

УДК 621.396

Имитационная модель приемника лазерного излучения системы обнаружения и предупреждения о лазерном облучении беспилотных летательных аппаратов

Куркова О. П.

Постановка задачи: Разработка и внедрение различных средств противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), осуществляющим несанкционированные действия в особо ответственных зонах, в том числе средств, использующих лазерное излучение (ЛИ), вызывает необходимость параллельной разработки бортовых систем обнаружения и предупреждения о лазерном облучении (СПЛО) с целью повышения защищенности БПЛА. Эффективность СПЛО оценивается по возможности обеспечения регистрации ЛИ на максимально возможном от источника расстоянии. Ключевым элементом СПЛО является приемник ЛИ. Задача увеличения дальности обнаружения ЛИ приемником является сложной многофакторной задачей, которая может быть решена путем разработки комплексной имитационной модели функционирования приемника для оптимизации его конструктивных параметров и режимов функционирования, учитывающей все основные внешние и внутренние факторы, взаимосвязанные между собой и влияющие на дальность обнаружения ЛИ. **Целью работы** являлось создание имитационной модели приемника ЛИ для оптимизации его конструктивных параметров путем виртуального моделирования в интересах повышения эффективности СПЛО БПЛА. **Используемые методы:** методы компьютерного имитационного моделирования с применением программного комплекса MATLAB, в том числе MATLAB Simulink, и атмосферного компьютерного кода LOWTRAN VII. **Новизна результата** заключается в создании универсальной многопараметрической имитационной модели функционирования приемника ЛИ, а также комплекса выявленных путем компьютерного моделирования на ее основе зависимостей дальности обнаружения лазерного источника от основных конструктивных параметров приемника, состояний атмосферы, изменяющихся в связи с изменениями высоты полета БПЛА и погодных условий, параметров источника ЛИ. **Результат:** впервые создана имитационная модель функционирования приемника ЛИ для СПЛО БПЛА, позволяющая путем виртуального моделирования оптимизировать его конструктивные параметры на этапе разработки с целью обеспечения регистрации ЛИ на максимально возможном от источника расстоянии, прогнозировать функциональные возможности приемника ЛИ в зависимости от изменяющихся условий эксплуатации БПЛА и параметров источника ЛИ. Проведенное моделирование с использованием разработанной модели позволило выявить факторы, отрицательно влияющие на функциональные возможности приемника, сформулировать требования к конструкции приемника ЛИ, позволяющие обеспечить регистрацию ЛИ приемником на максимально возможном от источника расстоянии. **Практическая значимость:** разработанная имитационная модель может использоваться в качестве инструмента разработчика при создании приемников ЛИ, а также в качестве основы для разработки модуля программного обеспечения для управления процессом обнаружения ЛИ в составе бортовой аппаратуры СПЛО при эксплуатации БПЛА.

Ключевые слова: имитационная модель, лазерное излучение, источник лазерного излучения, беспилотный летательный аппарат, приемник системы обнаружения лазерного излучения, пороговая мощность, дальность обнаружения, оптическая система, объектив, фокусное расстояние, фотодиод, спектральная чувствительность, атмосфера, коэффициент пропускания, внешние и внутренние шумы.

Библиографическая ссылка на статью:

Куркова О. П. Имитационная модель приемника лазерного излучения системы обнаружения и предупреждения о лазерном облучении беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 36-62. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-36-62

Reference for citation:

Kurkova O. P. Simulation model of the receiver of the detection and warning system for laser irradiation of unmanned aerial vehicles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 36-62 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-36-62

Введение

В последнее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят все большее применение для несанкционированного наблюдения важных объектов, транспортировки запрещенных грузов, а также осуществления терактов, диверсий и других специальных операций. В связи с этим ведется активная разработка и внедрение различных средств противодействия БПЛА, осуществляющим подобные действия, в том числе средств, использующих лазерное излучение (ЛИ).

Средства поражения БПЛА лазерным излучением являются весьма перспективными средствами противодействия, но пока еще не получившими широкого применения. Несмотря на это, параллельно ведутся работы по созданию бортовых систем обнаружения и предупреждения о лазерном облучении (СПЛО) БПЛА с целью повышения их защищенности по аналогии с другими видами техники (наземной, морской, пилотируемой авиационной), где они уже начали находить свое применение.

Одним из ключевых элементов СПЛО является приемник ЛИ. Эффективность применения СПЛО во многом определяется возможностью обеспечить приемником своевременную регистрацию ЛИ на максимально возможном от источника расстоянии, а также его пороговой мощностью. Достижение требуемой дальности обнаружения ЛИ приемником является весьма сложной научно-технической задачей, так как результат ее решения зависит не только от технических характеристик самого приемника, но и от ряда внешних факторов, прежде всего, от погодных условий и состояния атмосферы, находящейся между источником и приемником ЛИ, сквозь которую проходит лазерный пучок.

Несмотря на то, что разработки приемников ЛИ или, как еще их принято называть, «детекторов ЛИ» ведутся уже довольно-таки давно, до настоящего времени не существует единого методического подхода к их созданию, в том числе с позиций их применения в составе бортовых СПЛО БПЛА.

Исследования, результаты которых частично представлены в настоящей статье, были направлены на решение этой научно-технической задачи – задачи создания комплексной многопараметрической модели функционирования приемника ЛИ, позволяющей путем виртуального моделирования на ее основе выявлять зависимости дальности обнаружения лазерного источника от основных конструктивных параметров приемника, состояний атмосферы, изменяющихся в связи с изменениями высоты полета БПЛА и погодных условий, параметров источника ЛИ, оптимизировать конструктивные параметры приемника на этапе разработки, прогнозировать его функциональные возможности в зависимости от изменяющихся условий эксплуатации БПЛА и параметров источника ЛИ.

Результаты проведенного моделирования с использованием разработанной модели позволили выявить факторы, отрицательно влияющие на функциональные возможности приемника, сформулировать ряд требований к конструкции приемника ЛИ и рекомендаций для разработчиков, выполнение которых способствует обеспечению возможности регистрации ЛИ на максимально возможном расстоянии от источника, тем самым положив начало созданию научно-обоснованного методического подхода к проектированию приемников ЛИ

для бортовых СПЛО БПЛА. Разработанная и представленная в настоящей статье имитационная модель может использоваться в качестве инструмента разработчика при создании приемников ЛИ, а также в качестве основы для разработки модуля программного обеспечения (ПО) для управления процессом обнаружения ЛИ в составе бортовой аппаратуры СПЛО при эксплуатации БПЛА. При этом интеграция модуля ПО с атмосферным компьютерным кодом LOWTRAN VII, предусмотренная моделью, исключит необходимость использования на борту БПЛА аппаратно-программного комплекса метеостанции.

Актуальность

Одной из основных сфер применения лазерных средств поражения в последние годы считается борьба с БПЛА. Вопросы возможности и эффективности использования ЛИ для функционального поражения БПЛА изложены в целом ряде литературных источников [1-10]. Например, в монографии С.И. Макаренко [11] раскрываются особенности функционального поражения объектов ЛИ, приводится анализ средств функционального поражения БПЛА лазерным излучением и эффективности их применения, делаются выводы о их достоинствах и недостатках. В качестве основных механизмов поражения БПЛА лазерным излучением рассматриваются: возможность воздействия на оптико-электронные средства (ОЭС) бортовой аппаратуры и воздействия на конструкционные материалы БПЛА с последующим их разрушением. При этом С.И. Макаренко отмечается, что эффективность поражения БПЛА лазерным излучением во многом зависит от метеоусловий, а также от имеющихся на борту БПЛА средств противодействия ЛИ таких, например, как система распыления аэрозолей типа «дымовая завеса» или специальных материалов, ориентированных на отражение или рассеивание ЛИ. В работе [12], опубликованной Ю.Л. Козирацким совместно с другими авторами из ВУНЦ Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», детально показывается методический подход к определению рационального выбора и использования лазерных средств в зависимости от объекта, на который нацелено воздействие.

Теоретическим аспектам взаимодействия ЛИ с объектами поражения также посвящен ряд опубликованных материалов. Этому направлению исследований посвящены многие работы, опубликованные специалистами ВУНЦ Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Например, в работах коллектива авторов А.Н. Глушкова, А.В. Марченко, Кулешова П.Е., Дробышевского Н.В. рассматривается как общая модель ОЭС как объекта функционального поражения лазерным излучением, так и вопрос моделирования конфликтного взаимодействия ОЭС БПЛА и лазерных комплексов, включая моделирование возможности защиты ОЭС БПЛА от ЛИ [13, 14]. В работах авторов Ю.Л. Козирацкого, Р.Г. Хильченко, Е.М. Шутько, П.Е. Кулешова, В.Д. Попело рассматриваются модели процессов обратного рассеяния ЛИ от помеховых защит, в том числе образуемых микростеклосферами ЛИ [15, 16]. Аналогично моделированию процессов взаимодействия источников ЛИ с БПЛА посвящен ряд публикаций и

зарубежных авторов. Например, молодыми исследователями Школы авионики Северо-Западного политехнического университета (Китай) была проведена работа по моделированию влияния ЛИ на эффективность полета боевых БПЛА [17].

Как уже отмечалось в приведенных выше публикациях, эффективность поражения БПЛА лазерным излучением во многом зависит от метеоусловий. В связи с этим имеется ряд публикаций, представляющих результаты исследований, касающихся вопросов моделирования распространения ЛИ в атмосфере. Примером такой публикации может служить работа, представленная коллектива авторов в составе Н.И. Плюснина, А.С. Ляскина, И.А. Зайцева и Е.В. Блинковой (Военный инновационный технополис «ЭРА»). В работе рассматриваются основные факторы, влияющие на распространение ЛИ в атмосфере: влияние свойств атмосферы и атмосферных эффектов, в том числе рассмотрены современные подходы к моделированию оптической турбулентности [18]. Аналогичные вопросы рассматриваются в публикации Н.А. Пирогова, А.С. Башкина, В.Н. Безноздера (НПО «Энергомаш» им. акад. В. П. Глушко), посвященной эффективности прохождения ЛИ через приземную турбулентную атмосферу [19] и ряде других опубликованных материалах.

Как показал анализа опубликованных материалов, в которых представляются результаты проводимых теоретических исследований, проблемы воздействия ЛИ на объекты и противодействия ЛИ со стороны объекта тесно взаимосвязаны между собой. Однако все приведенные выше исследования не касались конструктивных аспектов создания СПЛО БПЛА, в частности приемников ЛИ в их составе.

Известно, что изначально (с начала 1990-х годов) СПЛО, включающие датчики ЛИ, стали применяться для защиты бронетанковой техники [20]. Приемниками ЛИ были оснащены американские танки M1A1 и БМП M2 «Breadly» морской пехоты США, израильские танки «Merkava», японские танки «Type 90» и БМП «Type 89», итальянские танки «Ariete», боевые машины «Centaur» и VCC-80, ряд другой бронетехники зарубежных стран. Подробный обзор и анализ применяемых для этих целей зарубежных приёмных систем предупреждения о лазерном облучении приводится в работе С.В. Утемова и Т.Ю. Смагина (ФГНИИЦ РЭБ ОЭСЗ) [21]. В 1993 г. в составе российского танка Т-90 также была принята на вооружение система «Штора-1». В последующие годы были созданы комплексы «Линкей - СПЗ» и «Варта» [22]. Данные комплексы не только не уступали зарубежным аналогам, но по некоторым характеристикам и возможностям их превосходили. Так, например, комплекс «Линкей-СПЗ», имея в своем составе 4 распределенных головки регистрации ЛИ (диапазон длин волн 0,65 – 1,9 мкм), обеспечивал углы обзора по горизонтали (360°) и по вертикали (от минус 5° до плюс 25°) и позволял обнаруживать источники ЛИ на расстоянии от 400 м до 20 км. Входящая в состав комплекса аппаратура позволяла успешно выполнять ему свои функциональные задачи не только в условиях высокого уровня механических воздействий (вибрации, ударов), но и при интенсивном воздействии атмосферных осадков и пыли. Как показывает анализ имеющихся информационных источников, основными задача-

ми, на которых были сосредоточены в дальнейшем усилия разработчиков при совершенствовании лазерных приемников-индикаторов для подобных целей, являлись расширение воспринимаемого спектрального диапазона излучения и повышение помехозащищенности [23].

С начала 2000-х годов начались работы по созданию аналогичных комплексов для боевой и коммерческой авиации. В 2003 г. в США была принята общенациональная программа под эгидой Министерства внутренней безопасности (МВБ) США, получившая название «Counter-MANPADS». В рамках реализации этой программы были созданы комплексные системы оптоэлектронного противодействия «Nemesis» и «Guardian», а в дальнейшем система «JetEye», в состав которого входил лазерный генератор помех TADIRCM [24-26]. В 2021 г. появилась информация о создании системы Helios, разработанной компанией Adsys Controls (США), предназначенной специально для БПЛА, способной предотвращать ослепление и поражение БПЛА наземными лазерными средствами. Система Helios также, как и ранее созданные системы, имеет в своем составе комплекс датчиков, способных обнаруживать и идентифицировать воздействующее на БПЛА лазерное излучение [27].

Для защиты российской боевой авиации (самолетов и вертолетов) создан и нашел свое применение бортовой комплекс обороны «Витебск» («Президент»), не уступающий по своим возможностям зарубежным системам, имеющий в своем составе наряду с другой аппаратурой и систему обнаружения лазерного облучения, а также лазерную станцию оптико-электронного подавления (ЛСОЭП) [28]. Однако данная аппаратура не может применяться на БПЛА, прежде всего, из-за своих весьма существенных масса-габаритных параметров.

В настоящее время АО «НТЦ ЭЛИНС» разработана довольно-таки компактная СПЛО, включающая 24 фотоприемных модуля (диапазон длин волн 0,9 – 1,7 мкм), что позволяет обеспечить угол обзора 360°. Система способна обеспечить точность координат источника облучения не хуже 15° (характеристики по дальности обнаружения разработчиками не приводятся), время реакции – 0,05 с. Конструктивно СПЛО представляет собой моноблок массой 1,5 кг диаметром 140 мм и высотой 113 мм. Потребляемая мощность не более 7 Вт. При этом разработчиками предусмотрена возможность интеграции СПЛО со станцией индикации параметров атмосферы. Однако изначально разработчики ориентировались на применяемость системы на морских и наземных объектах и не рассматривали возможность применения в качестве бортовой аппаратуры БПЛА или других видов авиационной техники [29].

С точки зрения решения задачи обнаружения и идентификации ЛИ в случае облучения объектов авиационной техники, в том числе БПЛА, особый интерес представляет разработка, представленная и защищенная патентом на изобретение специалистами «Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского» Ивановым В.Г., Каменевым А.А., Поспеловым Г.В. и Савиным С.В. [30]. Конструкция разработанного ими устройства приемника ЛИ представляет собой двухканальную оптоэлектронную малогабаритную систему на базе матричного фотоприемника (фотоприемника ФППЗ БШ-22М, разработанного ЦНИИ «Электрон») и вычислителя. Лабораторные стендовые испытания опыт-

ного образца показали, что устройство позволяет одновременно с высокой точностью определять спектроэнергетические параметры ЛИ и координаты нахождения источника ЛИ, что обеспечивает высокое быстродействие, что особенно важно при расположении приемника на движущихся с большой скоростью объектах. Однако предлагаемым авторами к использованию фотоприемникам свойственны некоторые проблемные аспекты, касающиеся обеспечения необходимого уровня чувствительности, а также с необходимостью применения специальной системы охлаждения. Исследования возможностей устройства в части определения максимальной возможной дальности нахождения источника ЛИ, а также его функциональных характеристик в зависимости от состояния атмосферы при изменениях высоты полета или погодных условий авторами не проводились.

Большой интерес в настоящее время вызвали малогабаритные детекторы лазерного излучения «Паук» и «Филин», работающие также в диапазоне длин волн 0,8 – 1,7 мкм [31, 32]. Эти детекторы предназначены специально для защиты личного состава путем обнаружения, анализа и определения направления ЛИ от систем только обнаружения/наведения и дальномеров, то есть от источников соответствующей мощности.

Таким образом, анализ состояния вопроса в целом показал, что имеющейся информации о российских разработках СПЛО для БПЛА пока в открытой печати не встречается.

Таким образом, создание отечественного образца СПЛО для защиты БПЛА от воздействия лазерного противодействия при выполнении ими своих функциональных задач является весьма актуальной научно-технической задачей. Решение этой задачи может значительно облегчить создание унифицированного методического подхода к проектированию приемников ЛИ для бортовых СПЛО БПЛА, в том числе основанного на методах компьютерного моделирования. Построение моделей и инженерное моделирование позволит более точно рассчитать и оптимизировать требуемые конструктивные параметры СПЛО с учетом особенностей эксплуатации в составе бортовой аппаратуры БПЛА, осуществить оптимальный выбор компонентной базы и сформировать рекомендуемые рабочие режимы для более эффективного ее применения.

Постановка задачи

Целью работы, результаты которой частично представлены в настоящей статье, являлась разработка имитационной модели функционирования приемника лазерного излучения в интересах повышения эффективности системы обнаружения и предупреждения о лазерном облучении (СПЛО) беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Эффективность СПЛО принято оценивать по возможности обеспечения регистрации лазерного излучения (ЛИ) на максимально возможном от источника расстоянии с заданной вероятностью (не менее 0,9).

Дальность обнаружения ЛИ, прежде всего, определяется возможностями приемника (датчика/датчиков) ЛИ, входящего в состав СПЛО. Однако задача увеличения дальности обнаружения ЛИ приемником является весьма сложной

многофакторной научно-технической задачей. Для ее разрешения необходимы учет и оптимизация как параметрических характеристик конструкции самого приемника и его составных частей, так и параметрических характеристик источника ЛИ, а также параметров условий внешней среды, в которой осуществляется их эксплуатация, в частности параметров текущего фактического состояния атмосферы между источником и приемником ЛИ. При этом решение этой проблемы требуется как на этапах создания приемников ЛИ и СПЛО в целом, так и на этапах их эксплуатации в составе аппаратуры бортового комплекса управления БПЛА.

Поставленная цель, по мнению автора настоящей статьи, могла быть достигнута путем разработки комплексной имитационной модели СПЛО БПЛА, учитывающей все основные внешние и внутренние факторы, влияющие на дальность обнаружения ЛИ, позволяющей осуществлять на ее основе компьютерное моделирование функционирования СПЛО с целью оптимизации параметрических характеристик конструкции приемника обнаружения ЛИ на этапах его создания, а также формировать рекомендации по возможности управления режимами его функционирования в процессе эксплуатации в зависимости от изменения внешних условий по параметрам атмосферы в соответствии с изменениями погодных условий и высоты полета БПЛА.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие частные задачи:

- разработать структурную схему комплексного представления системы, условно состоящей из трех основных взаимосвязанных подсистем: источник ЛИ, атмосфера, приемник ЛИ;
- определить основные параметры, характеризующие каждую из подсистем и входящие в них ключевые компоненты;
- разработать имитационную модель функционирования приемника обнаружения ЛИ СПЛО;
- разработать математическое описание соответствующих процессов для каждого блока модели;
- осуществить выбор программных комплексов для использования при компьютерной реализации модели и ее последующего тестирования;
- осуществить исследования путем компьютерного моделирования с использованием разработанной имитационной модели и выявить зависимость дальности обнаружения лазерного источника от состояния атмосферы;
- осуществить исследования путем компьютерного моделирования с использованием разработанной имитационной модели и выявить зависимость дальности обнаружения лазерного источника от основных параметров приемника обнаружения ЛИ при различных погодных условиях;
- осуществить исследования путем компьютерного моделирования с использованием разработанной имитационной модели и выявить зависимость основных параметров мощностей воспринимаемых приемником сигналов с целью оценки его эксплуатационных возможностей;

- разработать основные рекомендации (требования), необходимые для выполнения при создании приемников обнаружения ЛИ с целью обеспечения максимально возможной дальности обнаружения источников ЛИ посредством СПЛО БПЛА.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались методы компьютерного имитационного моделирования с применением программного комплекса MATLAB, в том числе MATLAB Simulink, и атмосферного компьютерного кода LOWTRAN VII.

LOWTRAN VII [33] представляет собой специальный программный комплекс в виде модели для расчета и прогнозирования коэффициентов пропускания атмосферы и фонового излучения в диапазоне от 0 до 50 000 см⁻¹ при разрешении 20 см⁻¹, а также ряда других параметров атмосферных условий. При этом атмосфера представляется в виде 32 слоев от 0 до 100000 км над уровнем моря. Толщина первой группы слоев составляет от 1 км до 25 км, второй – от 25 км до 50 км (вершина стратосферы), и последние два слоя имеют толщину 20 км и 30 км соответственно. LOWTRAN VII не рекомендуется использовать для анализа пространства выше 100 км. Физические характеристики каждого слоя определяются на основе исходных данных и предопределенных стандартных моделей различных регионов и сезонов. LOWTRAN VII широко используется для многих исследований. Принцип построения и возможности LOWTRAN VII вполне позволяют использовать его для моделирования и параметрических расчетов атмосферных параметров в условиях эксплуатации БПЛА. Кроме того, LOWTRAN VII имеет возможность интеграции с рядом других программных комплексов, в том числе с MATLAB, что и было использовано при проведении исследований, результаты которых представлены в настоящей статье.

Результаты исследований и разработок

В результате проведенных исследований была разработана комплексная имитационная модель системы обнаружения и предупреждения о лазерном облучении (СПЛО) беспилотного летательного аппарата (БПЛА), учитывающая все основные внешние и внутренние факторы, влияющие на эффективность ее функционирования, включая параметрические характеристики источника лазерного излучения (ЛИ), приемника ЛИ, текущие параметры погодных условий и атмосферы.

Разработанная модель позволяет имитировать влияние погодных условий на характеристики приемника лазерного излучения СПЛО.

Исходя из поставленной задачи при разработке модели рассматривалась система, условно состоящая из трех основных взаимосвязанных подсистем:

- источник ЛИ;
- атмосфера;
- приемник ЛИ, расположенной на борту БПЛА СПЛО.

В качестве параметров, характеризующих источник ЛИ, принимались:

- длина волны (λ_0);
- длина импульса (τ_i);
- энергия импульса (E);
- угол отклонения лазерного излучателя (θ);
- выходная мощность лазерного излучателя ($P_{\text{вых}}$);
- диаметр апертуры передатчика (a).

Параметры источника ЛИ исходно определяют требуемые параметры приемника: его чувствительность, частотные и спектральные характеристики.

При разработке модели учитывалось, что приемник ЛИ должен включать в себя следующие основные элементы:

- оптическая система;
- диафрагма;
- фотодиод;
- усилитель;
- процессор, формирующий решение об обнаружении ЛИ.

Оптическая система фокусирует ЛИ в чувствительной области приемника, осуществляет пространственную и спектральную фильтрацию оптического сигнала.

В качестве параметров, характеризующих оптическую систему, были приняты:

- диаметр объектива (D);
- фокусное расстояние приемного объектива (f);
- спектральная полоса пропускания оптического фильтра ($\Delta\lambda$).

Для учета возможных потерь в оптической системе был введен специальный коэффициент ($k_{\text{опт}}$).

Фотодиод выполняет функцию преобразования оптического сигнала в электрический сигнал. В качестве параметров, характеризующих фотодиод, были приняты:

- спектральная чувствительность (S_λ);
- размер чувствительной области (ℓ);
- сопротивление нагрузки (R_L).

Усилительный каскад предназначен для поддержания требуемого коэффициента усиления (K) электрического сигнала. Каскад состоит из двух составных частей. Первая осуществляет преобразование выхода фотодиода: импульсов тока в импульсы напряжения и усиливает сигналы до требуемой величины, имеет в своем составе высокочастотный фильтр и ограничитель пиков (имитирующий процесс насыщения). Вторая – работает как усилитель с фиксированным коэффициентом усиления и ограниченная полоса пропускания, имеет в своем составе фильтр низких частот и блок пикового терминатора, моделирующий процесс насыщения в каскаде.

Если основным оценочным параметром источника ЛИ является выходная мощность ($P_{\text{вых}}$), то оценочным параметром приемника ЛИ СПЛО может быть принята его пороговая мощность ($P_{\text{пор}}$), которая должна соответствовать уровню мощности ЛИ на входе в приемник ($P_{\text{вх}}$).

Процессор не только формирует и выдает решение об обнаружении ЛИ, но и осуществляет сопоставление его амплитудного значения с пороговым уровнем, выявляя возможное превышение.

В процессе функционирования системы приемник ЛИ СПЛО находится на определенном расстоянии (R) от источника ЛИ и может обладать только определенным «полем зрения» (ω) не зависимо от размера диаметра лазерного луча (x) в плоскости приемного объектива.

Атмосферный слой, находящийся между источником ЛИ и приемником ЛИ, сквозь который проходит лазерный пучок, обладает свойством «атмосферного пропускания» (T_A) ЛИ, определяемого ее параметрами поглощения ($T_A^{\text{погл}}$) и рассеивания ($T_A^{\text{рас}}$) лазерного пучка. Эти параметры, в свою очередь, прежде всего зависят от температуры (T), а также атмосферного давления, относительной влажности, состава, включая наличие водяного пара и взвешенных аэрозолей и посторонних частиц. При этом атмосферный слой будет обладать определенной полосой пропускания (Δf_A) ЛИ. В связи с этим, при функционировании СПЛО всегда необходимо учитывать условие, что $P_{\text{вых}} < P_{\text{вх}}$. Кроме этого, атмосфера может вызывать искажение лазерного пучка ввиду атмосферной турбулентности.

Разработанная в рамках проведенных исследований имитационная модель функционирования приемника ЛИ СПЛО представлена на рис. 1.

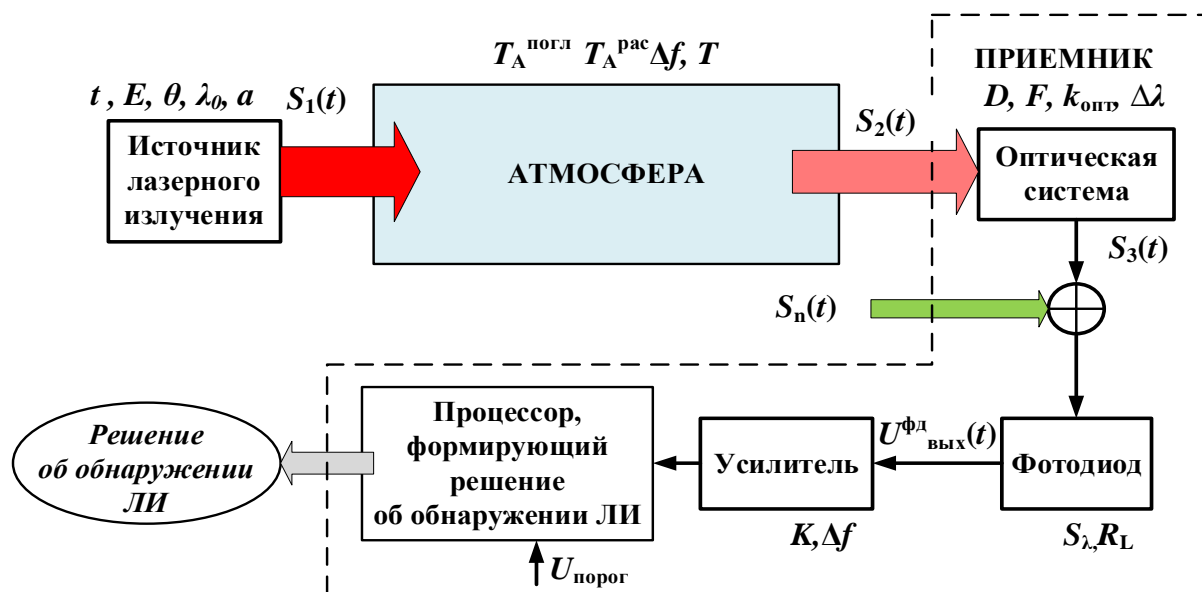


Рис. 1. Имитационная модель функционирования приемника ЛИ СПЛО

На рис. 1 показаны не только блоки компонентов, составляющие модель, но и последовательность преобразования оптических и электрических сигналов. Каждый блок модели позволяет осуществить математическое описание процесса преобразования соответствующих типов сигналов (S). Для более детального представления процесса моделирования функционирования СПЛО с

использованием данной модели рассмотрим каждый из блоков модели посредством математического описания соответствующих процессов.

Известно, что источник ЛИ генерирует импульсные выходные сигналы, изменяющиеся во времени по закону, соответствующему распределению Гаусса. Тогда выходной сигнал $S_1(t)$, исходящий от источника ЛИ, для нашей модели можно представить как:

$$S_1(t) = P_{\text{вых}} \exp\left\{\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (1)$$

где: $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность, определяемая как $P_{\text{вых}}=E/\tau_i$; t – текущее время; σ^2 – дисперсия распределения Гаусса.

В этом случае лазерный импульс можно моделировать с помощью библиотеки Simulink программного комплекса MatLab. Блок «Лазерный генератор» модели можно использовать для моделирования любых типов лазерных сигналов, задавая различные значения исходных параметров.

Лазерный сигнал $S_2(t)$, прошедший атмосферный слой, можно представить как:

$$S_2(t) = S_1(t) \cdot T_A(\lambda) \cdot K_A(\lambda), \quad (2)$$

где: $T_A(\lambda)$ – атмосферное пропускание лазерного пучка; $K_A(\lambda)$ – коэффициент, описывающий турбулентные искажения амплитуды оптического сигнала.

При этом оба параметра являются функциями длины волны λ .

Атмосферное пропускание можно представить как:

$$T_A(\lambda) = T_A^{\text{погл}}(\lambda) \cdot T_A^{\text{рас}}(\lambda), \quad (3)$$

Атмосферное поглощение $T_A^{\text{погл}}$ может быть рассчитано следующим образом.

$$T_A^{\text{погл}}(\lambda) = \exp(-\alpha_{\text{погл}}(\lambda) \cdot R), \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{погл}}(\lambda)$ – коэффициент поглощения, который для атмосферы будет представлять собой сумму коэффициентов ее составляющих:

$$\alpha_{\text{погл}}(\lambda) = \alpha_{\text{погл.H}_2\text{O}}(\lambda) + \alpha_{\text{погл.CO}_2}(\lambda) + \alpha_{\text{погл.O}_3}(\lambda) \quad (5)$$

При этом известно, что $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{погл}} \gg \alpha_{\text{CO}_2}^{\text{погл}}$ и $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{погл}} \gg \alpha_{\text{O}_3}^{\text{погл}}$, а коэффициент поглощения водяным паром $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{погл}}(\lambda)$, в свою очередь, является функцией атмосферного давления, температуры, относительной влажности и его концентрации, определяемой как количество H_2O (мм), осаждаемой на расстоянии 1 км.

Атмосферное рассеивание $T_A^{\text{рас}}$ может быть рассчитано как:

$$T_A^{\text{рас}}(\lambda) = \exp(-\alpha_{\text{рас}}(\lambda) \cdot R), \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{рас}}(\lambda)$ – коэффициент рассеивания.

Атмосферное рассеивание ЛИ принято рассматривать для трех основных состояний атмосферы:

- чистая атмосфера;
- дымка;
- туман.

В условиях чистой атмосферы коэффициент атмосферного рассеивания является функцией длины волны (λ) и метеорологической дальности (R_m). В условиях дымки или тумана коэффициент атмосферного рассеивания будет являться функцией не только длины волны, но и будет зависеть от радиуса и плотности частиц.

Эффект турбулентности атмосферы может быть смоделирован на основе теории распространения волн В.И. Татарского [34] как детерминированный процесс. Тогда коэффициент $K_A(\lambda)$ в выражении (2), описывающий турбулентные искажения амплитуды оптического сигнала, можно представить как:

$$K_A(\lambda) = \exp(-\sigma_1), \quad (7)$$

где σ_1 – дисперсия логарифма интенсивности излучения для флуктуаций, зависящая от длины волны, расстояния до источника излучения, а также некой структурной постоянной коэффициента преломления.

Однако учитывая стохастический характер процесса влияния турбулентности атмосферы, исходя из поставленной практической цели моделирования, в данной имитационной модели коэффициент ослабления амплитуды ЛИ ввиду турбулентных искажений рассматривался как доля определенного порогового значения и принимался равным 0,9.

Для расчета же атмосферных коэффициентов поглощения и рассеяния возможно использовать компьютерную программу LOWTRAN VII с последующей интеграцией результатов в блок «Атмосфера» рассматриваемой имитационной модели приемника ЛИ СПЛО. В качестве исходных данных для расчетов могут использоваться predetermined базы данных для различных регионов и сезонов для соответствующих «рабочих» слоев атмосферы, или/и фактические данные датчиков измерения текущих параметров атмосферы, входящих в состав СПЛО.

Выходной сигнал $S_3(t)$ блока модели «Оптическая система» можно представить как:

$$S_3(t) = S_2(t) \frac{S_D}{S_{\text{ЛП}}}, \quad (8)$$

где: S_D – площадь полученной апертуры;

$S_{\text{ЛП}}$ – площадь сечения лазерного пучка на расстоянии R от источника ЛИ, равная

$$S_{\text{ЛП}} = \frac{\pi [a + (\theta + \theta_A) \cdot R]^2}{4}, \quad (9)$$

где: θ – расходимость лазерного пучка;

θ_A – расходимость, вызванная турбулентностью ($\theta_A \approx \lambda/r_0$, где r_0 – длина когерентности волны).

Однако при моделировании функционирования приемника ЛИ необходимо учитывать, что на фотодиод приемника кроме выходного сигнала $S_3(t)$ неизбежно будут поступать и шумовые сигналы $S_n(t)$, которые будут суммироваться с полезным сигналом $S_3(t)$. В имитационной модели данный аспект представлен в виде некоего виртуального сумматора.

Источниками $S_n(t)$ могут являться внешние и внутренние шумы. Причинами внешнего шума могут являться погодные условия, тип фона, солнечное излучение, отражение облачных поверхностей, отражение от поверхности земли, излучения ночного неба и т.д. Причинами внутреннего шума могут являться электронные факторы, такие как: тепловой шум, дробовой шум и т.д.

Входная мощность шума в фотодетектор будет определяться как:

$$S_n(t) = P_\Sigma \cdot n(t), \quad (10)$$

где P_Σ – полная средняя мощность шума, равная сумме мощностей внешнего ($P_{\text{внеш}}$) и внутреннего ($P_{\text{внутр}}$) шумов.

В общем случае плотность вероятности P_Σ может рассматриваться как гауссовская, т.е.

$$p(n(t)) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(n - \mu_n)^2}{2\sigma_n^2} \right\}, \quad (11)$$

где $n(t)$ – это гауссовский, стационарный, белый шум.

Мощность внешнего фонового шума можно определить как:

$$P_{\text{внеш}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda) \cdot \omega \cdot S_D \cdot K_{\text{опт}} d\lambda, \quad (12)$$

где: $d\lambda$ – спектральная полоса пропускания интерференционного фильтра; $B(\lambda)$ – спектральная яркость фона.

Мощность внутреннего шума можно определить как:

$$P_{\text{внутр}} = \frac{\sqrt{i_n^2}}{S_\lambda}, \quad (13)$$

где: i_n^2 – дисперсия шумового тока; S_λ – спектральная чувствительность фотодиода.

Дисперсия шумового тока i_n^2 определяется как сумма тепловых $i_{\text{тепл}}^2$ и дробовых $i_{\text{дроб}}^2$ шумов фотодиода.

Тепловой шум определяется как:

$$i_{\text{тепл}}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_L}, \quad (14)$$

где: k – постоянная Больцмана; T – температура окружающей среды; R_L – сопротивление нагрузки фотоприемника; Δf – пропускная способность.

Дробовой шум можно определить по формуле:

$$i_{\text{дроб}}^2 = 2 \cdot e \cdot \Delta f \cdot M_A \cdot X \cdot (I_D + S_\lambda P_A + S_\lambda P_b), \quad (15)$$

где: e – заряд электрона; M_A – коэффициент умножения; X – коэффициент избыточного шума; I_D – средний темновой ток; P_A – средняя мощность оптического сигнала; P_b – средняя мощность фона.

Процесс преобразования фотодиодом оптического сигнала в электрический можно описать как:

$$U_{\text{вых}}^{\text{фд}}(t) = S_\lambda [S_3(t) + S_n(t)] R_L, \quad (16)$$

где: $U_{\text{вых}}^{\text{фд}}(t)$ – выходное напряжение как выходной сигнал блока «Фотодиод» имитационной модели.

Если задачей СПЛО является обнаружение ЛИ на больших расстояниях (в том числе, слабых оптических сигналов) с необходимостью покрытия широкого диапазона длин волн, то для ее решения потребуется использование нескольких фотодиодов. При этом важен выбор типа фотодиода. Если требуется высокая чувствительность, то целесообразнее использовать фотодиод лавинного типа (APD), если требуется снизить уровень шума, то целесообразно использовать PIN фотодиод.

Выходное напряжение каскада усиления можно описать как:

$$U_{\text{вых}}(t) = K \cdot U_{\text{вых}}^{\text{фд}}(t), \quad (17)$$

где: $U_{\text{вых}}(t)$ – выходное напряжение как выходной сигнал блока «Усилитель» имитационной модели; K – коэффициент усиления.

Для формирования решения об обнаружении приемником ЛИ необходимо знать значение порогового напряжения. Пороговое напряжение $U_{\text{порог}}$ можно определить по формуле:

$$U_{\text{порог}} = (P_{\text{внутр}}) \cdot S_{\lambda} \cdot R_L \cdot K \cdot q(D, F), \quad (18)$$

где: $q(D, F)$ – соотношение сигнал/шум, обеспечивающее требуемые значения вероятности правильного обнаружения (D) и ложной тревоги (F).

Если выполняется условие $U_{\text{вых}}(t) > U_{\text{порог}}$, следовательно ЛИ обнаружено.

Если $U_{\text{вых}}(t) \leq U_{\text{порог}}$, следовательно ЛИ не обнаружено.

В целом разработанная модель может быть реализована с использованием программного комплекса MATLAB, в том числе MATLAB Simulink с интеграцией с компьютерным кодом LOWTRAN VII. Для облегчения работы Пользователей с разработанной моделью целесообразно использовать графический интерфейс MATLAB.

Использование разработанной модели позволило осуществить моделирование возможной максимальной дальности обнаружения лазерного источника при различных атмосферных условиях в вариантах использования в приемнике различных наиболее распространенных марок лавинных фотодиодов. При моделировании принимались основные исходные характеристики компонентов системы:

- генератор: пиковая мощность импульса – 25 мВт, время импульса – 35 нс, расходимость лазерного пучка – 3 мрад;
- оптическая система: входной диаметр оптической линзы – 30 мм; фокусное расстояние – 40 мм, коэффициент потерь – 0,5;
- усилительный каскад: коэффициент усиления – 20, полоса пропускания – $30 \cdot 10^6$ Гц.

Данные моделирования представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что дальность обнаружения увеличивается при улучшении атмосферных условий.

Кроме этого, путем моделирования были исследованы и получены зависимости дальности обнаружения лазерного источника от основных параметров приемника таких, как: диаметра приемной линзы и фокусное расстояние оптической системы, спектральная ширина полосы пропускания, спектральная чув-

ствительность и размер чувствительной области фотодиода, и ряда других параметров, также при различных атмосферных условиях. Результаты моделирования представлены ниже в таблицах 2–6.

Таблица 1 – Максимальной дальности обнаружения лазерного источника при различных погодных условиях

Тип фотодиода	Длина волны (мкм)	Спектральный диапазон (мкм)	Максимальной дальности обнаружения лазерного источника (км)		
			Атмосферные условия		
			Хорошие $0,7 \leq T_A(\lambda) \leq 0,98$	Типичные $0,13 \leq T_A(\lambda) \leq 0,76$	Плохие $0,04 \leq T_A(\lambda) \leq 0,017$
S 2382 (Si)	0,63	0,400-0,810	4,3	3,0	1,9
S 8890 (Si)	1,06	0,811-1,110	5,5	4,2	2,1
C30644E (InGaAs)	1,54	1,111-1,700	7,2	5,7	2,4

Таблица 2 – Зависимость дальности обнаружения лазерного источника от диаметра приемной линзы оптической системы при различных погодных условиях

Атмосферные условия	Дальности обнаружения лазерного источника (км)		
	Диаметра приемной линзы оптической системы (мм) при фокусном расстоянии 40 мм		
	30	40	50
Хорошие $0,7 \leq T_A(\lambda) \leq 0,98$	5,5	6,3	6,9
Типичные $0,13 \leq T_A(\lambda) \leq 0,76$	4,2	4,6	4,9
Плохие $0,04 \leq T_A(\lambda) \leq 0,017$	2,1	2,2	2,3

Таблица 3 – Зависимость дальности обнаружения лазерного источника от фокусного расстояния оптической системы при различных погодных условиях

Атмосферные условия	Дальности обнаружения лазерного источника (км)		
	Фокусное расстояние оптической системы (мм) при диаметре линзы 30 мм		
	40	60	80
Хорошие $0,7 \leq T_A(\lambda) \leq 0,98$	5,5	6,5	7,3
Типичные $0,13 \leq T_A(\lambda) \leq 0,76$	4,2	4,7	5,1
Плохие $0,04 \leq T_A(\lambda) \leq 0,017$	2,1	2,2	2,2

Таблица 4 – Зависимость дальности обнаружения лазерного источника от спектральной ширины полосы пропускания при различных погодных условиях

Атмосферные условия	Дальности обнаружения лазерного источника (км)		
	Спектральная ширина полосы пропускания (нм)		
	40	80	120
Хорошие $0,7 \leq T_A(\lambda) \leq 0,98$	8,5	7,4	6,9
Типичные $0,13 \leq T_A(\lambda) \leq 0,76$	5,5	5,1	4,8
Плохие $0,04 \leq T_A(\lambda) \leq 0,017$	2,2	2,2	2,3

Таблица 5 – Зависимость дальности обнаружения лазерного источника от спектральной чувствительности фотодиода при различных погодных условиях

Атмосферные условия	Дальности обнаружения лазерного источника (км)		
	Спектральная чувствительность фотодиода		
	$\lambda=1,02$ мкм $S_\lambda=46,84$ А/Вт	$\lambda=1,06$ мкм $S_\lambda=19,77$ А/Вт	$\lambda=1,10$ мкм $S_\lambda=9,00$ А/Вт
Хорошие $0,7 \leq T_A(\lambda) \leq 0,98$	6,6	5,5	3,8
Типичные $0,13 \leq T_A(\lambda) \leq 0,76$	4,7	4,2	3,2
Плохие $0,04 \leq T_A(\lambda) \leq 0,017$	2,3	2,1	1,8

Таблица 6 – Зависимость дальности обнаружения лазерного источника от размеров чувствительной области фотодиода при различных погодных условиях

Атмосферные условия	Дальности обнаружения лазерного источника (км)		
	Чувствительная область фотодиода (мкм)		
	200	500	800
Хорошие $0,7 \leq T_A(\lambda) \leq 0,98$	8,0	5,5	4,5
Типичные $0,13 \leq T_A(\lambda) \leq 0,76$	5,4	4,2	3,6
Плохие $0,04 \leq T_A(\lambda) \leq 0,017$	2,2	2,1	2,0

Из результатов, представленных в таблицах 2–6 видно, что:

- при увеличении диаметра приемной оптической линзы существенно увеличивается дальность обнаружения, что может быть обусловлено увеличением мощности принимаемого сигнала;
- увеличение фокусного расстояния оптической системы приводит к сужению поля зрения и снижению уровня фона, что, в свою очередь, приводит к повышению чувствительности приемного канала;
- с увеличением полосы пропускания спектра дальность обнаружения уменьшается, но при плохих атмосферных условиях дальность обнаружения фактически не меняется, что вызвано может быть вызвано эффектом общего ослабления оптического сигнала в атмосфере;

- с увеличением спектрального отклика фотодиода дальность обнаружения значительно увеличивается, что может быть обусловлено увеличением отношения сигнал/шум в канале приема.
- с увеличением размера чувствительной области фотодиода дальность обнаружения уменьшается, что может быть объяснено повышением уровня шума в канале приема.

В процессе исследований путем моделирования процесса функционирования СПЛО с использованием разработанной модели также был получен ряд зависимостей основных параметров мощностей воспринимаемых приемником ЛИ сигналов, используемых для оценки его эксплуатационных возможностей, например таких как: уровня мощности принимаемого оптического сигнала от дальности до лазерного источника при различных значениях диаметра объектива оптической системы приемника (рис. 2); средней мощности фонового шума от фокусного расстояния оптической системы приёмника СПЛО (рис. 3); пороговой мощности от спектральной чувствительности лавинного фотодиода и ряд других.

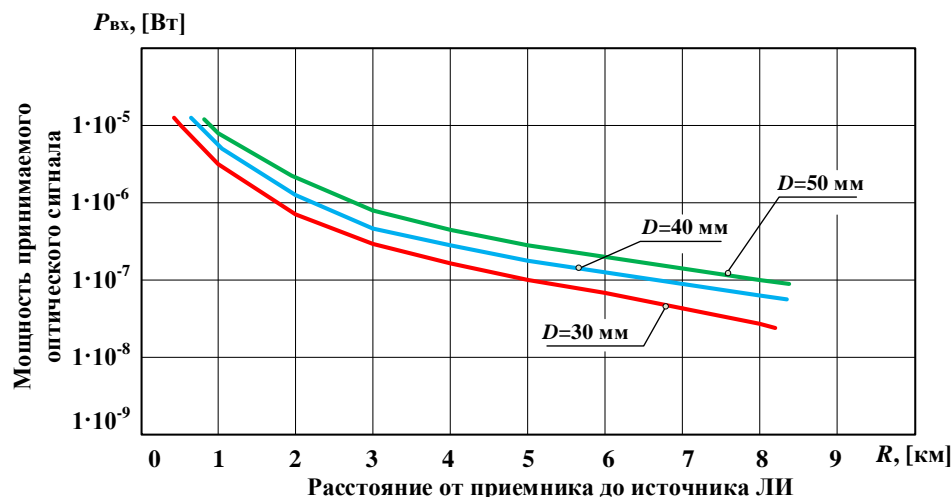


Рис. 2. Зависимость уровня мощности принимаемого оптического сигнала ($P_{вх}$) от дальности до лазерного источника (R) для различных значений диаметра объектива (D) при пиковой мощности импульса $P_{вых}=25$ мВт и расходимости лазерного пучка $\theta=3$ мрад

Из анализа результатов, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что с увеличением расстояния до лазерного источника мощность принимаемого сигнала существенно снижается, что частично может быть компенсировано увеличением диаметра объектива.

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что для снижения уровня фонового излучения, поступающего на фотоприемник, необходимо уменьшить его поле зрения за счет увеличения фокусного расстояния объектива и уменьшения размера чувствительной области фотоприемника, одновременно уменьшая полосу пропускания фильтра помех.

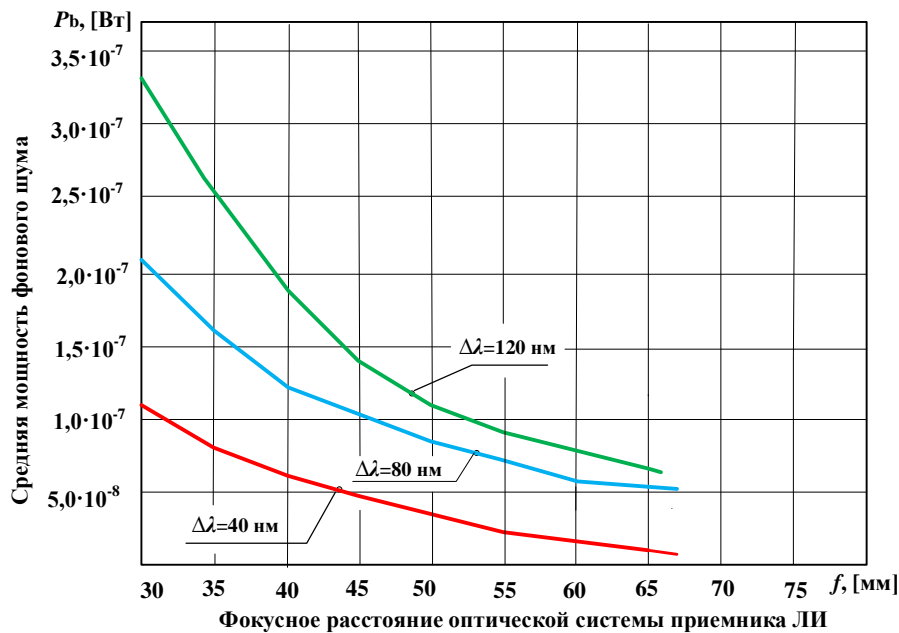


Рис. 3. Зависимость средней мощности фонового шума (P_b) от фокусного расстояния (f) оптической системы приёмника для различных оптических спектральных полос пропускания ($\Delta\lambda$) при диаметре объектива $D=30$ мм и диаметре чувствительной области фотоприемника $l=0,5$ мм

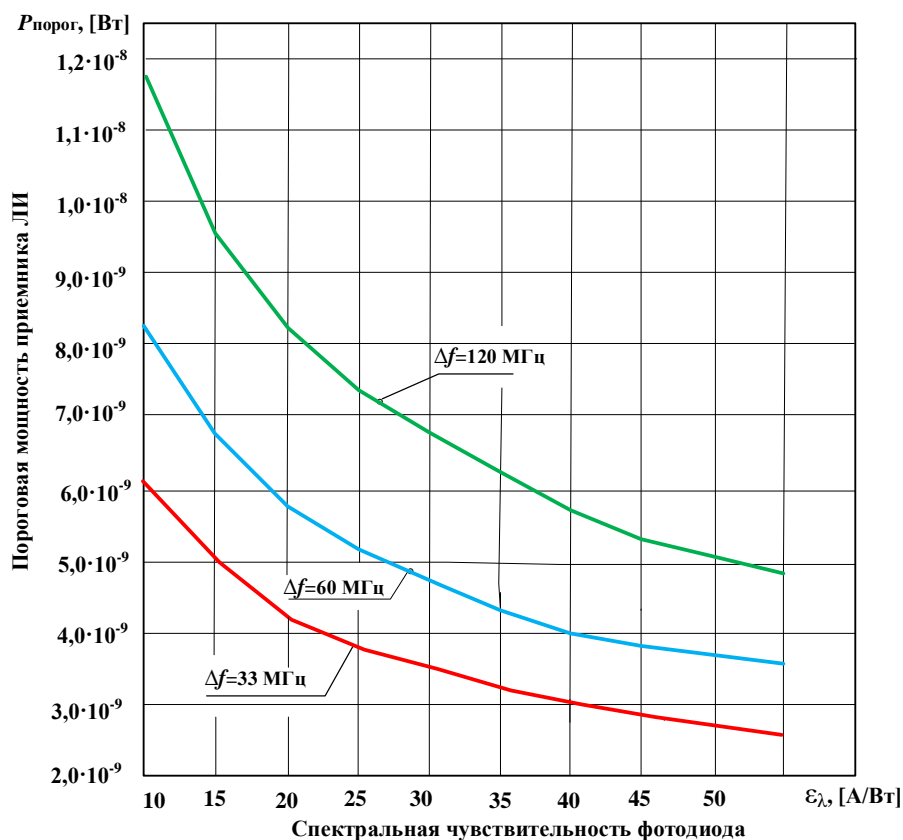


Рис. 4. Зависимость пороговой мощности приемника ЛИ ($P_{\text{порог}}$) от спектральной чувствительности лавинного фотодиода (ϵ_λ) для различной пропускной способности (Δf) при мощности принимаемого оптического сигнала $P_{\text{вх}}=7,88 \cdot 10^{-8}$ Вт и средней мощности фона $P_b=6,15 \cdot 10^{-8}$ Вт

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 4, показал, что значение пороговой мощности существенно зависит от чувствительности выбранного фотодиода к длине волны передающего устройства лазерного источника.

Результаты исследований путем моделирования процесса функционирования СПЛО с использованием разработанной модели позволили выявить факторы, снижающие эффективность работы системы, а также сформулировать основные требования к параметрам приемника обнаружения ЛИ, которые необходимо учитывать при создании и эксплуатации СПЛО.

Выводы

Проведенные исследования и разработки позволили сделать следующие основные выводы:

- на ослабление ЛИ в атмосфере оказывает существенное влияние изменение погодных условий, в том числе атмосферная турбулентность способствует расширению лазерного луча, возникновению колебаний его интенсивности и угла прихода к приемнику;
- неправильный (неоптимизированный) выбор параметров оптической системы (диаметра апертуры и фокусного расстояния) может привести к снижению уровня полезного сигнала и увеличению уровня фонового излучения;
- неправильный (неоптимизированный) выбор спектральной полосы пропускания оптических фильтров может также привести к увеличению уровня фонового излучения;
- несоответствие длины волны лазерного источника максимальной спектральной чувствительности фотоприемников может также привести к снижению уровня сигнала в приемном тракте;
- неправильный (неоптимизированный) выбор размера чувствительной области фотодиода может являться причиной увеличения уровня шума;
- неправильный (неоптимизированный) выбор полосы пропускания каскада усиления может являться причиной искажения результирующего сигнала или увеличения уровня шума.

С целью обеспечения увеличения дальности обнаружения создаваемые приемники ЛИ СПЛО должны удовлетворять следующим ключевым требованиям (рекомендациям):

- диаметр апертуры приемной оптической системы с целью поддержания требуемых максимальных значений мощности принимаемого лазерного сигнала должен быть как можно больше (ограничения размера должны определяться только ограничениями по весу и габаритам оптической системы, а также возможными ограничениями по ее стоимости);
- фокусное расстояние приемной линзы должно выбираться исходя из условия поддержания минимально возможного поля зрения, чтобы снизить уровень фонового излучения, максимизация фокусного рас-

- стояния может быть ограничена размерами оптической системы и необходимостью поддержания достаточной освещенности изображения и требуемого поля зрения (360° по азимуту) (в случае сужения поля зрения возникает необходимость увеличения числа датчиков в составе системы);
- для снижения уровня фонового излучения и увеличения дальности обнаружения спектральная полоса пропускания оптических фильтров должна быть как можно меньше, но с учетом ограничений по величине фрагментации заданного спектрального диапазона и с учетом температурной зависимости длины волны ЛИ;
 - спектральная чувствительность фотодиодов должна быть возможно максимальной на длинах волн, используемых источниками ЛИ;
 - в случае применения лавинных фотодиодов должно быть обеспечено регулирование напряжения смещением в зависимости от температуры и/или термостатирование;
 - размер чувствительной области фотодиода для снижения уровня шума должен быть минимизирован, но с учетом ограничений, определяемых размерами фокусного пятна, вызванных влиянием атмосферной турбулентности;
 - ширина полосы пропускания канала приемника должна быть согласована с шириной спектр лазерного сигнала или при отсутствии априорных данных о лазерном сигнале она должна быть сведена к минимуму с целью снижения уровня шума, что, однако, не должно приводить к искажению полезного сигнала;
 - параметры электронных элементов каскадных усилителей должны быть подобраны таким образом, чтобы поддерживать минимальный уровень шума;
 - коэффициент усиления усилительного каскада должен обеспечивать нормальную работу коллиматорной линзы при низких уровнях оптического сигнала;
 - уровень порогового значения запуска компаратора должен устанавливаться с учетом всех фактических шумов приемника обнаружения ЛИ и должен обеспечивать поддержание заданных значений вероятностей правильного обнаружения ЛИ и/или ложной тревоги.

Заключение

Таким образом в результате проведенных работ была разработана универсальная многопараметрическая имитационная модель приемника ЛИ СПЛО БПЛА, учитывающая все основные внешние и внутренние факторы, влияющие на дальность обнаружения ЛИ, позволяющая осуществлять компьютерное моделирование функционирования и оптимизацию параметрических характеристик приемника ЛИ с целью обеспечения регистрации ЛИ на максимально возможном от источника расстоянии.

Кроме этого, в результате проведенных исследований путем компьютерного моделирования были выявлены зависимости дальности обнаружения ла-

зерного источника от состояния атмосферы, от основных конструктивных параметров приемника ЛИ при различных погодных условиях, а также зависимости основных параметров мощностей воспринимаемых приемником сигналов с целью оценки его эксплуатационных возможностей.

Имитационная модель и выявленные параметрические взаимосвязи дальности обнаружения лазерного источника с вышеуказанными факторами являются принципиально новыми научными результатами в области изучения технологии обнаружения воздействия ЛИ на БПЛА и своевременного предупреждения о данном воздействии с целью принятия необходимых мер противодействия, повышения защищенности БПЛА в процессе выполнения им функциональных задач.

Все проведенные исследования и разработки носили целенаправленно прикладной характер. Практическая значимость результатов состоит в том, что разработанная модель может использоваться как при создании приемников ЛИ, так и в процессе их эксплуатации в составе аппаратуры бортового комплекса управления БПЛА для управления режимами функционирования приемника ЛИ в зависимости от изменений высоты полета БПЛА и состояния атмосферы. Выявленные в результате проведенных исследований параметрические закономерности позволили сформулировать практические рекомендации разработчикам приемников ЛИ в виде перечня требований, выполнение которых позволит максимизировать дальность обнаружения источника ЛИ, направленного на БПЛА.

В дальнейшем, на основе уже полученных результатов, автором планируется реализация работ по созданию приемника обнаружения ЛИ для БПЛА с управляемыми техническими характеристиками и возможностью их настройки в режиме real-time. Кроме этого, планируется проведение исследований по выявлению характера изменений ранее полученных результатов при значительных увеличениях мощности источника ЛИ и диапазонов высот полетов БПЛА.

Литература

1. Лямин Ю. Лазерные комплексы наземного базирования как средство противодействия БПЛА // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2021. № 5 (70). С. 40–45.
2. Лопин Г.А., Смирнов Г.И., Ткачев И.Н. Развитие средств борьбы с беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2023. № 1. С. 42–50.
3. Рябов К. Новые подходы к ПВО. Боевые лазеры против БПЛА // Военное обозрение. 2021. № 1 (9). С. 41–43.
4. Степанов А.В. Зарубежные комплексы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 3. С. 60–68.
5. Скиба В., Кузьмин А. Методы противодействия БПЛА // Арсенал Отечества. 2021. № 6(56).
6. Бойко А. Лазерные противодроновые системы. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников // RoboTrends. [Электронный ресурс]. – URL:

[https:// robotrends.ru/robopedia/lazernye-protivodronovye-sistemy](https://robotrends.ru/robopedia/lazernye-protivodronovye-sistemy) (дата обращения 15.03.2023).

7. Мобильные лазеры против роя «дронов». [Электронный ресурс]. – URL: <https://dzen.ru/a/YX1FHqriGmjGggi1> (дата обращения 17.03.2023).

8. Официальный сайт компании «Rafael Advanced Defense Systems». [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rafael.co.il/> (дата обращения 25.03.2023).

9. Официальный сайт компании “Lockheed Martin Corporation». [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lockheedmartin.com/> (дата обращения 27.03.2023).

10. Савченко Э.И., Сорокин Ю.В., Федяков В.Ю. Способ лазерного поражения БПЛА системой // Патент на изобретение RU 2 790 364 С1, опублик. 17.02.2023, бюл. № 5.

11. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 204 с.

12. Козирацкий Ю.Л., Луценко А.Д., Глушков А.Н. Методический подход к определению рационального типажа лазерных средств оптико-электронного подавления // Вооружение и экономика. 2012. № 5 (21). С. 42–46.

13. Глушков А.Н., Марченко А.В., Кулешов П.Е., Дробышевский Н.В. Модель оптико-электронного средства как объекта защиты от воздействия лазерного излучения // Радиотехника. Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн. 2018. № 34(222). С. 34–38.

14. Глушков А.Н., Марченко А.В. Модель процесса защиты оптико-электронных средств тактических беспилотных летательных аппаратов от лазерных средств противника // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». 2019. № 4(23).

15. Козирацкий Ю.Л., Хильченко Р.Г., Шутько Е.М. Вероятностная модель защиты летательного аппарата от управляемых ракет на основе пространственных образований из микростеклосфер // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIX Международной научно-методической конференции (Воронеж, 14–15 февраля 2019 г.). – Воронеж: ВГУ, 2019. – С. 379–385.

16. Кулешов П.Е., Попело В.Д. Многослойная прозрачная сфера с концентрической структурой слоев как детальная ложная оптическая цель для импульсных лазерных локаторов обнаружения оптико-электронных средств // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 135–148. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-135-148

17. Yun Q., Song B., Pei Y. Modeling the Impact of High Energy Laser Weapon on the Mission Effectiveness of Unmanned Combat Aerial Vehicles // Access Institute of Electrical and Electronics Engineers (Access IEEE). 2020. Vol. 8. P. 32246–32257. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973492

18. Плюсин Н.И., Ляскин А.С., Зайцев И.А., Блинкова Е.В. Атмосферные факторы и моделирование распространения лазерного излучения в атмосфере // Военное обозрение. 2021. № 2 (10). С. 68–76.

19. Пирогов Н.А., Башкин А.С., Безноздрев В.Н. Об эффективности прохождения излучения различных лазеров через приземную турбулентную атмосферу // Квантовая электроника. 2003. № 1 (33). С. 31–36
20. Гуменюк Г.А., Евдокимов В.И., Ребриков В.Д. Приборы предупреждения о лазерном облучении в системах защиты танков от управляемого оружия // Защита и безопасность. 2002. № 1 (20). С. 26–27.
21. Утемов С.В., Смагин Т.Ю. Зарубежные приемные системы предупреждения о лазерном облучении объекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. № 11 (5). С. 91–98.
22. Официальный сайт АО «Феодосийский Оптический Завод». [Электронный ресурс]. – URL: <http://aofoz.ru/> (дата обращения 25.03.2023).
23. Васильченко И.И., Глебов В.В., Роленко С.А., Кислов В.В., Прохоров Н.А. О возможности создания индикаторов лазерного излучения с качественно новыми характеристиками // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2013. № 1 (60). С. 15–22.
24. Ольгин С. Бортовая авиационная система оптоэлектронного противодействия Nemesis // Зарубежное военное обозрение. 2003. № 5. С. 40.
25. Harris W. How the Guardian Anti-missile System Works // Официальный веб-сайт «HowStuffWorks». [Электронный ресурс]. – URL: <https://science.howstuffworks.com/guardian.htm> (дата обращения 22.05.2023).
26. Официальный сайт компании «BAE Systems». [Электронный ресурс]. – URL: www.baesystems.com (дата обращения 16.03.2023).
27. Официальный сайт компании «Controls Adsys, Inc.». [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.adsyscontrols.com/> (дата обращения 11.04.2023).
28. Официальный сайт ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем». [Электронный ресурс]. – URL: <https://gosniipp.ru/ru/news/armiya-i-oruzhie/20220317/bortovoi-kompleks-oboroni-1-370-vitebsk-v> (дата обращения 11.04.2023).
29. Официальный сайт компании АО «Научно-технический центр ЭЛИНС». [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elins.ru/> (дата обращения 08.04.2023).
30. Иванов В.Г., Каменев А.А., Поспелов Г.В., Савин С.В. Оптико-электронная система для определения спектроэнергетических параметров и координат источника лазерного излучения системой // Патент на изобретение RU 2 616 875 С2, опубл. 18.04.2017, бюл. № 11.
31. Детектор лазерного излучения «Паук» // Оружейный журнал «Калашников». 2023. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kalashnikov.ru/detektor-lazernogo-izlucheniya-pauk-zasvetilsya-na-ukraine/detektor-lazernogo-izlucheniya-pauk/?ysclid=lnj49l12z423608669> (дата обращения 11.04.2023).
32. Детектор лазерного излучения «Филин» // Интернет-журнал «Лазерный мир». 2023. [Электронный ресурс]. – URL: <https://лазер.рф/2023/03/28/25300/> (дата обращения 21.04.2023).
33. Kneizys F.X., SHETTLE E.P. User guide to LOWTRAN VII. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/235203858> (дата обращения 15.03.2023).

34. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.

References

1. Lyamin Yu. Ground-based laser complexes as a means of countering UAVs. *New Defense Order. Strategies*, 2021, no. 5(70), pp. 40–45 (in Russian).
2. Lopin G.A., Smirnov G.I., Tkachev I.N. Development of means of combatting unmanned aerial vehicles. *Military thought*, 2023, no. 1, pp. 42–50 (in Russian).
3. Ryabov K. New approaches to air defense. Combat lasers against UAVs. *Military review*, 2021, no. 1(9), pp. 41–43 (in Russian).
4. Stepanov A.V. Foreign complexes and means of countering unmanned aerial vehicles. *Foreign military review*, 2021, no. 3, pp. 60–68 (in Russian).
5. Skiba V., Kuzmin A. Methods of countering UAVs. *Arsenal of Fatherhood*, 2021, no. 6(56) (in Russian).
6. Boyko A. Laser antidron systems. Systems for detecting and neutralizing drones. *RoboTrends*. Available at: URL: [https:// robotrends.ru/robopedia/lazernye-protivodronovye-sistemy](https://robotrends.ru/robopedia/lazernye-protivodronovye-sistemy) (accessed 15 March 2023) (in Russian).
7. Mobile lasers against a swarm of «drones». Available at: URL: <https://dzen.ru/a/YX1FHqriGmjGggi1> (accessed 17 March 2023) (in Russian).
8. Official website of the company «Rafael Advanced Defense Systems». Available at: URL: <https://www.rafael.co.il/> (accessed 25 March 2023).
9. Official website of Lockheed Martin Corporation. Available at: URL: <https://www.lockheedmartin.com/> (accessed 27 March 2023).
10. Savchenko E.I., Sorokin Yu.V., Fedyakov V.Yu. *Method of laser firing of UAV system*. Patent for invention no. RU 2 790 364 C1. 2023 (in Russian).
11. Makarenko S.I. *Counteraction to unmanned aerial vehicles. Monography*. St. Petersburg, Science-intensive technologies, 2020. 204 p. (in Russian).
12. Koziratsky Yu.L., Lutsenko A.D., Glushkov A.N. Methodological approach to determining the rational type of laser means of optoelectronic suppression. *Armament and economy*, 2012, no. 5 (21), pp. 42–46 (in Russian).
13. Glushkov A.N., Marchenko A.V., Kuleshov P.E., Drobyshevsky N.V. Model of optoelectronic means as an object of protection from the effects of laser radiation. *Radio Engineering. Information conflict in the spectrum of electromagnetic waves*, 2018, no. 34(222), pp. 34–38 (in Russian).
14. Glushkov A.N., Marchenko A.V. Model of the process of protecting optoelectronic means of tactical unmanned aerial vehicles from enemy laser means. *International information and analytical journal «Crede Experto: transport, society, education, language»*, 2019, no. 4(23) (in Russian).
15. Koziratsky Yu.L., Khilchenko R.G., Shutko E.M. Probabilistic model of aircraft protection from guided missiles based on spatial formations from microscopical spheres. *Informatics: problems, methodology, technologies: materials of the XIX International Scientific and Methodological Conference*. Voronezh, February 14–15 2019. Voronezh, MSU, 2019, pp. 379–385 (in Russian).
16. Kuleshov P.E., Popelo V.D. A multilayer transparent sphere with a concentric structure of layers as a detailed false optical target for pulsed laser locators

for detecting optoelectronic means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 135–148. doi: 10.24412/2410-9916-2022-2-135-148 (in Russian).

17. Yun Q., Song B., Pei Y. Modeling the Impact of High Energy Laser Weapon on the Mission Effectiveness of Unmanned Combat Aerial Vehicles. *Access Institute of Electrical and Electronics Engineers (Access IEEE)*, 2020, vol. 8, pp. 32246 – 32257. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2973492.

18. Plyusnin N.I., Lyaskin A.S., Zaitsev I.A., Blinkova E.V. Atmospheric factors and modeling of laser radiation propagation in the atmosphere. *Military Review*, 2021, no. 2 (10), pp. 68–76 (in Russian).

19. Pirogov N.A., Bashkin A.S., Beznodrev V.N. On the efficiency of the passage of radiation from various lasers through a surface turbulent atmosphere. *Quantum Electronics*, 2003, no.1 (33), pp. 31–36. Available at: URL: <https://www.mathnet.ru/links/086dea4639bbc3ecf61fd1f786bb4a78/qe2361.pdf> (accessed 25 February 2023) (in Russian).

20. Gumenyuk G.A., Evdokimov V.I., Rebrikov V.D. Warning devices about laser irradiation in tank protection systems from guided weapons. *Protection and safety*, 2002, no. 1 (20), pp. 26–27 (in Russian).

21. Utemov S.V., Smagin T.Yu. Foreign receiving systems for warning about laser irradiation of an object. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2009, no. 11 (5), pp. 91–98 (in Russian).

22. Official website of the company «Feodosia Optical Plant». Available at: URL: <http://aofoz.ru/> (accessed 25 March 2023)

23. Vasilchenko I.I., Glebov V.V., Rolenko S.A., Kislov V.V., Prokhorov N.A. On the possibility of creating laser radiation indicators with qualitatively new characteristics. *Radioelectronic and computer systems*, 2013, no. 1 (60), pp. 15–22 (in Russian).

24. Holgin S. On-board aviation system of optoelectronic counteraction Nemesis. *Foreign Military Review*, 2003, no. 5, p. 40 (in Russian).

25. Harris W. How the Guardian Anti-missile System Works. *Official website of «HowStuffWorks»*. Available at: URL: <https://science.howstuffworks.com/guardian.htm> (accessed 22 May 2023).

26. The official website company «BAE Systems». Available at: URL: www.baesystems.com (accessed 16 March 2023).

27. Official website company «Adsys Controls Inc.». Available at: URL: <https://www.adsyscontrols.com> (accessed 11 April 2023).

28. Official website company «State Research Institute of Applied Problems». Available at: URL: <https://gosniipp.ru/ru/news/armiya-i-oruzhie/20220317/bortovoi-kompleks-oboroni-l-370-vitebsk-v> (accessed 11 April 2023).

29. Official website JSC «Scientific and Technical Center ELINS». Available at: URL: <http://www.elins.ru/> (accessed 08 April 2023).

30. Ivanov V.G., Kamenev A.A., Pospelov G.V., Savin S.V. *Optoelectronic system for determination of spectroenergetic parameters and coordinates of a laser radiation source by the system*. Patent for invention no. RU 2 616 875 C2. 2017. (in Russian).

31. Laser radiation detector «Spider». *Gun magazine «Kalashnikov»*, 2023. Available at: URL: <https://www.kalashnikov.ru/detektor-lazernogo-izlucheniya-pauk-zasvetilsya-na-ukraine/detektor-lazernogo-izlucheniya-pauk/?ysclid=lnj49112z423608669> (accessed 11 April 2023) (in Russian)

32. Laser radiation detector «Filin» // *Internet-magazine «Laser World»*, 2023. Available at: URL: <https://лазер.пф/2023/03/28/25300/> (accessed 21 April 2023) (in Russian)

33. Kneizys F.X., SHETTLE E.P. User guide to LOWTRAN 7. Available at: URL: <https://www.researchgate.net/publication/235203858> (дата обращения 15 March 2023).

34. Tatarsky V.I. Propagation of waves in a turbulent atmosphere. Moscow, Publ. «Science», 1967. 548 p. (in Russian).

Статья поступила 14 сентября 2023 г.

Информация об авторе

Куркова Ольга Петровна – доктор технических наук. Профессор кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов: системный анализ и моделирование сложных технических систем и процессов. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Адрес: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67А.

Simulation model of the receiver of the detection and warning system for laser irradiation of unmanned aerial vehicles

O. P. Kurkova

Problem statement: *The development and implementation of various means of countering unmanned aerial vehicles carrying out unauthorized actions in critical areas, including means that use laser radiation, necessitates the parallel development of on-board systems for detecting and warning of laser irradiation in order to increase the security of unmanned aerial vehicles. The effectiveness of laser radiation detection and warning systems is assessed based on the ability to ensure registration of laser radiation at the maximum possible distance from the source. The key element of a laser detection system is the laser receiver. The task of increasing the detection range of laser radiation by a receiver is a complex multifactorial task that can be solved by developing a comprehensive simulation model of the operation of the receiver to optimize its design parameters and operating modes, taking into account all the main external and internal factors that are interrelated and affect the detection range of laser radiation. The purpose of the work was to create a simulation model of a laser radiation receiver to optimize its design parameters through virtual modeling in order to increase the efficiency of detection and warning systems for laser irradiation of unmanned aerial vehicles. Methods: computer simulation methods using the MATLAB software package, including MATLAB Simulink, and atmospheric computer code LOWTRAN VII were used to solve the tasks. Novelty of the result lies in the creation of a universal multi-parameter simulation model of the functioning of a laser radiation receiver, as well as a set of dependences of the detection range of a laser source identified by computer modeling on its basis on the main design parameters of the receiver, atmospheric conditions changing due to changes in the flight altitude of an unmanned aerial vehicle and weather conditions. parameters of the laser radiation source. Result: for the first time, a simulation model of the functioning of a laser radiation receiver has been created for detection and warning systems of laser irradiation of unmanned aerial vehicles, which allows, through virtual modeling, to optimize its design parameters at the development stage*

*in order to ensure registration of laser radiation at the maximum possible distance from the source, to predict the functionality of the receiver depending on the changing operating conditions of unmanned aerial vehicles and the parameters of the laser radiation source. The simulation carried out using the developed model made it possible to identify factors that negatively affect the functionality of the receiver, to formulate requirements for the design of a laser radiation receiver, allowing for the registration of laser radiation by the receiver at the maximum possible distance from the source. **Practical significance:** the developed simulation model can be used as a developer tool when creating laser radiation receivers, as well as a basis for developing a software module for controlling the laser radiation detection process as part of the on-board equipment of a laser radiation detection and warning system during the operation of unmanned aerial vehicles.*

Keywords: *simulation model, laser radiation, laser radiation source, unmanned aerial vehicle, receiver of the laser radiation detection system, threshold power, detection range, optical system, lens, focal length, photodiode, spectral sensitivity, atmosphere, transmittance, external and internal noise.*

Information about Author

Olga Petrovna Kurkova – holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Facilities. St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Fields of research: system analysis and modeling of complex technical systems and processes. E-mail: aljaskaolga@mail.ru

Address: Russia, 190000, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67, letter A.