УДК 621.391.64:004.7 EDN TUMTFF
https://www.doi.org/10.47813/mip.7.2026.20.3001

К вопросу оптического взаимодействия БПЛА с пассивными сенсорными узлами типа Smart-Dust для обработки данных мониторинга

П.К. Зайцев[1*], Е.В. Туева[2], Д.В. Грузенкин[1]

[1]Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия
[2]Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, 660049, Россия

[*]E-mail: pkz97@mail.ru

Аннотация. Рассматривается архитектура оптического взаимодействия беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с распределенными пассивными и полупассивными сенсорными узлами типа Smart-Dust. БПЛА выполняет функции мобильной оптической базовой станции, обеспечивая локализацию сенсорного узла, передачу ему оптической энергии и прием результатов измерений по модулированному ретроотраженному каналу. Для оценки работоспособности системы использована упрощенная модель энергетического и обратного оптического каналов. Расчетные результаты показывают возможность обеспечения короткого измерительного цикла на расстояниях порядка нескольких десятков метров при низковысотной работе БПЛА; при увеличении дальности основным ограничением становится ослабление ретроотраженного сигнала. Для практической реализации предложен двухэтапный режим, предусматривающий предварительное обнаружение сенсорных узлов широкоугольной камерой и последующее точное наведение узкого лазерного пучка на выбранный узел. Предлагаемая архитектура ориентирована на создание распределенных маломощных систем мониторинга без активного радиопередатчика в каждом сенсорном узле и может применяться в точном земледелии, производственно-экологическом мониторинге, а также при мониторинге открытых горных работ и других территориально распределенных объектов.

Ключевые слова: БПЛА, Smart-Dust, пассивный сенсорный узел, оптическое энергообеспечение, модулирующий ретроотражатель, оптический мониторинг, производственно-экологический мониторинг.

Для цитирования: Зайцев, П. К. К вопросу оптического взаимодействия БПЛА с пассивными сенсорными узлами типа Smart-Dust для обработки данных мониторинга / П. К. Зайцев, Е. В. Туева, Д. В. Грузенкин // Модернизация, Инновации, Прогресс (MIP ENGINEERING-VII-2026): материалы VII Всероссийской (национальной) научной конференции (Красноярск, 11–12 сентября 2026 г.). – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений, 2026. – Т. 20. – С. 6-16. – https://doi.org/10.47813/mip.7.2026.20.3001. – EDN: TUMTFF.

Optical interaction between a UAV and Smart-Dust passive sensor nodes for monitoring data processing

P.K. Zaitsev[1*], E.V. Tueva[2], D.V. Grusenkin[1]

[1]Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia
[2]Krasnoyarsk State Agrarian University, 90 Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049, Russia

[*]E-mail: pkz97@mail.ru

Abstract. This paper considers an architecture for optical interaction between an unmanned aerial vehicle (UAV) and distributed passive and semi-passive Smart-Dust sensor nodes. The UAV functions as a mobile optical base station, providing sensor-node localization, optical energy transfer, and reception of measurement results via a modulated retroreflective channel. A simplified model of the forward optical power-transfer channel and the return optical channel was used to assess system feasibility. The calculation results demonstrate the possibility of achieving a short measurement cycle at ranges of several tens of meters during low-altitude UAV operation; as the range increases, attenuation of the retroreflected signal becomes the primary limiting factor. For practical implementation, a two-stage operating mode is proposed, involving preliminary detection of sensor nodes using a wide-angle camera, followed by precise pointing of a narrow laser beam at the selected node. The proposed architecture is intended for the development of distributed low-power monitoring systems without an active radio transmitter in each sensor node. It can be applied in precision agriculture, industrial and environmental monitoring, as well as in open-pit mining monitoring and other spatially distributed facilities.

Keywords: UAV, Smart-Dust, passive sensor node, optical power transfer, modulating retroreflector, optical monitoring, industrial and environmental monitoring.

For citation: Zaitsev, P. K. Optical interaction between a UAV and Smart-Dust passive sensor nodes for monitoring data processing / P. K. Zaitsev, E. V. Tueva, D. V. Grusenkin // Modernization, Innovations, Progress (MIP ENGINEERING-VII-2026): Proceedings of the VII All-Russian (National) Scientific Conference (Krasnoyarsk, September 11–12, 2026). – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Regional Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations, 2026. – Vol. 20. – P. 6-16. – https://doi.org/10.47813/mip.7.2026.20.3001. – EDN: TUMTFF.

1. Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются в системах производственно-экологического мониторинга [1-3], мониторинга горных территорий и горного производства [4, 5], а также в точном земледелии для быстрого картирования состояния посевов и изменчивости поля [6-9]. RGB, мультиспектральная, гиперспектральная и тепловая съемка предоставляют важную пространственную информацию, но ряд переменных, представляющих практический интерес, включая влажность почвы, температуру почвы и микроклимат вблизи поверхности земли, по-прежнему измеряются непосредственно локальными датчиками [10]. Таким образом, наземное зондирование может эффективно дополняться дистанционным зондированием с помощью БПЛА.

Традиционные беспроводные сенсорные узлы требуют наличия батарей, радиоприемопередатчиков и технического обслуживания в каждой точке измерения. Эти требования становятся все более затратными, когда большое количество узлов распределено по сельскохозяйственным территориям. Концепция Smart Dust позволяет реализовать другой подход, в рамках которого миниатюрный узел выполняет зондирование и обработку с низким энергопотреблением, в то время как внешний оптический источник на базе БПЛА обеспечивает носитель для связи [11]. Ранние прототипы Smart Dust продемонстрировали оптическую передачу, фотоэлектрическую работу и микромеханические угловые кубические ретроотражатели [12]. Впоследствии были продемонстрированы субмиллиметровые угловые кубические структуры для пассивной оптической связи в свободном пространстве [13].

В последнее время для оптических каналов связи БПЛА в свободном пространстве были исследованы модулирующие ретроотражатели (MRR). В работе [14] проанализированы каналы MRR между БПЛА и наземным комплексом, включая ошибки слежения, флуктуации ориентации, расходимость луча, атмосферную турбулентность и потери при двойном прохождении. В статье [15] представлена экспериментальная оценка системы оптической передачи MRR/БПЛА в свободном пространстве. В ряде приложений в области точного земледелия исследовались возможности опроса беспилотных сенсорных меток с помощью БПЛА с использованием сбора радиочастотной энергии [16].

В данной работе рассматривается оптический аналог предложенных ранее концепций для обеспечения сельскохозяйственного зондирования. При этом БПЛА выступает в качестве мобильной оптической базовой станции, которая подает оптическую энергию, опрашивает наземный сенсорный узел и принимает его данные посредством модулированного ретроотражения [17]. Цель исследования ограничена вопросом осуществимости взаимодействия низковысотного БПЛА с пассивными сенсорными узлами типа Smart-Dust с возможностью обеспечить достаточное количество оптической энергии для короткого цикла зондирования и восстановить измерение по пассивному ретроотражательному каналу связи.

2. Материалы и методы

Оптическое взаимодействие БПЛА с пассивными сенсорными узлами типа Smart-Dust реализуется в рамках предлагаемой архитектуры, показанной на рисунке 1, БПЛА несет полупроводниковый лазер, оптику управления лучом, узкополосный оптический приемник и навигационные датчики. Каждый наземный узел содержит фотоэлектрический (ФЭ) приемник, элемент хранения энергии, маломощный датчик окружающей среды, минимальную управляющую электронику и ретроотражатель MRR или угловой кубический ретроотражатель (CCR). В качестве типичного примера используется датчик влажности почвы. Отметим, что для производственно-экологического мониторинга оптическая архитектура остается неизменной в случае применения других датчиков с низким коэффициентом энергопотребления.

Последовательность действий БПЛА состоит из четырех этапов: сбор данных, освещение, измерение и считывание. Сначала узел локализуется по сохраненным координатам или оптическому маркеру. Затем лазер освещает фотоэлектрический приемник и заряжает локальный накопитель. После того, как доступная энергия превысит порог срабатывания датчика, узел получает измерение и модулирует отраженный сигнал. Приемник БПЛА обнаруживает возвращенный сигнал и связывает измерение с положением БПЛА и идентификатором узла.

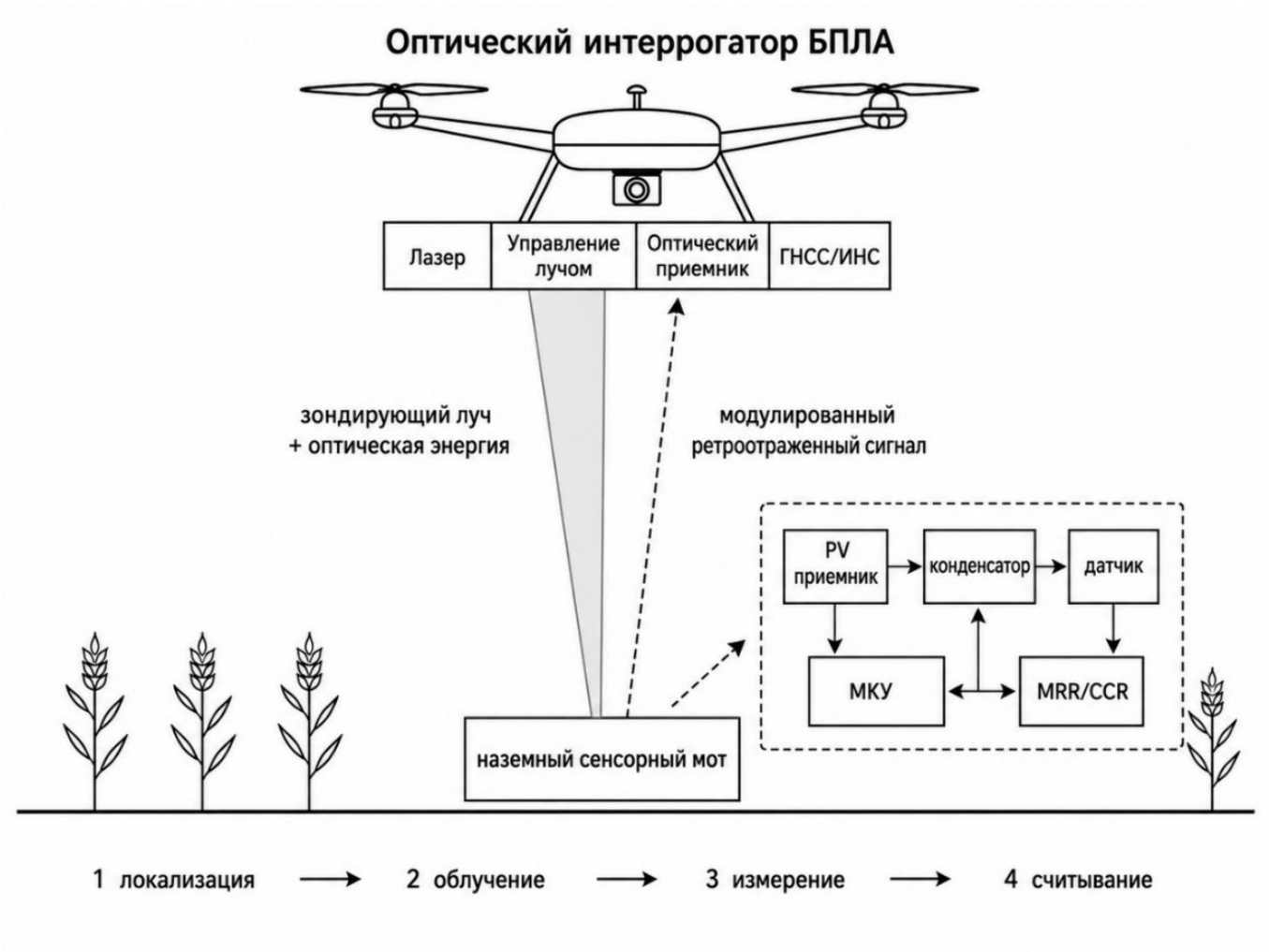

Рисунок 1. Архитектура оптического зондирования и энергообеспечения наземного сенсорного мота с использованием БПЛА.

Для оценки энергетических характеристик системы использована упрощенная модель распространения оптического излучения. При увеличении расстояния между БПЛА и сенсорным узлом диаметр светового пятна возрастает вследствие расходимости лазерного пучка, что приводит к уменьшению плотности мощности на поверхности фотоэлектрического приемника. Количество энергии, накопленной сенсорным узлом за время облучения, определяется мощностью лазера, площадью и эффективностью фотоэлектрического преобразователя, атмосферными потерями, углом падения излучения и продолжительностью облучения. Для выполнения одного цикла измерения накопленная энергия должна быть достаточной для питания датчика, обработки данных и управления ретроотражателем. В рамках принятой модели доступная энергия уменьшается приблизительно обратно пропорционально квадрату расстояния до БПЛА.

Для численной оценки использовались параметры, соответствующие низковысотному режиму работы БПЛА: длина волны лазера 850 нм, мощность излучения 2 Вт, расходимость

пучка 5 мрад, площадь фотоэлектрического приемника 1 см², эффективность преобразования 25 % и время облучения 100 мс. Энергия, необходимая для одного цикла измерения и передачи данных, принималась равной 50 мкДж. Эффективный диаметр модулирующего ретроотражателя составлял 10 мм, диаметр приемной апертуры БПЛА – 50 мм, а однопроходный коэффициент атмосферного пропускания – 0,98. Эти значения использовались как базовые при оценке энергетического и обратного оптического каналов.

Передача данных от сенсорного узла осуществляется путем изменения эффективной отражательной способности модулирующего ретроотражателя. В отличие от канала передачи энергии, обратный сигнал проходит свободное пространство дважды: от БПЛА к сенсорному узлу и затем обратно к приемнику БПЛА. Поэтому мощность принимаемого ретроотраженного сигнала уменьшается значительно быстрее и в первом приближении имеет зависимость, близкую к обратной четвертой степени расстояния. Это делает обратный оптический канал более чувствительным к дальности, размерам ретроотражателя и приемной апертуры, а также к точности наведения. Такой характер зависимости согласуется с результатами анализа оптических сенсорных сетей, использующих угловые ретроотражатели [18].

Следует учитывать, что данная модель является оценочной. В ней не учитываются в полном объеме ошибки наведения, неравномерность профиля лазерного пучка, фоновое солнечное излучение, атмосферная турбулентность, загрязнение оптических поверхностей и другие ограничения. Поэтому получаемые значения следует рассматривать как ориентировочные оценки потенциальной дальности работы системы.

3. Результаты и обсуждение

Проведенные оценки показали, что энергетическая обеспеченность наземного сенсорного узла существенно зависит от расстояния до БПЛА и расходимости лазерного пучка. На рисунке 2 представлена расчетная зависимость накопленной электрической энергии от расстояния для нескольких значений расходимости.

При уменьшении расходимости плотность оптической мощности на фотоэлектрическом приемнике возрастает, что увеличивает допустимую дальность опроса. Для базового значения расходимости 5 мрад расчетная энергия составляет около 69 мкДж на расстоянии 30 м и снижается до 39 мкДж на расстоянии 40 м. Таким образом, при принятом пороге 50 мкДж устойчивое выполнение короткого измерительного цикла обеспечивается на расстояниях порядка нескольких десятков метров.

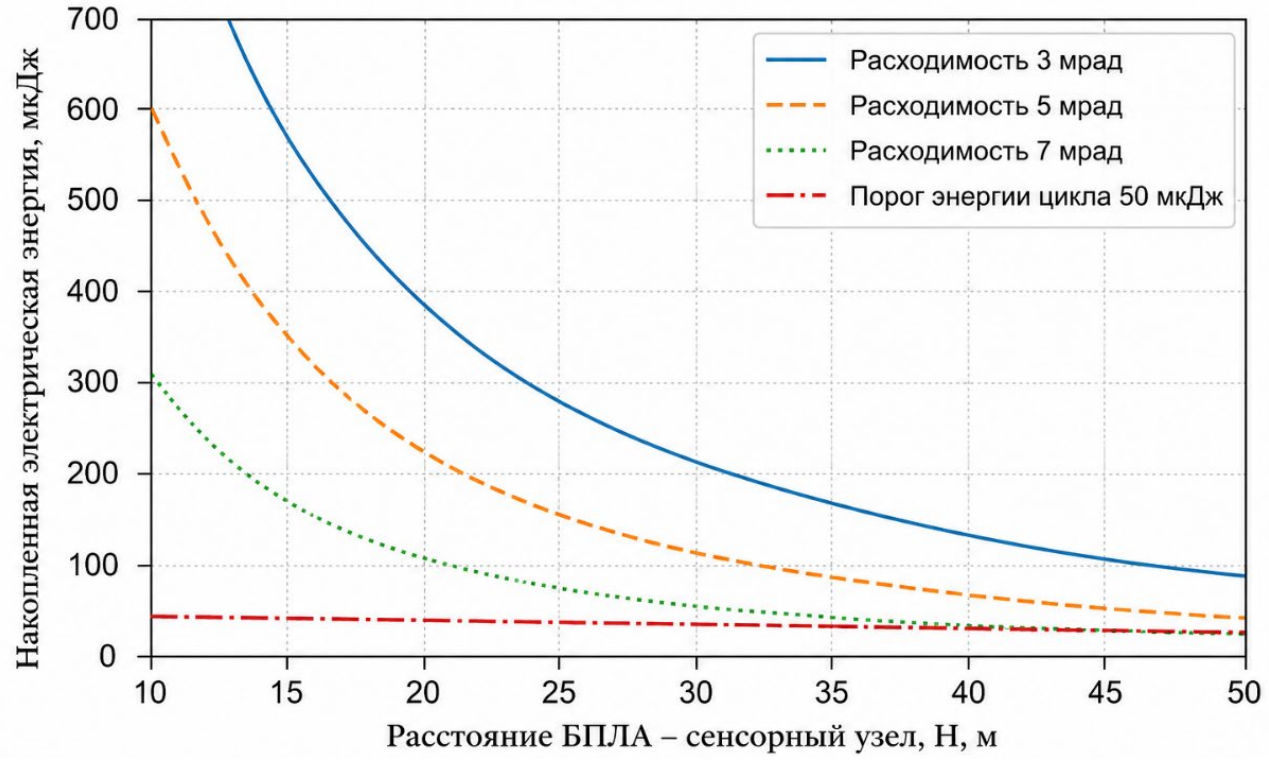

Рисунок 2. Зависимость накопленной энергии сенсорного узла от расстояния до БПЛА при различных значениях расходимости лазерного пучка.

При этом ретроотраженный оптический сигнал уменьшается с расстоянием быстрее, чем энергия, поступающая к сенсорному узлу. Это связано с двухпроходным характером канала: излучение сначала распространяется от БПЛА к узлу, а затем возвращается к приемнику. Поэтому практическая дальность системы определяется не только энергетическим балансом, но и размерами ретроотражателя, приемной апертурой БПЛА и точностью наведения. В реальных условиях дополнительное влияние оказывают фоновое солнечное излучение, атмосферные и оптические потери, загрязнение поверхности и возможное перекрытие сенсорных узлов растительностью.

С практической точки зрения целесообразно использовать двухэтапный режим работы, представленный на рисунке 3. На первом этапе широкоугольная камера видимого или ближнего инфракрасного диапазона выполняет поиск сенсорных узлов или пассивных оптических маркеров. После определения положения требуемого узла система переходит ко второму этапу, в котором узкий лазерный пучок точно наводится на выбранный сенсорный модуль. Одновременно осуществляется его оптическое энергообеспечение, выполнение измерения и прием модулированного ретроотраженного сигнала. Такой подход снижает требования к непрерывному высокоточному наведению и позволяет использовать узкий пучок только непосредственно в процессе опроса выбранного узла.

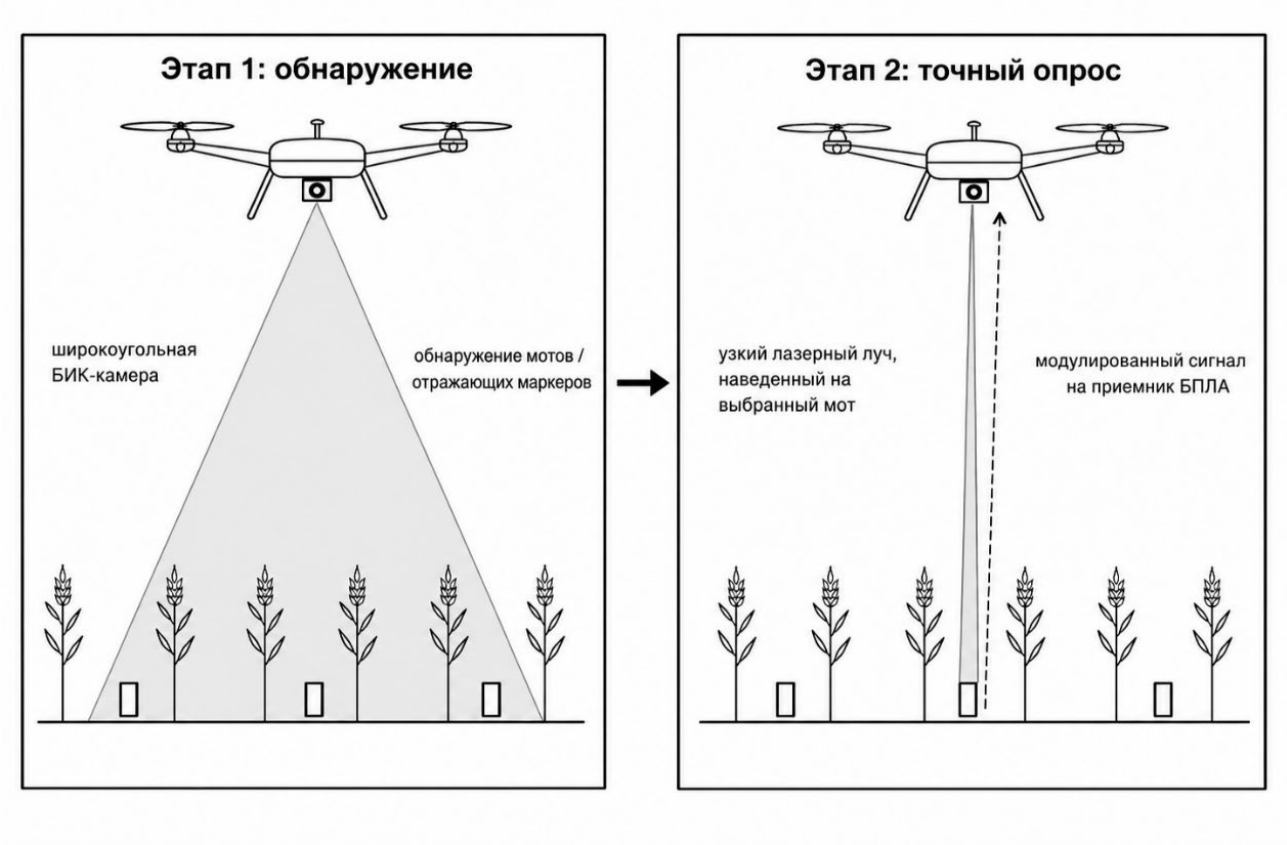

Рисунок 3. Двухэтапная стратегия обнаружения и оптического опроса наземных сенсорных узлов.

Объем передаваемых данных при мониторинге параметров почвы и окружающей среды сравнительно невелик, поэтому высокая пропускная способность оптического канала не является определяющим требованием. Более существенное значение имеют энергетическая автономность сенсорных узлов, устойчивость обнаружения, точность наведения и безопасность лазерного излучения. Допустимая мощность оптического источника должна определяться с учетом длины волны, расходимости пучка и продолжительности воздействия [19].

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность низковысотного оптического взаимодействия БПЛА с пассивными или полупассивными сенсорными узлами типа Smart-Dust. При этом наиболее рациональной представляется поэтапная реализация системы: первоначально – с фотоэлектрическими приемниками и ретроотражателями сантиметрового масштаба, а последующая миниатюризация должна выполняться после экспериментальной проверки энергетического и обратного оптического каналов.

4. Заключение

В работе предложена архитектура оптического взаимодействия БПЛА с пассивными и полупассивными сенсорными узлами типа Smart-Dust, предусматривающая одновременную передачу оптической энергии и считывание результатов измерений по ретроотраженному каналу. Проведенные оценки показывают принципиальную возможность обеспечения короткого измерительного цикла на расстояниях порядка нескольких десятков метров при низковысотной работе БПЛА. При этом с увеличением расстояния основным ограничивающим фактором становится обратный ретроотраженный канал, что определяет требования к размерам ретроотражателя, приемной апертуре и точности наведения.

Для практической реализации предложен двухэтапный режим работы, включающий предварительное обнаружение сенсорных узлов широкоугольной камерой и последующее точное наведение лазерного луча на выбранный узел. Такой подход позволяет совместить сравнительно простую локализацию распределенных датчиков с энергетически эффективным оптическим опросом.

Предлагаемая архитектура может быть использована не только в задачах точного земледелия, но и в системах производственно-экологического мониторинга, включая контроль параметров окружающей среды и технологических объектов на промышленных территориях, а также при мониторинге открытых горных работ [20]. В последнем случае распределенные автономные сенсорные узлы могут применяться для контроля параметров атмосферы, состояния отдельных участков горных выработок и других локальных показателей в труднодоступных или потенциально опасных зонах. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную проверку энергетического баланса и устойчивости обратного оптического канала, оценку влияния фонового излучения и ошибок наведения, а также испытание нескольких сенсорных узлов в реальных условиях мониторинга.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-11-20040, https://rscf.ru/project/25-11-20040/», гранта Красноярского краевого фонда науки.

Список литературы

1. Евсеева, О. Е. Системы мониторинга с применением БПЛА / О. Е. Евсеева, В. М. Дорошенко // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в

естественных науках. – 2025. – № 3. – С. 18–26. – https://doi.org/10.24412/2541-9269-2025-3-18-26.

2. Yuronen, Yu. P. The concept of creation of information system for environmental monitoring based on modern GIS-technologies and earth remote sensing data / Yu. P. Yuronen, E. A. Yuronen, V. V. Ivanov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 94. – Art. 012023. – https://doi.org/10.1088/1757-899X/94/1/012023. – EDN: VALBXD.
3. Росляков, П. В. Система непрерывного контроля (мониторинга) и регулирования вредных газообразных выбросов ТЭС в атмосферу / П. В. Росляков, И. А. Закиров, И. Л. Ионкин, Л. Е. Егорова, Е. Н. Каранкевич // Записки Горного института. – 2003. – Т. 154. – С. 94–96.
4. Кулешов, А. М. Применение беспилотных летательных аппаратов в горнодобывающей промышленности / А. М. Кулешов, А. Г. Богачук, К. А. Колесников, И. О. Паничкин, М. А. Марковский // Горная промышленность. – 2024. – № 5S. – С. 33–37. – https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-33-37.
5. Ковалев, И. В. Маршрутизация с учетом ветровых условий горных территорий при выполнении транспортно-технологических циклов БПЛА в точном земледелии / И. В. Ковалев, К. Д. Астанакулов, Д. И. Ковалев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, № 2 (64). – С. 940–951. – https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-940-951. – EDN: HMZSIA.
6. Вторый, В. Ф. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов / В. Ф. Вторый, С. В. Вторый // АгроЭкоИнженерия. – 2017. – № 92. – С. 158–166. – https://doi.org/10.24411/0131-5226-2017-00028.
7. Kovalev, I. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 471. – Art. 04017. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104017. – EDN: LGAJJO.
8. Kovalev, I. Conceptual basis for digitalization of specifications of transport and technological cycles of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 443. – Art. 06014. – https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344306014.
9. Ковалев, И. В. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / И. В. Ковалев, Д. И. Ковалев, В. А. Подоплелова, М. Ф. Иконникова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 2 (92). – С. 80–85. – EDN: JBEVZX.

10. Савин, И. Ю. Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей на пахотных угодьях / И. Ю. Савин, Ю. И. Блохин // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2022. – № 110. – С. 22-50. – https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-22-50. – EDN: DWUVDA.
11. Туева, Е. В. Интеграция оптических систем в БПЛА для устойчивого развития цифрового сельского хозяйства / Е. В. Туева, И. В. Ковалев, Д. И. Ковалев [и др.] // Российская наука, инновации, образование (РОСНИО-IV-2025) : материалы IV Всероссийской (национальной) научной конференции (Красноярск, 29–30 мая 2025 г.). – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений, 2025. – С. 257–265. – https://doi.org/10.47813/rosnio.4.2025.4013. – EDN: RZVCHP.
12. Warneke, B. Smart dust mote forerunners / B. Warneke, B. Atwood, K. S. J. Pister // Technical Digest. MEMS 2001 : Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Interlaken, Switzerland, 2001). – 2001. – P. 357–360. – https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2001.906552.
13. Zhou, L. Corner-cube retroreflectors based on structure-assisted assembly for free-space optical communication / L. Zhou, J. M. Kahn, K. S. J. Pister // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2003. – Vol. 12, No. 3. – P. 233–242. – https://doi.org/10.1109/JMEMS.2003.809956.
14. Dabiri, M. T. Modulating retroreflector based free space optical link for UAV-to-ground communications / M. T. Dabiri, M. Rezaee, L. Mohammadi, F. Javaherian, V. Yazdanian, M. O. Hasna, M. Uysal // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2022. – Vol. 21, No. 10. – P. 8631–8645. – https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3167945.
15. Chen, C. Performance analysis and experimental evaluation of modulating retroreflector and UAV based free space optical transmission systems / C. Chen, J. Ji, H. Zhao, Y. Song // Optics Express. – 2024. – Vol. 32, No. 19. – P. 33830–33851. – https://doi.org/10.1364/OE.532178.
16. Kudyba, P. S. Autonomous Agricultural Monitoring with Aerial Drones and RF Energy-Harvesting Sensor Tags / P. S. Kudyba, H. Sun // Proceedings of the International Symposium on Intelligent Computing and Networking 2025 (ISICN 2025) / ed. by M. Rodriguez Martinez, K. Lu, F. Ye, Y. Qian. – Cham: Springer, 2026. – Vol. 1698. – P. 106–116. – (Lecture Notes in Networks and Systems). – https://doi.org/10.1007/978-3-032-09694-4_9.
17. Ковалев, И. В. К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов / И. В. Ковалев, В. В. Лосев, М. В. Сарамуд [и др.] // Современные инновации, системы и технологии. – 2021. – Т. 1, № 3. – С. 48–64. – https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64. – EDN: ECMMWF.

18. Althunibat, S. Performance analysis of free space optical-based wireless sensor networks using corner cube retroreflectors / S. Althunibat, Z. Altarawneh, R. Mesleh // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2019. – Vol. 30, No. 12. – Art. e3707. – https://doi.org/10.1002/ett.3707.
19. Dehghani Soltani, M. Safety Analysis for Laser-Based Optical Wireless Communications: A Tutorial / M. Dehghani Soltani [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2022. – Vol. 110, No. 8. – P. 1045–1072. – https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3181968.
20. Ковалев, И. В. Анализ информационной надежности технологии умной пыли при мониторинге предприятий добывающей промышленности в горных территориях / И. В. Ковалев, В. В. Лосев, М. В. Сарамуд, П. К. Зайцев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18, № 2. – С. 1165–1183. – https://doi.org/10.21177/1998-4502-2026-18-2-1165-1183. – EDN: RKVQUA.