

УДК 623.4

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ И МЕХАНИЗМОВ СИСТЕМЫ ЛИДАР
В ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ**

Статья поступила в редакцию 19.07.2021, в окончательном варианте – 09.10.2021.

Тихомиров Никита Владимирович¹, Московский авиационный институт, 416500, Российская Федерация, г. Ахтубинск, ул. Добролюбова, 5, студент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0158-7873>, e-mail: nikita.tihomirov1999@icloud.com

Маслиев Алексей Анатольевич, ИМК ФГУП «ГосНИИАС», 416500, Российская Федерация, г. Ахтубинск-7, Московский авиационный институт, 125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, аспирант, старший преподаватель, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7231-2263>, e-mail: panoramasix@gmail.com

В статье проводится исследование, основанное на изучении и анализе возможностей улучшения работы прицельно-навигационных комплексов с помощью системы лидар. Этот вопрос ещё мало изучен, поэтому и представляет большой интерес. В основе работы некоторых прицельно-навигационных комплексов лежит расчёт траектории полёта неуправляемого снаряда путём корреляции множества влияющих на него факторов (аэродинамические свойства боеприпаса, множество параметров полёта летательного аппарата, внешние факторы и др.). Для увеличения точности бомбометания, объекту необходимо собрать информацию из внешней среды путём совершения множества манёвров, на которые требуется большое количество времени. Время сбора информации – очень важный фактор, определяющий успешность операции в боевых условиях, поэтому его всегда необходимо минимизировать. Для сокращения времени сбора информации предлагается ввести принципы и механизмы системы лидар. Это позволит расширить спектр доступных тактических приемов объекта при поиске цели, выходе на цель, прицеливании и применении оружия по наземным целям. Описанное в статье предложение по модернизации прицельно-навигационных комплексов расширит возможности данной системы, что в условиях боя даст дополнительное преимущество над противником.

Ключевые слова: лидар, сканирование, прицельно-навигационный комплекс, лазер, оптическая система

**APPLICATION OF THE PRINCIPLES AND MECHANISMS OF THE LIDAR SYSTEM
IN SIGHTING AND NAVIGATION SYSTEM**

The article was received by the editorial board on 19.07.2021, in the final version – 09.10.2021.

Tikhomirov Nikita V., Moscow Aviation Institute, 5 Dobrolyubov St., Akhtubinsk, 416500, Russian Federation,

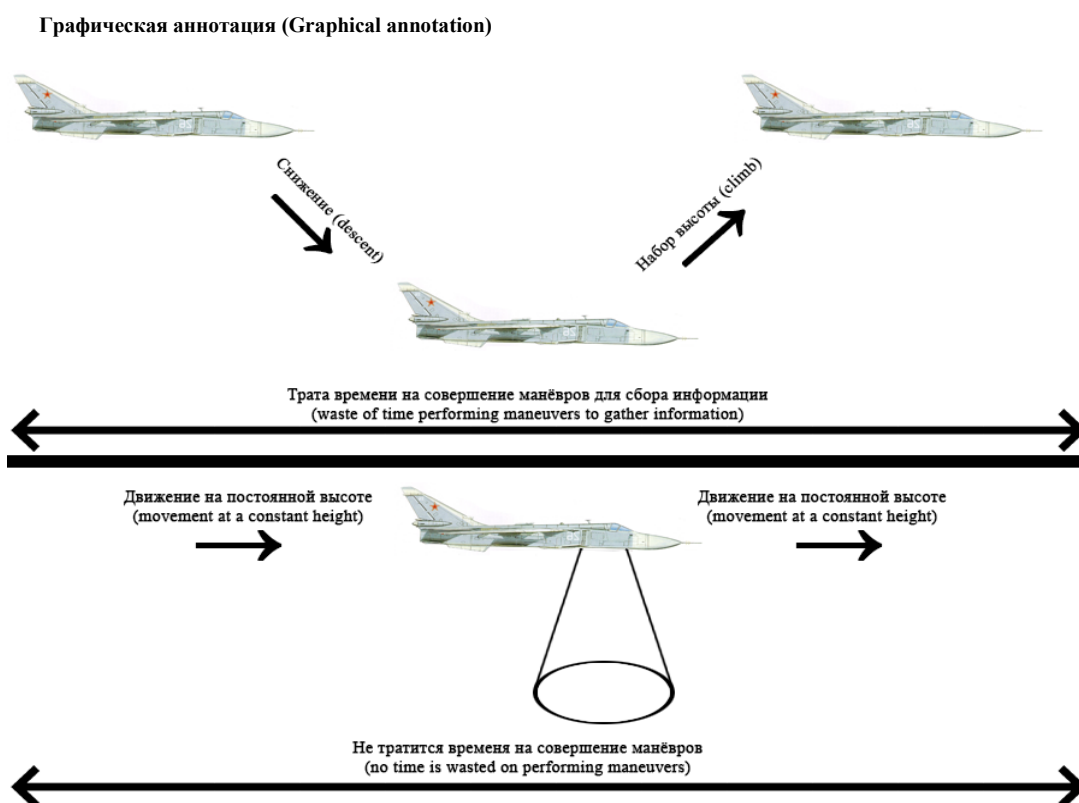
student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0158-7873>, e-mail: nikita.tihomirov1999@icloud.com

Masliev Aleksej A., ИМК ФГУП «ГосНИИАС», Ахтубинск-7, 416500, Russian Federation, Moscow Aviation Institute, 4 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation, postgraduate student, Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7231-2263>, e-mail: panoramasix@gmail.com

In the article “Application of the principles and mechanisms of the lidar system in sighting and navigation system”, is conducted a research based on the study and analysis of the possibilities for improving the work of sighting and navigation systems using the lidar system. This question is still little studied, so it is of great interest. There is the trajectory of unguided missile by the correlation of multiple factors affecting it (the aerodynamic properties of ammunition, a set of flight parameters of the aircraft, external factors, etc.) at the core of the several sighting and navigation systems. To increase the precision of the bombing, the aircraft must gather information from the external environment through a variety of maneuvers that require a large amount of time. The time of information collection is a very important factor determining the success of an operation in combat conditions, so it is always necessary to minimize it. To reduce the time of information collection, it is proposed to introduce the principles and mechanisms of the lidar system. It will allow you to expand the range of available tactical techniques of the object when searching for a target, entering the target, aiming and using missiles on the ground targets. The proposal described in the article for the modernization of the in sighting and navigation system will expand the capabilities of this system, which will give an additional advantage over the enemy in combat conditions.

Keywords: lidar, scanning, sighting and navigation system, laser, optical system

¹ Научный руководитель – Хисматов Игорь Федорович, АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», 121471, Российская Федерация, г. Москва, ул. Верейская, 41. Доктор технических наук, e-mail: abu-sergey@yandex.ru



Введение. Время сбора информации – очень важный фактор, определяющий успешность операции в боевых условиях, поэтому его всегда необходимо минимизировать [1]. Также решающим фактором боевой операции является точность бомбардировки, зависящая от технического совершенства используемого оборудования. Мгновенные изменения боевой ситуации и молниеносные действия противников повышают требования к точности оборудования и времени сбора информации, необходимого для формирования решения на совершение конкретных действий. Промедление на поле боя может повлечь за собой огромные последствия.

Начнём с того, что же все-таки из себя представляет лидар? Это технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах. Применение лидаров началось ещё в 1963 году. Тогда это был наземный лазерный дальномер, использующийся в военных целях. Широко известна система лидар стала после её использования в 1971 год в качестве лазерного дальномера на космическом аппарате «Аполлон-15». Система применялась для картирования поверхности Луны [3]. В настоящее время лидар используется на самолётах гражданской авиации (в частности, на Boeing 777F) различных стран для отслеживания неоднородностей воздушных масс [3].

В настоящее время самолеты очень часто оснащаются прицельно-навигационными комплексами (ПНК) [4]. Такое оборудование позволяет с помощью датчиков, установленных на борту летательного аппарата, получать различную информацию из внешней среды, коррелировать данные и выдавать решение на применение боеприпаса в определённый момент времени. Данная система активно используется в боевых действиях и позволяет повысить результативность применения оружия.

В статье рассматривается возможность применения принципов и механизмов системы лидар в прицельно-навигационном комплексе. Данная модификация прицельной системы позволит повысить точность авиационных средств поражения и расширить спектр тактических приёмов, которые может произвести летательный аппарат, оснащённый этой системой.

Тема использования доплеровских лидаров для сканирования пространства уже раскрыта во многих российских и зарубежных статьях [4]. Однако тема объединения лидара и ПНК для их совместного применения актуальна и требует дальнейшего развития.

Описание прицельно-навигационного комплекса. В основе работы прицельно-навигационного комплекса лежит расчёт траектории полёта неуправляемого снаряда путём корреляции множества влияющих на него факторов (аэродинамических свойств боеприпаса, множества параметров полёта летательного аппарата, внешних факторов и др.) [5, 6].

Система постоянно отслеживает позиции самолета и цели (используя ГЛОНАСС), измеряет давление, влажность, скорость ветра и самолета, направление полета. Она может получать дополнительную информацию от наземных станций и других самолетов. Прицельно-навигационный комплекс вычисляет момент отцепки снаряда для его максимально точного попадания в цель (в пределах погрешности) [6].

Необходимым условием получения информации из внешней среды для ПНК является совершение летательным аппаратом некоторого количества манёвров, на которые требуется определенное количество времени. Чем больше актуальной информации из внешней среды будет собрано, тем точнее система позволит рассчитать момент отцепки боеприпаса [7].

Описание лидара. В основе системы лидар (транслитерация слова LIDAR, от англ. Light Detection and Ranging «обнаружение и определение дальности с помощью света») лежит технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах [8].

Система рассчитывает, сколько времени требуется свету для попадания в объект и отражения обратно в сканер. Лидар может генерировать более 1 000 000 импульсов в секунду. Каждое из этих измерений или результатов может быть преобразовано в трёхмерную визуализацию, которая представляет собой облако точек.

Основные виды систем лидар:

1. Сканирующие лидары в системах машинного зрения, которые формируют двумерную или трёхмерную картину окружающего пространства.

2. «Атмосферные» лидары, которые способны не только определять расстояния до непрозрачных отражающих целей, но и анализировать свойства прозрачной среды, рассеивающей и поглощающей свет. Разновидностью атмосферных лидаров являются доплеровские лидары, определяющие направление и скорость перемещения воздушных потоков в различных слоях атмосферы [9].

Для решения каждой задачи используется конкретная схема лидара. Однако во всех случаях в лидаре непременно присутствуют три основных блока [10]:

- 1) лазерный источник излучения с отражающей системой;
- 2) принимающая система с фотодетектором;
- 3) регистратор лидарных сигналов (светофильтр, позволяющий выделить из принятого излучения, излучение на необходимой длине волны).

Представлена структурная схема аэрозольного лидара (рис. 1).

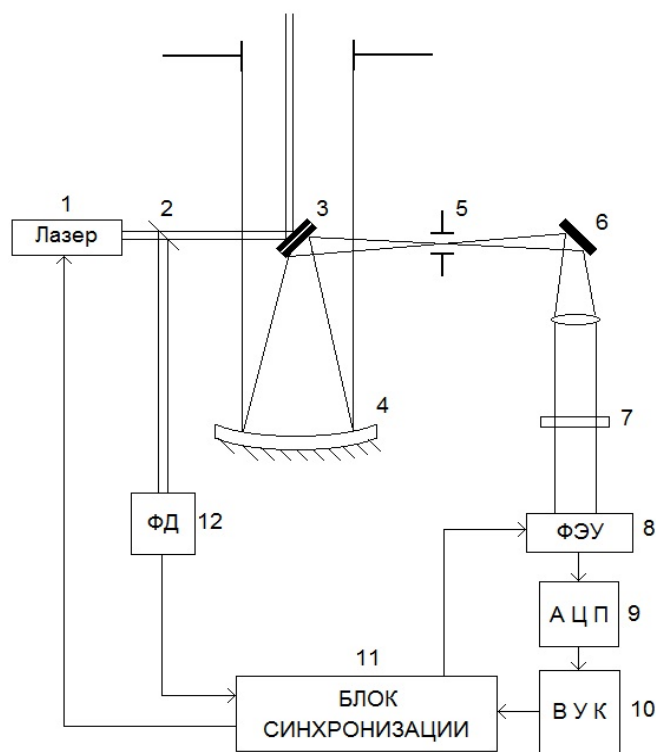


Рисунок 1 – Структурная схема аэрозольного лидара

На структурной схеме показаны [11]:

1. Лазер на иттрий-алюминиевом гранате генерирует импульсы на длине волны 532 нм.
2. Прозрачный отражатель – посылает часть энергии на фотодиод 12.
3. Отражающая система – посылает сигнал на рассматриваемый объект, а также направляет принятый сигнал на фотоприёмное устройство.
4. Зеркало принимающего телескопа.
5. Полевая диафрагма – влияет на угловое поле зрения телескопа.
6. Отражающая система – посылает сигнал на приемник.
7. Светофильтр – позволяет выделить из принятого потока излучение на необходимой длине волны.
8. ФЭУ, фотоэлектронный умножитель – преобразует оптическое излучение в электрический сигнал.
9. АЦП, аналого-цифровой преобразователь – преобразует аналоговый сигнал ФЭУ в цифровой вид.
10. ВУК, вычислительно-управляющий комплекс – проводит оценку и измерение принятого сигнала, а также задает режим работы блока синхронизации.
11. Блок синхронизации – синхронизирует работу лазера и ФЭУ, создает задержку начала работы ФЭУ, связанную со временем движения пучка до рассеивающего объекта, а также времени движения рассеянного пучка обратно до лидара.
12. ФД, фотодиод – регистрирует время излучения сигнала в атмосферу.

Таким образом, система лидар позволяет мгновенно собрать некоторые виды информации (температуру, скорость ветра на определённой высоте, влажность воздуха) удаленно, без траты огромного количества времени на маневрирование.

Лидарные расчёты. В отличие от радиоволн, эффективно отражающихся только от достаточно крупных металлических целей, световые волны подвержены рассеянию в любых средах, в том числе в воздухе. Поэтому возможно не только определять расстояние до непрозрачных (отражающих свет) дискретных целей, но и фиксировать интенсивность рассеивания света в прозрачных средах. Возвращающийся отражённый сигнал проходит через ту же рассеивающую среду, что и луч от источника, подвергается вторичному рассеиванию, поэтому восстановление действительных параметров распределённой оптической среды – достаточно сложная задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами [12].

Распространяясь по атмосферной трассе зондирования, лазерный импульс лидара испытывает поглощение и рассеяние на молекулах аэрозоля атмосферы. Так как расстояние до любого рассеивающего объёма на трассе зондирования однозначно определяется по значению временного интервала с момента посылки лазерного импульса, а интенсивность принятого сигнала в каждый момент времени зависит как от свойств конкретного рассеивающего объёма атмосферы, так и от характеристик всей атмосферной трассы зондирования на двойном пути от лидара до рассеивающего объёма и обратно, приводится функциональная связь между всеми параметрами приёмопередающей системы лидара и интенсивностями принимаемого с различных расстояний протяжённой трассы зондирования локационного сигнала [13]:

$$P(r) = \eta P_0 A \frac{c\tau}{2} r^{-2} \beta_n(r) \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr'\right], \quad (1)$$

где $P(r)$ – мощность эхо-сигнала;

P_0 – мощность зондирующего импульса;

A – площадь зеркала принимающего телескопа лидара;

r – расстояние от лидара до зондируемого объёма атмосферы;

c – скорость света;

τ – длительность импульса;

$\beta_n(r)$ – сечение взаимодействия в направлении назад;

$\alpha(r')$ – объёмный коэффициент ослабления;

η – калибровочная константа.

В данном выражении экспонента и её показатель характеризуют квадрат прозрачности слоя атмосферы между лидаром и зондируемым объёмом.

Таким образом, система лидар позволяет дистанционно измерять температуры и скорости ветра на различных высотах путём активного зондирования атомарного натрия с использованием узкополосного лазерного излучения. Суть этого измерения связана с эффектом Доплера. Доплеровское уширение спектральной линии связано с движением молекул, их поглощательной и излучательной способностью. Распределение скоростей атомов натрия описывается распределением Максвелла – Больцмана. Доплеровское уширение спектральной линии обусловлено хаотическим тепловым движением атомов или молекул. Оно наиболее характерно для разреженных газообразных светящихся сред [14].

Доплеровское уширение спектральной линии приводит к распределению энергии в спектре, выражаемому следующей формулой:

$$S(\omega) = S_0 \exp \left[-\frac{mc^2}{2kT} \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где S_0 – спектральная плотность интенсивности излучения в центре линий на частоте ω_0 .

Представлен контур линии поглощения натрия при различных температурах (рис. 2).

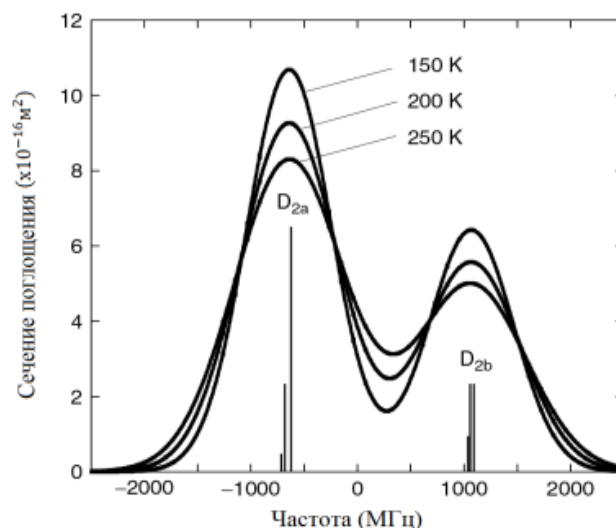


Рисунок 2 – Контур линии поглощения натрия при различных температурах

Измерение скорости ветра с использованием атомарного натрия определяется из измерения сдвига от центральной частоты D_2 атомарного натрия. Основываясь на ячейке с парами натрия и определяя сдвиг частоты, мы можем определить скорость ветра.

Представлен контур спектральной линии поглощения натрия при различных скоростях (рис. 3).

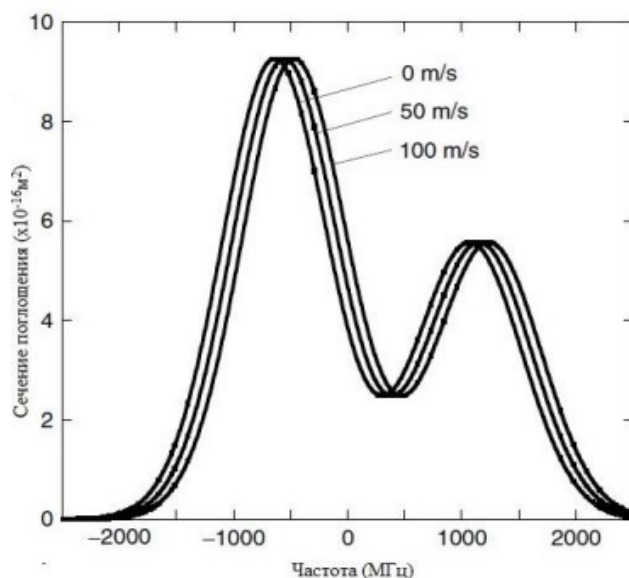


Рисунок 3 – Контур линии поглощения натрия при различных скоростях

Пример. Допустим, требуется сбросить неуправляемый боеприпас с высоты 6 км, и для сбора максимально полной информации о ветре по основным срезам высот требуется совершить манёвр в диапазоне от 1000 до 6000 м. Пусть вертикальная скорость объекта V постоянна и равна 50 м/с.

Представлен пример манёвра для сбора информации о ветре (рис. 4).

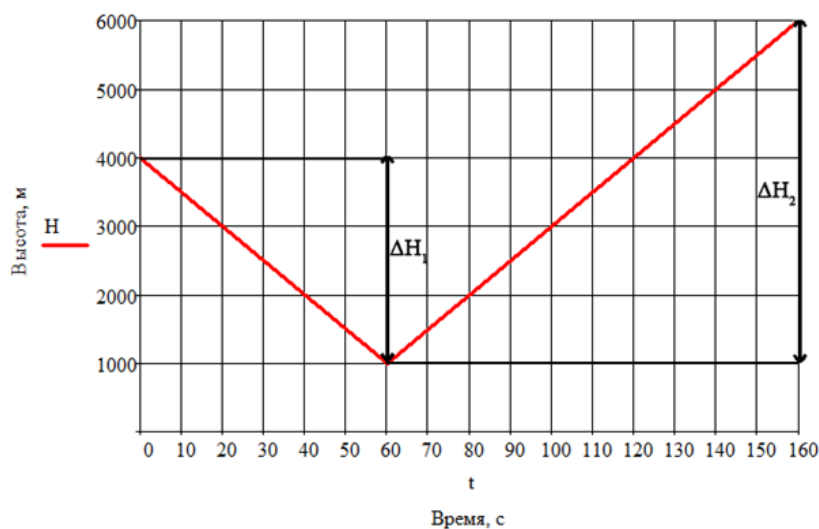


Рисунок 4 – Пример манёвра для сбора информации без применения системы лидар

Для манёвра перемещения с высоты 4000 м на высоту 1000 м (разница высот ΔH_1 составляет 3000 м), а затем на высоту 6000 м (разница высот ΔH_2 составляет 5000 м) необходимо затратить:

$$t = \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{V} = \frac{3000 + 5000}{50} = 160 \text{ с.}$$

В случае применения лидара с максимальной дальностью мгновенного определения скорости ветра, равной 5 км, время сбора информации занимает доли секунды, и манёвр объектом совершается только в интересах вывода на нужную высоту для сброса боеприпаса (рис. 5).

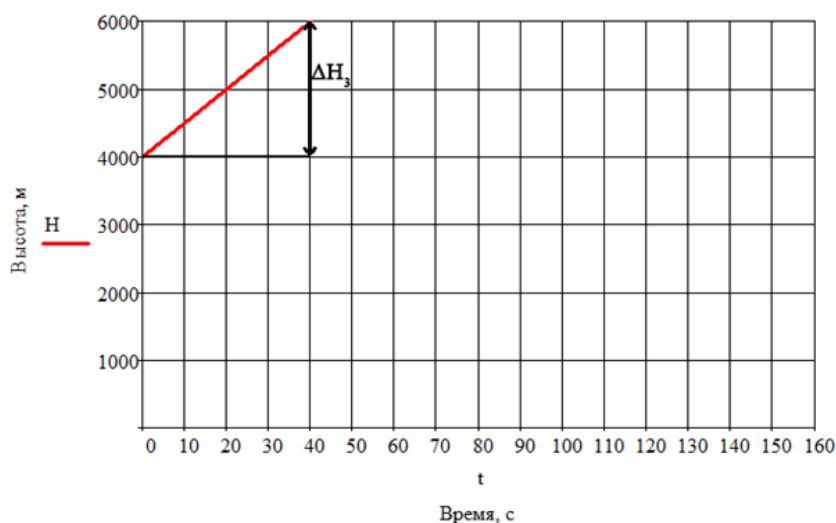


Рисунок 5 – Пример манёвра для сброса боеприпаса с применением системы лидар

Объекту необходимо только занять высоту 6000 м (разница высот ΔH_3 составляет 2000 м) для сброса боеприпаса, так как о скорости ветра по всем высотам ниже текущей высоты получена информация от системы лидар:

$$t_3 = \frac{\Delta H_3}{V} = \frac{2000}{50} = 40 \text{ с.}$$

Пределы высот маневрирования определяются возможностями устанавливаемой системы лидар.

Приведённые расчёты наглядно показывают преимущества предлагаемой модернизации ПНК.

Заключение. В данной статье показано, что применение принципов и механизмов системы лидар в прицельно-навигационном комплексе позволяет значительно уменьшить время, необходимое для расчёта траектории полёта неуправляемого снаряда, поскольку требуемая для систем расчетов скорость ветра и температура атмосферы по срезам высот определяется мгновенно без выполнения маневров объектом.

Библиографический список

1. Васильев, В. Проблемные вопросы организации информационного обеспечения управления ударными авиационными комплексами / В. Васильев, П. Федюнин, М. Данилин, А. Васильев // Труды МАИ. – 2019. – № 105. – С. 16.
2. Apollo 15 Mission // Lunar and Planetary Institute. – Режим доступа: https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_15/experiments/la, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 16.06.2021).
3. Boeing and JAXA to Flight-test Technology to Improve Safety // Boeing: The Boeing Company. – Режим доступа: <https://boeing.mediaroom.com/2017-08-02-Boeing-and-JAXA-to-Flight-test-Technology-to-Improve-Safety>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 16.06.2021).
4. Иванов, Д. Применение систем СВП-24 «Гефест» в боевых действиях / Д. Иванов, Д. Гурулев, О. Кокшаров // Трибуна ученого. – 2020. – № 8. – с. 24–28.
5. СВП-24 (прицельно-навигационный комплекс) // Wikipedia. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/СВП-24_\(прицельно-навигационный_комплекс\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/СВП-24_(прицельно-навигационный_комплекс)), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 18.02.2021).
6. Technology SITREP: How Russian engineering made the current operation in Syria possible // The Vineyard of the Saker. – Режим доступа: <http://thesaker.is/technology-sitrep-how-russian-engineering-made-the-current-operation-in-syria-possible>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 19.02.2021).
7. Никольский, М. Путь к совершенству / М. Никольский // Статьи про Авиатехнику. – Режим доступа: <http://aviation-gb7.ru/Su-24SVP24.htm>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 21.02.2021).
8. Личман, Г. Системы технического зрения, используемые в точном земледелии (часть 2) / Г. Личман, И. Смирнов, А. Беленков // Фермер. Поволжье. – 2017. – № 6. – С. 40–43.
9. Надолинская, П. И. Обзор механики в сфере робототехники и изучение робототехнической системы lidar / П. И. Надолинская // Молодежная наука в развитии регионов. – 2021. – Т. 1. – С. 211–215.
10. Локационные лазерные устройства // Лекции.орг – публикация материала для обучения. – Режим доступа: <https://lektcii.org/5-10914.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 18.02.2021).
11. Энергетический расчет аэрозольного лидара // Образовательный блог – всё для учёбы. – Режим доступа: <https://all4study.ru/raznoe/energeticheskij-raschet-aerozolnogo-lidara.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 17.02.2021).
12. Лидар // Wikipedia – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лидар>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 18.02.2021).
13. Зуев, В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы : монография / В. Е. Зуев, В. В. Зуев. – Санкт-Петербург : Институт оптики атмосферы, 1992. – 230 с.
14. Метлин, В. О. Дистанционное измерение концентрации натрия, скорости ветра и температуры в мезосфере по интенсивности сигналов резонансной флуоресценции : бакалаврская работа / В. О. Метлин. – Томск : Томский государственный университет, 2016. – 66 с.

References

1. Vasilev V., Fedjunin, P., Danilin, M., Vasilev, A. Problemnye voprosy organizatsii informatsionnogo obespecheniya upravleniya udarnymi aviatsionnymi kompleksami [Problematic issues of the organization of information support for the management of strike aviation complexes]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2019, no. 105, p. 16.
2. Apollo 15 Mission. *Lunar and Planetary Institute*. Available at: https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_15/experiments/la (accessed 16.06.2021).
3. Boeing and JAXA to Flight-test Technology to Improve Safety. *Boeing: The Boeing Company*. Available at: <https://boeing.mediaroom.com/2017-08-02-Boeing-and-JAXA-to-Flight-test-Technology-to-Improve-Safety> (accessed 16.06.2021).
4. Ivanov, D., Gurulev, D., Koksharov, O. Primenenie sistem SVP-24 «Gefest» v boevykh deystviyakh [The using of SVP-24 “Nephaestus” systems in combat operations]. *Tribuna uchenogo* [Tribune of the Scientist], 2020, no. 8, pp. 24–28.
5. SVP-24. *Wikipedia*. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/СВП-24_\(прицельно-навигационный_комплекс\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/СВП-24_(прицельно-навигационный_комплекс)) (accessed 18.02.2021).
6. Technology SITREP: How Russian engineering made the current operation in Syria possible. *The Vineyard of the Saker*. Available at: <http://thesaker.is/technology-sitrep-how-russian-engineering-made-the-current-operation-in-syria-possible/> (accessed 19.02.2021).
7. Nikolskiy, M. Put k sovershenstvu [The Path to Perfection]. *Stati pro Aviatekhniku* [Articles about Aircraft Engineering]. Available at: <http://aviation-gb7.ru/Su-24SVP24.htm> (accessed 21.02.2021).
8. Lichman, G., Smirnov, I., Belenkov, A. Sistemy tekhnicheskogo zreniya, ispolzuemye v tochnom zemledelii (chast 2) [Vision systems used in precision agriculture (part 2)]. *Fermer. Povolzhe* [Farmer. Volga region], 2017, no. 6, pp. 40–43.
9. Nadolinskaya, P. I. Obzor mekhaniki v sfere robototekhniki i izuchenie robototekhnicheskoy sistemy lidar [Overview of mechanics in the field of robotics and the study of the lidar robotic system]. *Molodezhnaya nauka v razvitiy regionov* [Youth Science in the Development of Russia], 2021, vol. 1, pp. 211–215.
10. Lokatsionnye lazernye ustroystva [Location laser devices]. *Lektzii.Org – publikatsiya materiala dlya obucheniya* [Lectures.org – publication of training material]. Available at: <https://lektcii.org/5-10914.html> (accessed 18.02.2021).
11. Energeticheskij raschet aerozolnogo lidara [Energy calculation of aerosol lidar]. *Obrazovatelnyy blog – vsyo dlya uchuby* [Educational blog – everything for learning]. Available at: <https://all4study.ru/raznoe/energeticheskij-raschet-aerozolnogo-lidara.html> (accessed 17.02.2021).

12. Lidar. *Wikipedia*. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лидар> (accessed 18.02.2021).
13. Zuev, V. E., Zuev, V. V. *Distantionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery : monografiya* [Remote optical sensing of the atmosphere : monograph]. Saint-Petersburg, Institute of Atmospheric Optics, 1992. 230 p.
14. Metlin, V. O. *Distantionnoe izmerenie kontsentratsii natriya, skorosti vetra i temperatury v mezosfere po intensivnosti signalov rezonansnoy fluorestsentsii : bakalavrskaya rabota* [Remote measurement of sodium concentration, wind speed, and temperature in the mesosphere by the intensity of resonant fluorescence signals : Bachelor's thesis]. Tomsk, Tomsk State University, 2016. 66 p.

УДК 519.6, 004.021

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЖЕНИЯ И ВСПЛЫТИЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ИХ КОНФИГУРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК)

Статья поступила в редакцию 07.09.2021, в окончательном варианте – 21.10.2021.

Соловьев Денис Сергеевич, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Соловьева Инна Александровна, ¹Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33; ²Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106,

¹ассистент, ²аспирант, e-mail: good.win32@yandex.ru

Хлебников Владимир Викторович, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: khlebnikovvv@mail.ru

Самохвалов Алексей Владимирович, Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33, кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: samohvalov@gmail.com

В работе рассматривается состояние вопроса моделирования поведения подводных аппаратов, на основе анализа которого установлено, что недостаточное внимание уделяется исследованию влияния конфигурации аппарата на процессы погружения и всплытия. Для оптимального управления процессами погружения и всплытия с учетом влияния конфигурации аппарата на основе принятых допущений рассматривается разработка соответствующей математической модели. Математическая модель представляет собой задачу Коши в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с начальными условиями. Решение системы уравнений описывается на основе метода Эйлера с контролем шага по времени. Для численного моделирования разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом пользователя. В качестве примера рассматривается моделирование всплытия подводной лодки проекта 945 «Барракуда». На основе анализа результатов численных экспериментов выявлены закономерности, которые можно использовать для выработки оптимальной стратегии управления процессами погружения или всплытия подводной лодки.

Ключевые слова: математическая модель, подводный аппарат, погружение, всплытие, численный метод, задача Коши, программное обеспечение

NUMERICAL SIMULATION OF IMMERSION AND ASCENT PROCESSES FOR UNDERWATER VEHICLES TAKING INTO ACCOUNT THEIR CONFIGURATION (ON THE EXAMPLE OF SUBMARINES)

The article was received by the editorial board on 07.09.2021, in the final version – 21.10.2021.

Solovjev Denis S., Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6613-3218, e-mail: solovjevdenis@mail.ru

Solovjeva Inna A., ¹Tambov State University named after G.R. Derzhavin, 33 Internatsionalnaya St., Tambov, 392000, Russian Federation; ²Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,

¹assistant, ²postgraduate student, e-mail: good.win32@yandex.ru