шагако Сергей Александрович — студент 4 года обучения; e-mail: s.shagako15@yandex.com;
2. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: davydov\_vadim66@mail.ru.
3. Наумова Виктория Викторовна — инженер; email: vika\_025898@mail.ru.