

Л. В. Шастин^{1,3✉}, А. В. Бритвин¹, Б. В. Поллер^{1,2}

О характеристиках атмосферных лазерных линий для систем мониторинга природных и антропогенных объектов

¹Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Министерство науки и инновационной политики Новосибирской области
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: leonid_shastin@mail.ru

Аннотация. Проблема мониторинга природных и антропогенных объектов в настоящее время вызывает огромный интерес по всему миру. Использование для передачи информации лазерного излучения может помочь значительно увеличить эффективность такого мониторинга. Однако, приемники и передатчики лазерного излучения имеют ряд особенностей и ограничений, особенно с учетом размещения приемо-передающих систем на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Свои требования накладывает и необходимость качественной передачи информации. Таким образом, встает вопрос, какие конфигурации и методы построения передающей лазерной системы использовать, чтобы обеспечить максимальную эффективность передачи информации, а, следовательно, и мониторинга природных и антропогенных объектов. В данной статье мы определили два наиболее эффективных метода построения передающей лазерной системы, а также провели их экспериментальную оценку.

Ключевые слова: ультрафиолетовая (УФ) лазерная передающая система, атмосферная оптическая лазерная связь, системы мониторинга, управление БПЛА

L. V. Shastin^{1,3✉}, A. V. Britvin¹, B. V. Poller^{1,2}

Characteristics of atmospheric laser lines for monitoring systems of natural and anthropogenic objects

¹ Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region, Russian Federation
e-mail: leonid_shastin@mail.ru

Abstract. The problem of monitoring natural and anthropogenic objects is currently of great interest around the world. The use of laser radiation to transmit information can help significantly increase the effectiveness of such monitoring. However, laser radiation receivers and transmitters have a number of features and limitations, especially considering the placement of receiving and transmitting systems on unmanned aviation systems (UAVs). The need for high-quality information transmission also imposes its own requirements. Thus, the question arises, which configurations and methods of building a transmitting laser system should be used to ensure maximum efficiency of information transmission, and, consequently, monitoring of natural and anthropogenic objects. In this article, we have identified two of the most effective methods for constructing a transmitting laser system, and also conducted their experimental evaluation.

Keywords: UV laser transmission system, atmospheric optical laser communication, monitoring systems, UAV control

Введение

На переднем крае науки сейчас находится множество областей, и лазерное излучение и его применения – одна из них. Взять, например, нишу передачи информации. Беспроводная оптическая лазерная наземно-космическая связь позволяет передавать информацию на значительно большее расстояние, чем при использовании оптического волокна. Атмосферная оптическая лазерная связь (АОЛС) позволяет передавать большие объемы информации в условиях интенсивных стационарных и промышленных радиопомех, производится лазерная аппаратура связи с пропускной способностью до десятков гигабит в секунду [1-5].

Атмосферный оптический канал также может позволить передать сигнал частоты от стандарта с достаточно высокой стабильностью, что продемонстрировано в работе [3]. В работах [4,5] рассматривается вопрос передачи сигнала от стандарта частоты на 100 км через оптоволокно и на 113 км через атмосферный канал.

Для увеличения эффективности лазерной связи с подвижными объектами в ИЛФ СО РАН в начале века были инициированы исследования и разработки люминесцентных преобразователей лазерных импульсов для создания люминесцентных планарно-волоконных антенн. С тех пор такие люминесцентные антенны активно исследуются и совершенствуются [1].

С помощью лазерного оптического канала в 2024 году были проведены измерения гравитационного смещения частоты в водородных часах [6].

Лазерные атмосферные линии со стандартом частоты используются для развития новых методов мониторинга акустических полей в атмосфере [7,8].

С помощью лазерной связи можно осуществлять управление беспилотным летательным аппаратом для лазерного мониторинга природных и антропогенных объектов, в связи с чем развиваются методы построения лазерных информационных и сенсорных систем в ультрафиолетовом диапазоне [9-11].

Методы построения излучающих УФ систем

Можно выделить несколько основных методов построения излучающих УФ систем для атмосферных лазерных линий в рамках систем мониторинга природных и антропогенных объектов. Рассмотрим характеристики методов, связанных с суммированием излучения нескольких источников с целью увеличения выходной мощности.

1. Суммирование матрицы УФ лазерных диодов (ЛД). Вполне подходит как для наземного пункта, так и для подвижного объекта, так как позволяет сделать сравнительно небольшую и легкую излучающую систему.

2. Суммирование излучения разнесенных источников. Малоприменимо для подвижных объектов, но, с другой стороны, отсутствуют массогабаритные ограничения. В связи с этим открывается возможность использовать более мощные источники излучения.

3. Суммирование за счет кольцевой линии задержки. Использование такого сумматора при создании излучающей системы позволит значительно увеличить ее выходную мощность. Является значительно более эффективным, по сравнению с использованием простого волоконного сумматора, однако, сильно проигрывает ему в простоте реализации.

4. Дополнительные методы. Эти методы, такие как, например, использование линзы с сумматором, перетяжка оптоволоконна и расширяющиеся световоды или линза на торце волокна предлагают лишь модификации отдельных элементов и являются, скорее, дополнением к рассмотренным ранее методам.

Экспериментальная оценка излучающих систем

Для обеспечения эффективного управления БПЛА излучающая система должна быть многоволновой и имеющей перестраиваемый по расстоянию угол расходимости.

Для оценки такой системы был проведен следующий эксперимент. В цилиндрический защитный корпус размещались на определенном расстоянии друг от друга линза и УФ излучатель. Для имитации передачи сигнала на БПЛА излучатель через балластное сопротивление был подключен к источнику импульсных сигналов Rigol, с которого на излучатель подавались прямоугольные импульсы.

Чтобы измерить диаметр пучка, а также его угол расходимости, на расстоянии 470 см от линзы был установлен экран. Измерения проводились для трех случаев: когда излучатель находился в фокальной плоскости линзы (то есть расстояние от излучателя до линзы $L_{ил} = 5$ см), когда излучатель отстоял от фокальной плоскости линзы на 1 см ($L_{ил} = 6$ см) и, наконец, когда излучатель отстоял от фокальной плоскости линзы на 2 см ($L_{ил} = 7$ см).

В каждом из трех случаев измерялись значения облученности в трех точках: в центре яркого пятна $I_{яр}$, посередине рассеянного пятна $I_{сер}$ и на краю рассеянного пятна $I_{кр}$. Результаты всех этих измерений представлены ниже (Табл. 1).

Проведенный эксперимент показал, что метод построения передающих систем управления БПЛА с перестраиваемым по расстоянию углом расходимости излучения, например, с использованием волоконных световодов разной длины, является перспективным для дальнейших исследований.

Таблица 1

Результаты экспериментальной оценки передающей системы
с перестраиваемым по расстоянию углом расходимости

Расстояние от излучателя до линзы $L_{ил}$, см	5	6	7
Диаметр яркого пятна $d_{яр}$, см	5,5	11	20
Диаметр рассеянного пятна (по краю) $d_{кр}$, см	28	50	70
Облученность (яркое пятно) $I_{яр}$, у. е.	1500	330	90
Облученность (по середине рассеянного пятна) $I_{сер}$, у. е.	500	130	50
Облученность (по краю) $I_{кр}$, у. е.	200	80	10
Угол расходимости яркого пятна $\theta_{яр}$, °	0,33	0,67	1,21
Угол расходимости рассеянного пятна $\theta_{рас}$, °	1,7	3	4,25

Также была проведена экспериментальная оценка дальности передающей системы управления БПЛА без использования сумматора. Излучающая система помещалась на штатив и подключалась к источнику импульсных сигналов Rigol, с которого на излучатель подавались прямоугольные импульсы. На другой стороне оптической трассы размещался широкополосный фотоприемный блок, перед которым поочередно размещались два типа антенн: линзовая и дифракционная. В ходе эксперимента также варьировались: частота от $f = 10$ кГц до $f = 30$ кГц и длина трассы от $L = 17$ м до $L = 75$ м. После каждого изменения измерялась облученность на фотоприемном блоке, а также с помощью цифрового осциллографа АКИП измерялась амплитуда принятого фотоприемником сигнала. При увеличении расстояния в 4,4 раза выходной сигнал на трассе уменьшался примерно в 30-35 раз, в зависимости от юстировки излучателя и фотоприемника на трассе.

При измерениях видно, что даже на сравнительно больших расстояниях сигнал успешно регистрируется и без помощи антенн. С помощью же антенн, ожидаемо, удастся добиться уровня сигнала, достаточного для корректной работы системы управления БПЛА даже на расстоянии 75 м.

Подводя итог проведенному эксперименту, можно сделать вывод, что исследуемая система и без сумматора отлично показала себя в рамках канала передачи информации, а, следовательно, использование в такой системе сумматора может существенно увеличить дистанцию и, само собой, эффективность передачи информации на БПЛА.

Заключение

По итогам проделанной работы была проведена экспериментальная оценка возможности и перспективности реализации систем передачи информации на БПЛА. Для этого осуществлялась серия экспериментов, направленных на измерение определенных параметров излучающей системы. По результатам этих экспериментов удалось подтвердить перспективность использования волоконного сумматора, а также использования перестройки угла расходимости излучающей системы по изменению расстояния связи.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и образования РФ (НИОКТР Рег. № 121033100068-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бритвин А. В., Коняев С. И., Никитенко Н. С., Поважаев А. В., Поллер Б. В., Щетинин Ю. И. Методы построения и экспериментальные характеристики ультрафиолетовых атмосферных линий связи // Успехи современной радиоэлектроники – М. «РАДИОТЕХНИКА». – №1, 2019 г. – С. 25–28.
2. Younus, Othman & Riaz, Amna & Binns, Richard & Scullion, Eamon & Wicks, Robert & Vernon, Jethro & Graham, Christopher & Bramall, David & Schmoll, Jurgen & Bourgenot, Cyril. (2024). Overview of Space-Based Laser Communication Missions and Payloads: Insights from the Autonomous Laser Inter-Satellite Gigabit Network (ALIGN). Aerospace. 11. 907.

3. Кудеяров К.С. Передача ультрастабильных сигналов оптической частоты с активной компенсацией фазовых шумов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2023.
4. Wang, Siwei & Sun, Dongning & Dong, Yi & Xie, Weilin & Shi, Hongxiao & Yi, Lilin & Hu, Weisheng. (2014). Distribution of high-stability 10 GHz local oscillator over 100 km optical fiber with accurate phase-correction system. *Optics Letters*. 39. 888-91.
5. Shen, Qi & Guan, Jian-Yu & Wang, Jianyu & Zeng, Ting & Hou, Lei & Li, Min & Cao, Yuan & Han, Jin-Jian & Lian, Meng-Zhe & Chen, Yan-Wei & Peng, Xin-Xin & Wang, Shao-Mao & Zhu, Dan-Yang & Shi, Xi-Ping & Wang, Zheng-Guo & Li, Ye & Liu, Wei-Yue & Pan, Ge-Sheng & Wang, Yong & Pan, Jian-Wei. (2022). 113 km Free-Space Time-Frequency Dissemination at the 19th Decimal Instability. 10.21203/rs.3.rs-1394733/v1.
6. Измерение гравитационного смещения частоты в водородных часах при передаче сигнала через оптический и радиочастотный каналы связи = Measuring the gravitational frequency shift in a hydrogen clock when transmitting a signal via optical and radio frequency communication channels / А. К. Дмитриев, А. С. Толстиков, Н. Н. Головин, К. Н. Савинов, В. С. Болдырев, С. А. Алексейцев [и др.]. – DOI 10.17212/2782-2001-2024-4-59-77. – Текст : непосредственный // Системы анализа и обработки данных = Analysis and data processing systems. – 2024. – № 4 (96). – С. 59–77.
7. Highly sensitive detection of infrasonic oscillations in the atmosphere using synchronous laser lines with a frequency standard / Britvin A.V., Borisov B.D., Poller B.V., Poller A.B., Khairtdinov M.S., Khohryakov A.S. // Modern problems of laser physics – MPLP-2021: The IX International Symposium, 22-28 August 2021, Novosibirsk: technical digest. – Novosibirsk: ООО Offset-TM, 2021. – С.129-130.
8. Бритвин А.В., Коняев С.И., Поллер Б.В., Поллер А.Б., Хайретдинов М.С. Экспериментальные характеристики лазерной атмосферно-волоконной системы обнаружения акустических инфразвуковых колебаний в задачах геоэкологического мониторинга = Experimental characteristics of an atmospheric-fiber laser system for detecting acoustic infrasound vibrations in geoeological monitoring tasks. // *Автометрия*, 2023. – Т. 59, № 6. – С. 74–79.
9. Бритвин А. В., Никитенко Н. С., Плюснин В. Ф., Поважаев А. В., Поллер Б. В. Исследования по полимерной нанофотонике для синтеза сенсорных и телекоммуникационных устройств // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – С. 88–94.
10. Бритвин А. В., Поважаев А. В., Никитенко Н. С., Поллер Б. В. Характеристики оптико-электронной системы для контроля подвижных объектов и сред в приземной зоне лазерного мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – С. 151–157.
11. Шастин Л. В., Бритвин А. В., Поллер Б. В. О характеристиках источников оптических излучений для атмосферной связи с БПЛА с использованием волоконного и кольцевого сумматоров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Междунар. науч. конгр., 23–27 мая 2024 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2024»: сб. материалов в 8 т. Т. 8, №1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. – С. 13–17.

© Л. В. Шастин, А. В. Бритвин, Б. В. Поллер, 2025