

Аннотация работы

Выпускная квалификационная работа посвящена анализу и сравнительной оценке современных методов беспроводной передачи энергии для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В работе рассмотрены основные физические принципы и технические решения, лежащие в основе электромагнитной индукции, микроволновой и оптоволоконной передачи, а также лазерных технологий. Проведен детальный обзор преимуществ и ограничений каждого метода с точки зрения дальности передачи, эффективности, безопасности и применимости в условиях современных боевых действий. Особое внимание уделено вопросам повышения автономности БПЛА за счет перехода от традиционных аккумуляторных систем к дистанционному питанию, что позволяет снизить массу аппарата и расширить его функциональные возможности. В работе проанализированы перспективы интеграции инновационных энергетических решений в конструкции беспилотников, а также приведены рекомендации по выбору оптимальных технологий в зависимости от конкретных эксплуатационных задач. Полученные результаты подтверждают высокую актуальность дальнейших исследований в области беспроводной передачи энергии и демонстрируют потенциал внедрения таких систем для повышения эффективности и боевой готовности современных БПЛА.

Оглавление

Определения, обозначения и сокращения	4
Введение	5
Обзор методов передачи энергии	7
Электромагнитная индукция	8
Микроволновое излучение	10
Оптоволоконная передача энергии	13
Лазерный метод	15
Глава 1. Анализ ключевых параметров передачи энергии	21
1.1. Влияние атмосферных условий на эффективность передачи	22
1.1.1. Типы взаимодействия света и среды	22
1.1.2. Моделирование атмосферы и выбор длины волны	25
1.2. Отклонение луча от нормали к площади фотоприемника	31
1.3. Отклонение луча от геометрического центра матрицы фотоприемников	33
1.4. Вывод по главе	38
Глава 2. Выбор фотопринимающего устройства для БПЛА	39
2.1. Обзор видов фотопринимающих устройств	39
2.2. Обзор материалов выполнения фотоприемников	45
2.3. Вывод функции площади матрицы	49
2.4. Выводы по главе	50
Глава 3. Моделирование Парето-фронта оптимальных параметров	51
3.1. Обзор методов оптимизации	51
3.2. Описание алгоритма многокритериальной оптимизации	54
3.3. Анализ полученных результатов	59
3.4. Вывод по главе	69

Заключение	71
Список использованных источников	73
Приложение А	77

Определения, обозначения и сокращения

В настоящем отчет о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

- ИК – инфракрасный, излучение с длиной волны от 0,74 мкм до 2000 мкм
- БПЛА – беспилотный летательный аппарат
- АКБ – аккумуляторная батарея
- КПД – коэффициент полезного действия
- ГА – генетический алгоритм
- ПО – программное обеспечение
- Efr – error function, функция ошибок
- ТТХ – тактико-технические характеристики
- СВЧ – сверхвысокие частоты
- RFID – radio frequency identification (радиочастотная идентификация)
- МВт – мегаватт
- ВЧ – высокие частоты
- ЭМП – электромагнитное поле
- ЛЭП – линия электропередачи
- ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура
- УМ – усилитель мощности
- ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема
- МПС – микропроцессорная система
- ГТД – газотурбинный двигатель
- СУ – система управления
- ДПЛА – дистанционно пилотируемый летательный аппарат
- РЛС – радиолокационная станция

Введение

Ещё несколько лет назад современное представление о боевых действиях базировалось, в первую очередь, на концепции противостояния снаряда и брони. Основной акцент делался на совершенствование традиционных видов вооружения: танков, боевой авиации, артиллерии, средств противовоздушной обороны и прочего высокотехнологичного вооружения. Десятилетиями учёные и инженеры вкладывали значительные ресурсы в разработку всё более сложных, наукоемких и дорогостоящих технологий, направленных на повышение огневой мощи, мобильности и живучести боевых систем. Однако технологический прогресс начала XXI века внес существенные корректиры в принципы ведения боевых действий. Особо это проявилось в вооружённом конфликте на Украине, где получили широкое распространение принципиально новые боевые единицы — сверхмалые беспилотные летательные аппараты, более известные как дроны.

Эти устройства, несмотря на свою простоту и крайне низкую стоимость по сравнению с традиционным вооружением, продемонстрировали высокую эффективность в современных боевых условиях. Современные дроны способны выполнять широкий спектр задач: вести тактическую разведку, осуществлять целеуказание, нарушать логистические цепочки противника а также наносить точечные удары по бронетехнике и живой силе. Особенно важно отметить, что экономическая эффективность дронов зачастую превышает все ожидания: аппарат стоимостью нескольких сотен долларов может уничтожить цель стоимостью в десятки или даже сотни тысяч. Таким образом, дрон многократно окупает себя уже при первом успешном применении.

Конструктивно военный дрон включает в себя несколько ключевых компонентов: лёгкий корпус, воздушные винты, оптические системы, контроллер, аккумуляторную батарею и, при необходимости, боевую часть. Наиболее тяжелым элементом конструкции, как правило, выступает аккумулятор, масса которого может достигать до половины от общего веса аппарата, что в свою очередь существенно ограничивает дальность полёта, продолжительность нахождения в воздухе и массу полезной нагрузки. Кроме

того, литий-ионные аккумуляторы уязвимы к перегреву и влаге, а также имеют ограниченное количество циклов заряда.

В таких условиях всё более актуальной становится идея отказа от хранения энергии на борту в пользу её удалённой передаче.

Передача энергии на расстояние представляет собой одну из наиболее перспективных технологий БПЛА. Существует несколько основных методов передачи: электромагнитная индукция, оптоволоконные каналы и лазерные системы. Особое внимание уделяется лазерной передаче энергии в инфракрасном спектре. Такая система предполагает установку наземного источника, генерирующего лазерный луч, который фокусируется на приёмном элементе дрона. Благодаря относительно низкий угловой расходимости лазера обеспечивается высокая плотность потока энергии и минимизация потерь при передаче на расстояние. В результате появляется возможность исключить аккумулятор или значительно уменьшить его объём, перераспределив массу в пользу боевой части или улучшенной оптики.

Дистанционная передача энергии имеет ряд преимуществ: снижение массы аппарата, значительное увеличение времени полёта, а также повышение ресурса эксплуатации. Таким образом, переход от концепции хранения энергии к её беспроводной передаче открывает новые горизонты в развитии беспилотных систем.

Обзор методов передачи энергии

Исходя из описанных выше проблем и перспектив, становится очевидным, что совершенствование методов передачи энергии может сыграть решающую роль в дальнейшем развитии технологий беспилотных систем. Наблюдая за ограничениями и проблемами традиционных систем аккумулирования энергии и учитывая текущие решения по использованию дистанционных станций питания, заметна необходимость детального рассмотрения современных подходов к передаче энергии. Эти подходы, основывающиеся на разнообразных физических принципах, обладают потенциалом не только нивелировать недостатки существующих решений, но и открыть новые возможности для обеспечения эффективного и стабильного энергоснабжения в сложных условиях боевых действий.

Многообразие технологий — от электромагнитной индукции и СВЧ-волн до оптоволоконной передачи и лазерного излучения — позволяет подобрать оптимальное решение с учетом конкретных эксплуатационных требований. Такое разнообразие стимулирует глубокий анализ преимуществ и недостатков каждого метода, что является необходимым этапом для создания эффективной и надежной системы дистанционного питания для БПЛА. В следующем разделе будет представлен подробный обзор систем передачи энергии, в котором будут раскрыты основные физические принципы, технические характеристики и перспективы интеграции этих технологий в современные беспилотные аппараты.

Электромагнитная индукция

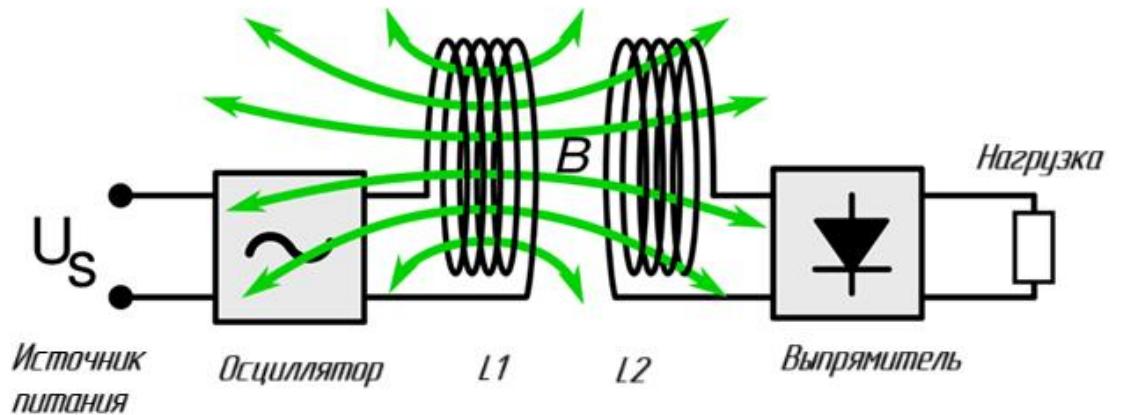


Рисунок 1 – Схема передачи энергии посредством воздействия
электромагнитной индукции

Этот метод основан на явлении электромагнитного поля. Для передачи беспроводной энергии используется трансформатор, Устройство, состоящее из двух, проводящих электрический ток, катушек и сердечника. Благодаря явлению электромагнитной индукции, на принимающей катушке трансформатора создается наведенный ток с передающей катушки. Для уменьшения потерь энергии необходимо, чтобы катушки находились рядом, а также чтобы обе были связаны магнитопроводом. В такой конфигурации эффективность передачи энергии становится максимально возможной. Основной теоретической базой, описывающей данный метод передачи энергии, является закон Фарадея об электромагнитной индукции, который гласит, что изменение магнитного потока через замкнутый контур индуцирует в нем электродвижущую силу.

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

, где \mathbf{E} – напряженность электрического поля, \mathbf{B} – магнитная индукция, t – время.

В интегральной для замкнутого контура выражение будет иметь вид

$$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} dl = - \frac{d}{dt} \int_{\Sigma} \mathbf{B} dS$$

, где Σ – поверхность, ограниченная контуром $\partial\Sigma$, dS – элемент площади поверхности.

Для классической системы, состоящей из двух катушек, магнитный поток через приёмную катушку связан с током в передающей катушке через взаимную индуктивность:

$$\Phi_2 = MI_1$$

Индукционная ЭДС во вторичной катушке будет иметь вид:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt}$$

В данном случае переменный ток, проходящий через передающую катушку, создает переменное магнитное поле, которое, проникая в приемную катушку, наводит в ней ток. Это позволяет преобразовывать электрическую энергию одного устройства в магнитное поле, а затем – обратно в электрическую энергию другого устройства.

Для обеспечения эффективной передачи энергии очень важно максимизировать коэффициент взаимной индукции между катушками. Этот коэффициент зависит от расстояния между катушками, их геометрического расположения в пространстве друг относительно друга, числа витков, диаметра проводников и использования сердечников из специальной магнитопроводящей стали или иного материала, способного выступать в роли магнитопровода. Чем выше степень магнитного сцепления между передающей и приемной катушками, тем эффективнее происходит передача энергии, а потери снижаются.

Кроме того, значительное влияние на эффективность оказывает рабочая частота переменного тока. При настройке обеих катушек на одну и ту же резонансную частоту наблюдается резонансный эффект, который приводит к увеличению амплитуды переменных электрического и магнитного полей в системе. Эта настройка в значительной степени улучшает взаимную индукцию между катушками и, как следствие, повышает энергоэффективность передачи энергии, не изменяя при этом длину волны электромагнитного поля. Такой подход позволяет улучшить параметры системы без необходимости уменьшать расстояние между компонентами.

Использование резонанса колебательного контура несколько увеличивает дальность передачи. При резонансной индукции передатчик и приёмник настроены на одну частоту. Производительность может быть улучшена ещё больше путём изменения формы волны управляющего тока от синусоидальных до несинусоидальных переходных формы волны. Импульсная передача энергии происходит в течение нескольких циклов. Таким образом, значительная мощность может быть передана между двумя взаимно настроенными LC-цепями с относительно невысоким коэффициентом связи. Передающая и приёмная катушки, как правило, представляют собой однослойные соленоиды или плоскую спираль с набором конденсаторов, которые позволяют настроить принимающий элемент на частоту передатчика.

Классическим применением резонансной электромагнитной индукции является зарядка аккумуляторных батарей портативных устройств, например таких, как ноутбуки и сотовые телефоны, медицинские имплантаты и электромобили. Техника локализованной зарядки использует выбор соответствующей передающей катушки в структуре массива многослойных обмоток. Резонанс используется как в системе беспроводной зарядки (передающем контуре), так и в модуле приёмника для обеспечения максимальной эффективности передачи энергии. Такая техника передачи подходит универсальным беспроводным зарядным панелям для подзарядки портативной электроники, такой, например, как мобильные телефоны. Техника принята в качестве части стандарта беспроводной зарядки Qi.

Микроволновое излучение

Метод микроволнового излучения, по сравнению с методом электромагнитной индукции, позволяет в значительно количество раз увеличить расстояние, на которое будет возможно передать энергию. Электромагнитные волны СВЧ-диапазона с длиной волны 12 см, что соответствует частоте 2,45 ГГц, способны проходить через земную атмосферу практически без потерь. Для использования данного метода необходимы два устройства: Первое, магнетрон или по-другому генератор микроволнового

излучения, позволяющий преобразовать электрический ток в микроволновое излучение. Второе, приемная антенна, способная воспринимать микроволновое излучение. В 1976 году Вильям Броун испытал устройство, способное преобразовывать микроволны в электрический ток. Данное устройство получило название ректенна. Она состоит из полуволновых диполей, каждый из которых нагружен на высокоэффективные диоды Шоттки.

Ректенны имеют малые размеры, но при этом высокий КПД около 85 %, однако их нагрузочная способность весьма мала и составляет единицы и доли единиц ватт. Поэтому для передачи больших мощностей из ректенн собирают большие приемные панели, рассчитанные на передачу определенной мощности. Именно с именем Вильяма Броуна и его изобретением связана самая успешная беспроводная передача энергии. В 1976 г. ему удалось передать СВЧ-пучком 30 кВт непрерывной мощности на расстояние 1,6 км с КПД, составляющим 82 %. Тем не менее, при небольших перегрузках полупроводниковые диполи сгорают, при перегрузке на одном из полупроводников выходит из строя целая приемная панель, что в значительной степени понижает надежность устройства, делая его непредназначенным для промышленного использования.

Ненадежность и дороговизна стали основными факторами, которые не позволили найти применения данному методу вне лабораторных испытаний. В Советском Союзе, такая антенна была названа «циклотронный преобразователь энергии». На рисунке 2 представлен циклотронный преобразователь энергии по наработкам советских ученых.

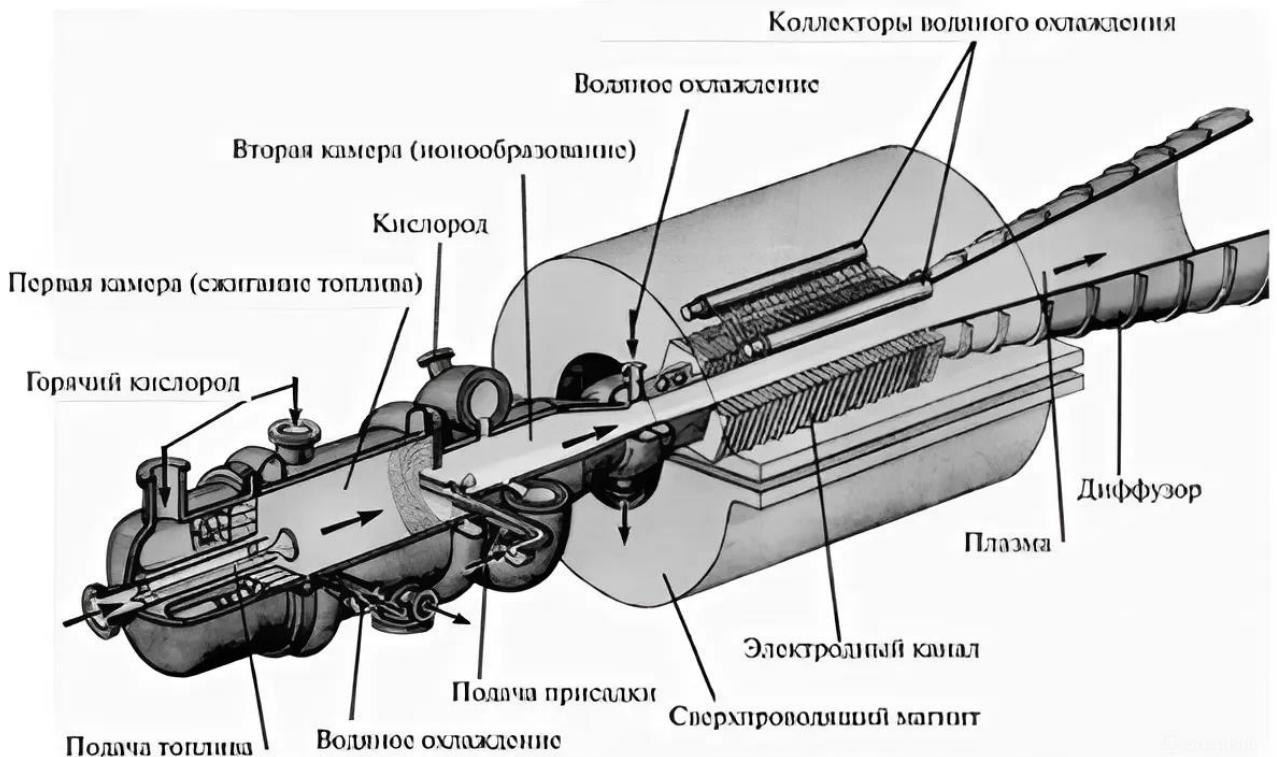


Рисунок 2 – Циклотронный преобразователь

Принцип действия циклотронного преобразователя основан на возбуждении быстрой циклотронной волны электронного потока за счет подводимой СВЧ-энергии и последующем преобразовании этой энергии в энергию движения электронов. В его основе лежит ламповая технология, что делает преобразователь в значительной степени габаритным. Циклотронный преобразователь имеет КПД преобразования до 80 % при уровне подводимой СВЧ-мощности порядка 10 кВт, при этом допустимы значительные колебания уровня подводимой СВЧ мощности, что позволяет преобразователю легко переносить перегрузки. Из дополнительных преимуществ можно отметить, что он не имеет проблем переизлучения и дешевле американского аналога.

Сложностью в создании энергетического микроволнового луча является то, что для использования его в промышленности, необходима диафрагма большого размера. Например, согласно исследованию NASA 1978 года, для микроволнового луча частотой 2,45 ГГц понадобится передающая антенна диаметром в 1 км, а приемной ректенны диаметром в 10 км. Эти размеры могут быть снижены путём использования более коротких длин волн, тем не менее

короткие волны намного сильнее поглощаются атмосферой, а также блокируются дождём или каплями воды. Из-за так называемого «проклятия узкого пучка» невозможно сузить луч, объединяя пучки от нескольких меньших излучателей без пропорциональной потери в мощности. Для применения на земле антенна диаметром 10 км позволит достичь значительного уровня мощности при сохранении низкой плотности пучка, что важно по соображениям безопасности для человека и окружающей среды. Безопасный для человека уровень плотности мощности составляет $1 \text{ мВт}/\text{см}^2$, что на площади круга диаметром 10 км соответствует мощности в 750 МВт. Этот уровень соответствует мощности современных электростанций.

Оптоволоконная передача энергии

Передача энергии по оптическому волокну – это довольно новый способ питания различных потребителей электрической энергии с определенными требованиями к их эксплуатации. Технология оптической передачи энергии в сравнении с медной проводкой имеет ряд неоспоримых преимуществ. Во-первых, это энергопассивность и пожаробезопасность, то есть отсутствие причин возникновения электрических искр, во-вторых, предотвращение электромагнитных помех и отсутствие гальванических развязок, в-третьих, возможность использования в условиях, где необходимо соблюдать высокие требования к изоляции. В конечном счете это замена медных кабелей на легкие волоконно-оптические линии, что даст эффект в сокращении металлоемкости в различных проводящих и контрольно-измерительных цепях. Новизна данной технологии заключается в организации нового подхода построения системы электропитания потребителей, которая повышает уровень пожаробезопасности и электромагнитной совместимости за счет использования оптического волокна и его энергопассивности. В данном случае используется идея передачи энергии по оптическому волокну в виде световой волны. Также немаловажным преимуществом является возможность обеспечения резервирования энергетических каналов и повышение живучести какого-либо объекта, снижение

стоимости за счет сокращения металлоемкости коммуникаций и повышение эффективности их работы.

Основное звено всей системы передачи энергии по оптическому волокну заключается в эффективном преобразовании электрической энергии в оптическую и обратно. На стороне передатчика это обычно достигается с помощью лазерного источника, характеризующегося высокой коэффициентом преобразования (η_1). При этом важно обеспечить максимальное совпадение параметров лазерного излучения (например, длины волны, когерентности, стезеобразности) с оптическими характеристиками используемого волокна. На приемном конце критичным является выбор и разработка фотоэлектрических преобразователей, например, фотодиодов или солнечных элементов, оптимизированных для работы на используемой волновой длине. Здесь эффективность преобразования (η_2) напрямую влияет на конечную производительность системы.

- Ограниченная эффективность преобразования:
Системы оптоволоконной передачи энергии требуют двух этапов преобразования: преобразования электрической энергии в оптическую (с помощью лазерного источника) и обратного преобразования оптической энергии в электрическую (с помощью фотоэлектрического преобразователя). На каждом из этих этапов происходят потери, что снижает общую энергоэффективность системы по сравнению с прямыми методами передачи.
- Ограничения по мощности:
Оптоволоконные линии обладают определённой пропускной способностью. При передаче высоких мощностей могут возникать проблемы, связанные с перегревом волокна, нелинейными эффектами и даже повреждением материала. Это ограничивает применение технологии в случаях, где требуется передача больших энергетических потоков.
- Чувствительность к механическим воздействиям:
Несмотря на преимущества в плане легкости и пожаробезопасности, оптоволоконные кабели достаточно хрупкие. Изгибы, вибрации или

механические повреждения могут привести к увеличению потерь сигнала или поломке волокна, что требует разработки специальных защитных мер и повышает требования к качеству установки и эксплуатации.

- Сложность технологической реализации и высокая стоимость: Использование высокоточных лазерных источников, специализированных фотоэлектрических преобразователей и систем контроля сопряжения параметров источника, волокна и приёмника делает систему оптоволоконной передачи энергии технологически сложной и дорогостоящей. Высокая стоимость компонентов и необходимость точной настройки всей системы ограничивают её широкое применение, особенно в условиях, где требуется экономическая эффективность.
- Потери на длинных расстояниях: Хотя современные оптоволокна характеризуются низким коэффициентом затухания на определённых длинах волн, все же при передаче энергии на большие расстояния возникают потери за счёт рассеяния и поглощения. Для компенсации этих потерь могут потребоваться промежуточные усилители или ретрансляторы, что дополнительно усложняет конструкцию системы.

Лазерный метод

Энергию можно передать путём её преобразования в луч лазера, который затем может быть направлен на фотоэлемент приёмника. Вплоть до недавнего времени передача энергии с помощью лазеров не имела большого смысла: их КПД составлял всего 10–20 %. С учетом потерь на передачу и преобразование световой энергии в электричество получателя достигало, в лучшем случае, нескольких процентов исходной мощности. Только в 2000-х годах ситуация начала меняться: появились инфракрасные лазеры с КПД до 40–50 % и высокоэффективные фотоэлектрические модули на основе арсенида галлия, способные преобразовывать в электричество до 40 %, а иногда – и до 70 % энергии излучения. Благодаря этому способу мы можем передать энергию на большие расстояния.

Лазерная передача энергии по сравнению с другими методами беспроводной передачи обладает рядом преимуществ:

- передача энергии на большие расстояния (за счёт малой величины угла расходимости между узкими пучками монохроматической световой волны);
- удобство применения для небольших изделий (благодаря небольшим размерам твердотельного лазера — фотоэлектрического полупроводникового диода);
- отсутствие радиочастотных помех для существующих средств связи, таких, как Wi-Fi и сотовые телефоны (лазер не создаёт таких помех);
- возможность контроля доступа (получить электроэнергию могут только приёмники, освещённые лазерным лучом).

Самый существенный из недостатков – атмосфера Земли, так как она поглощает большую часть энергии, переданной от лазера. Энергией с орбиты можно было бы снабжать всю Землю.

Помимо этого, у данного метода есть и ряд других недостатков:

- Преобразование низкочастотного электромагнитного излучения в высокочастотное, которым является свет, неэффективно. Преобразование света обратно в электричество также неэффективно, так как КПД фотоэлементов достигает 40–50 %, хотя эффективность преобразования монохроматического света значительно выше, чем эффективность солнечных панелей;
- Необходимость прямой видимости между передатчиком и приёмником (как и при микроволновой передаче).
- Потенциальная опасность для живых организмов в случае отклонения передающего луча

Такие компании как NASA, EADS, Lasermotive занимаются такими технологиями уже с 2003 г. Ученые из Японии добились успеха в преобразовании солнечного света в лазерное излучение с КПД 42 %, но эффективные передатчики и приемники не могут совместно применяться, потому что работают в разных спектральных диапазонах. Вторая важная

проблема – невозможность использовать передачу в пасмурную погоду. Если решить эти проблемы, то эту технологию для космической энергетики ждут большие перспективы.

Для наибольшей наглядности представлена сравнительная таблица по основным и наиболее важным критериям каждого из методов передачи энергии.

Таблица 1 – Сравнение методов передачи энергии

Характеристика	Электромагнитная индукция	Микроволновое излучение	Оптоволоконная передача	Лазерный метод
Дальность передачи	0,01–0,2 м	До 1,6 км	Ограничена длиной волокна	Неограниченное расстояние
КПД	80-95%	80%	30%	60%
Мощность передачи	До 50 Вт	Около 30 кВт	Около 200 Вт	Более 30 кВт
Влияние атмосферы	Не влияет	Минимальное	Не влияет	Значительно
Прямая видимость	Не требуется	Требуется	Не требуется	Требуется

Продолжение таблицы 1

Применимость в авиации	Низкая ввиду возможности использования я только для зарядки после посадки	Средняя, так как для эффективной передачи необходимы крупногабаритные антенны	Низкая из-за технологических ограничений применения оптоволокна	Высокая из-за неограниченной дальности распространения излучения и неограниченной ничем передаваемой мощности
Сложность реализации	Низкая ввиду наличия малого количества комплектующих и простоты конструкции	Очень высокая ввиду наличия сложного антенного оборудования	Средняя ввиду технологически непросто применения оптоволокна	Средняя ввиду сложностей в наведении луча на объект
Стоимость	Низкая	Очень высокая	Высокая	Средняя

Таким образом, сравнительный анализ показывает, что лазерная передача энергии в инфракрасном диапазоне обладает уникальными преимуществами, особенно с точки зрения высокой направленности и возможности эффективной интеграции лазерных источников с фотоэлектрическими приёмниками. Минимизация угловой расходимости инфракрасного лазерного луча позволяет существенно снизить потери при передаче энергии на большие расстояния. При дальнейшем совершенствовании технологий повышения КПД на этапах преобразования электрической энергии в лазерное излучение и обратно, данный метод представляется наиболее перспективным для реализации

высокоэффективных и безопасных систем беспроводной энергетической передачи. Переходя от теоретических выкладок к практическому применению, необходимо подобрать платформу, которая позволит максимально эффективно использовать эти преимущества. Для решения задачи оптимизации передачи энергии посредством инфракрасного лазера предлагается использовать российский дрон «Голубь» с кассетным типом сброса боеприпасов. Такой выбор обусловлен не только высокой мобильностью и тактической универсальностью аппарата, но и его возможностью интеграции современной энергетической системы. Использование дрона «Голубь», представленном на рисунке 3, предоставляет уникальную возможность протестировать и внедрить инфракрасную лазерную систему передачи энергии в реальные боевые условия, что может значительно повысить эффективность выполнения поставленных задач.



Рисунок 3 – Беспилотный летательный аппарат «Голубь»

Ключевыми преимуществами БПЛА «Голубь» являются:

- Поворотная камера

- Подвес нескольких (2x – 3x) 82x миллиметровых мин
- Регулируемая полезная нагрузка

Характеристики дрона:

- Дальность полета до 10 км
- Высота полета до 500 метров
- Размер рамы 31 сантиметр
- Скорость полета от 40 км/ч
- Время полета до 20 минут

Исходя из представленных характеристик видно, что выделение массы под полезную нагрузку действительно позволяет расширить функциональные возможности аппарата. Однако такой подход неизбежно приводит к сокращению энергетического резерва, что уменьшает время полёта. Таким образом, хоть и удаётся интегрировать дополнительные системы, общая длительность полёта оказывается сниженной.

При этом сокращение автономности становится особенно критичным в условиях быстро меняющейся тактической обстановки. Уменьшение времени полёта может негативно отразиться на оперативной мобильности БПЛА, ограничивая возможности для своевременного реагирования на изменения на поле боя.

Глава 1. Анализ ключевых параметров передачи энергии

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность передачи энергии, является воздействие атмосферных явлений. Атмосферные условия, включая уровень влажности, наличие тумана, дождя и присутствие пыли или других аэрозолей, способны существенно снижать мощность лазерного излучения. Эти явления приводят к рассеиванию и поглощению излучения, что, в свою очередь, вызывает энергетические потери. Следовательно, для увеличения коэффициента полезного действия важно принимать во внимание метеорологические прогнозы и разрабатывать системы, способные нейтрализовать воздействие неблагоприятных атмосферных условий.

Также расходимость луча имеет важное значение для эффективности передачи энергии. Чем меньше расходимость, тем более сосредоточенным остается луч на протяжении всего своего пути распространения. Это способствует доставке большего объема энергии к цели с минимальными потерями, однако, слишком малая расходимость луча делает сложнее процесс наведения и стабилизации луча на фотоприемнике. Тем не менее, достижение минимальной расходимости требует применения высокоточных оптических системами.

Кроме того, угол отклонения луча от нормали к площади фотоприемника оказывает значительное воздействие на коэффициент полезного действия. При изменении направления луча от нормали увеличивается путь, который должен пройти луч, что может привести к дополнительным потерям из-за рассеивания и поглощения. Следовательно, оптимизация угла излучения представляет собой важную задачу для повышения эффективности передачи.

Помимо всего прочего, угол смещения луча относительно центра матрицы фотоприемников также является критически важным. Если поток света не фокусируется непосредственно на центральной части приемной матрицы, это может привести к существенному снижению эффективности преобразования фотонной энергии в электрическую. В этой главе мы внесем более тщательный

анализ каждого из этих факторов, уделим им внимание влияния на коэффициент полезного действия системы.

1.1. Влияние атмосферных условий на эффективность передачи

Ослабление светового излучения на пути его распространения в атмосфере обусловлено несколькими физическими явлениями, такими как дисперсия, поглощение и рассеяние, каждое из которых вносит свой вклад в уменьшение эффективности передачи энергии.

1.1.1. Типы взаимодействия света и среды

Дисперсия в контексте лазерной передачи энергии представляет собой явление, при котором компоненты светового излучения с различными длинами волн распространяются с различными скоростями в атмосфере. Такое различие в скоростях приводит к растяжению и искажению лазерного импульса по мере его продвижения. В результате фокусировка энергии на приемнике ухудшается, что снижает эффективность передачи.

Лазерное излучение распространяется узким пучком в атмосфере на расстояния до 1000 метров влияние дисперсии сводится к минимуму. Это подтверждается уравнением Селлмейера для показателя преломления $n(\lambda) = 1 + \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - B_i^2}$, где A_i и B_i – эмпирические коэффициенты для атмосферных газов.

Ввиду того, что излучение имеет очень узкий спектральный диапазон изменение показателя преломления в пределах этого диапазона будет пренебрежимо малым, что, в свою очередь, минимизирует дисперсионные потери.

Поглощение происходит, когда лазерное излучение взаимодействует с молекулами воздуха и других газов в атмосфере. Каждое взаимодействие приводит к тому, что часть энергии лазера преобразуется в тепло, поглощаясь молекулами. Основной причиной поглощения излучения в тропосфере является колебательно-вращательные переходы.

Рассеяние возникает, когда лазерный луч сталкивается с частицами,звешенными в атмосфере, такими как пыль, капли дождя или аэрозоли. Эти частицы отклоняют часть лазерного излучения от его первоначальной траектории, вызывая потерю энергии. Рассеяние может значительно усиливаться

в условиях неблагоприятной погоды, например, в тумане или во время дождя, что делает этот фактор критическим для стабильности и эффективности передачи энергии.

Выделяют три типа рассеяния излучения в непрозрачной среде:

Рэлеевское рассеяние – явление, при котором рассеяние излучения происходит на частицах сильно меньше длины волны. В момент, когда электромагнитная волна излучения проходит сквозь поле частиц, электрическое поле волны индуцирует заряды внутри частиц, создавая дипольные моменты внутри частиц и тем самым заставляет эти диполи переизлучать свет во всех направлениях, что в совокупности приводит к общему рассеянию пучка излучения. Однако, так как Рэлеевское рассеяние обратно пропорционально четвертой степени длины волны, то по мере увеличения длины волны, то есть смещения ее в сторону ИК диапазона, интенсивность рассеяния резко уменьшается, делая его все менее заметным. Из теории молекулярного рассеяния света следует следующее выражение для коэффициента рассеяния в газах:

$$\sigma_P = \frac{8\pi^3(n^2-1)}{3N\lambda^4} \cdot \frac{6+3\delta}{6-7\delta} \quad (1)$$

, где N – число молекул в единице объема, n – показатель преломления среды, λ – длина волны излучения, δ – фактор деполяризации рассеянного излучения, равный 0,035. В таблице 2 приведены значения коэффициента рассеяния оптических толщ вертикального слоя для различных длин волн при температуре 15 градусов Цельсия и давлении $1,013 * 10^5$ Па.

Таблица 2 – Значения коэффициента рассеяния оптических толщ

λ , мкм	$\sigma_P(\lambda)$, км^{-1}	τ_p
0.3	0.1446	1.2237

λ , мкм	$\sigma_P(\lambda)$, км ⁻¹	τ_p
0.34	0.08494	0.7188
0.38	0.05237	0.4508
0.45	0.0644	0.2238
0.55	0.0162	0.0984
0.65	$5.893 * 10^{-3}$	0.0499
0.8	$2.454 * 10^{-3}$	0.0215
1.06	$8.458 * 10^{-4}$	0.0072
1.67	$1.327 * 10^{-4}$	0.0011
3.5	$6.83 * 10^{-6}$	0.0001

Рассеяние Ми или аэрозольное рассеяние – явление, при котором рассеяние излучения происходит на частицах сопоставимых длине волны излучения. Данный тип рассеяния особенно важно учитывать, когда в атмосфере присутствуют капли воды, частицы пыли и прочие аэрозоли. Оно может быть описано через решение уравнений Максвелла для сферических частиц. Ослабление энергии волны видимого и ИК-диапазонов объясняется тем, что волна наводит в каплях токи смещения. Кроме того, токи смещения являются источниками вторичного и рассеянного излучения, что также создает эффект ослабления в направлении распространения волны, причем в видимом диапазоне основные потери энергии создаются за счет явления рассеяния.

Турбулентное рассеяние – явление, возникающее из-за наличия неоднородностей показателей преломления воздуха, вызванных

турбулентностью атмосферы, которое наряду с рассеянием Ми способно оказать существенное влияние на снижение интенсивности излучения. Ключевой физический результат теории распространения волн в турбулентной атмосфере заключается в том, что энергетические потери проходящего излучения остаются незначительными по сравнению с потерями от молекулярного рассеяния, тогда как характеристики оптической волны подвергаются существенным случайным изменениям. Случайные флуктуации амплитуды и фазы волны в оптическом пучке вызывают появление помех, обусловленных трансформацией структуры оптических пучков: происходит расширение оптического пучка, возникают флуктуации направления его распространения и наблюдается расщепление оптического пучка. Расширение пучка в турбулентной атмосфере исключает возможность фокусировки оптического излучения на значительных расстояниях. С ростом диаметра источника дифракционное пятно в фокусе сокращается в турбулентной атмосфере не согласно классическим формулам оптики однородных сред, а до определенного предельного размера, который получил название размера насыщения.

1.1.2. Моделирование атмосферы и выбор длины волны

Для моделирования передачи энергии лазером через атмосферу необходимо учитывать сложные взаимодействия между излучением и атмосферными компонентами. Одним из фундаментальных аспектов здесь является определение прозрачности атмосферы для лазерных источников на различной длине волны, поскольку это влияет на эффективность передачи энергии. Прозрачность определяется различными факторами, включая тип атмосферы, концентрация водяного пара, наличие аэрозолей и облаков, а также температурные условия. Все эти параметры отличаются в зависимости от географического расположения, сезонных условий и погоды. Например, в тропиках преобладают более высокие концентрации водяных паров, что заставляет пересмотреть выбор длины волны по сравнению с более сухими и меньше проживающими регионами. Ввиду сложности построения математической модели атмосферы классическими аналитическими методами

более целесообразно использовать ПО, способное моделировать атмосферу с высокой точностью на основе актуальных данных. Одним из таких инструментов является программное обеспечение MODTRAN, которое позволяет исследовать влияние различных атмосферных условий на распространение электромагнитного излучения имея в своем арсенале различные модели атмосферы Земли.

Всего ПО MODTRAN предлагает 6 профилей модели атмосферы в зависимости от их расположения по земному шару. Каждый из профилей существенно отличается по температурным показателям в зависимости от высоты. График температурных профилей показан на рисунке 4.

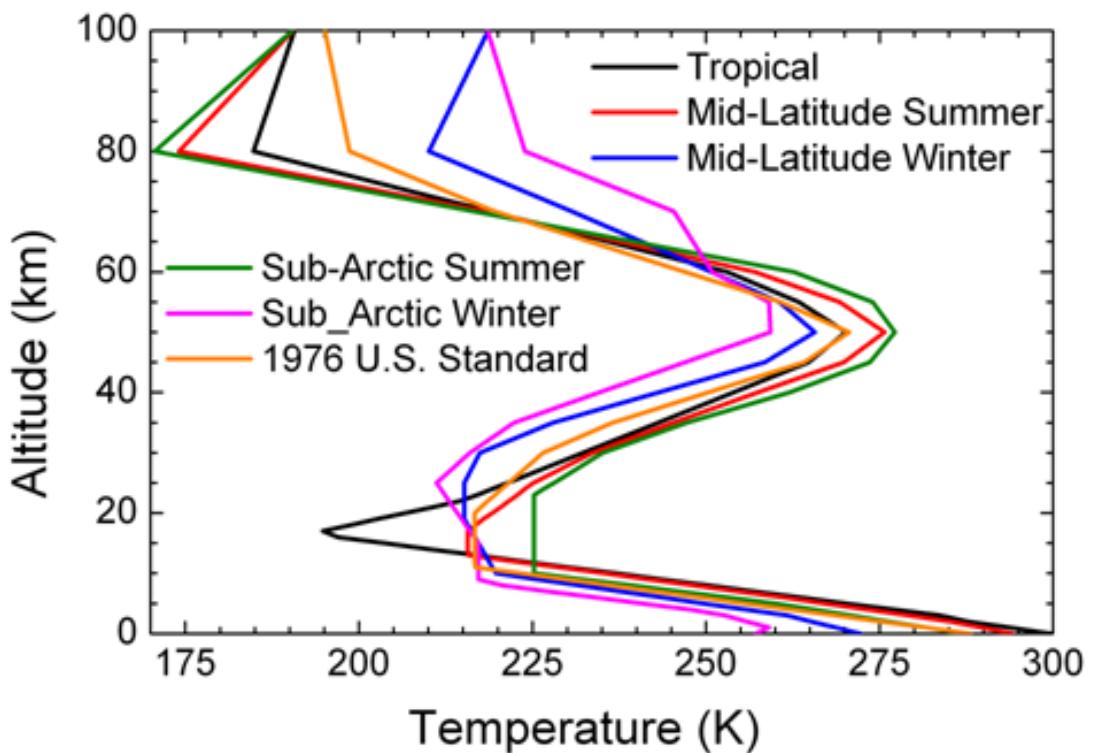


Рисунок 4 – Температурные профили модели атмосферы

В рамках решения оптимизационной задачи предполагается эксплуатация дрона в центральных широтах на высоте до 1 километра в летнее время. В контексте текущей задачи примем температурный профиль на высоте 1 километр равным 11 градусам Цельсия.

Для дальнейшего расчета необходимо определить значения плотности водяного пара. На рисунке 5 представлены профили плотности воды для каждой модели атмосферы.

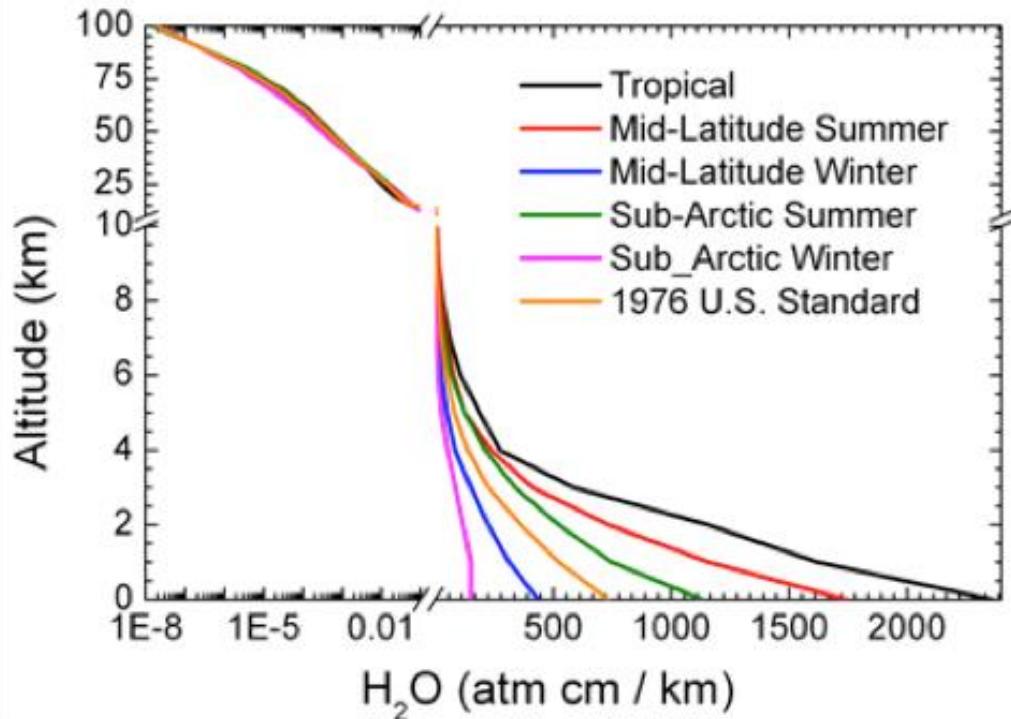


Рисунок 5 – Профили плотности воды

Исходя из данного графика и вводных данных о максимальной высоте полета примем абсолютную вертикальную высоту столба водяного пара равной 1250 атм-см. Важное примечание, плотность водяного пара на каждой высоте профиля не увеличивается более чем на 100% относительной влажности или более чем в 5 раз по сравнению с исходным значением в модели атмосферы. При достижении предела относительной влажности избыток воды распределяется по другим уровням в максимально возможной степени для достижения заданного водяного столба.

Дальнейшим этапом расчета является получение значения концентрации озона в вертикальном столбе. На рисунке 6 представлено семейство графиков концентрации озона в зависимости от высоты.

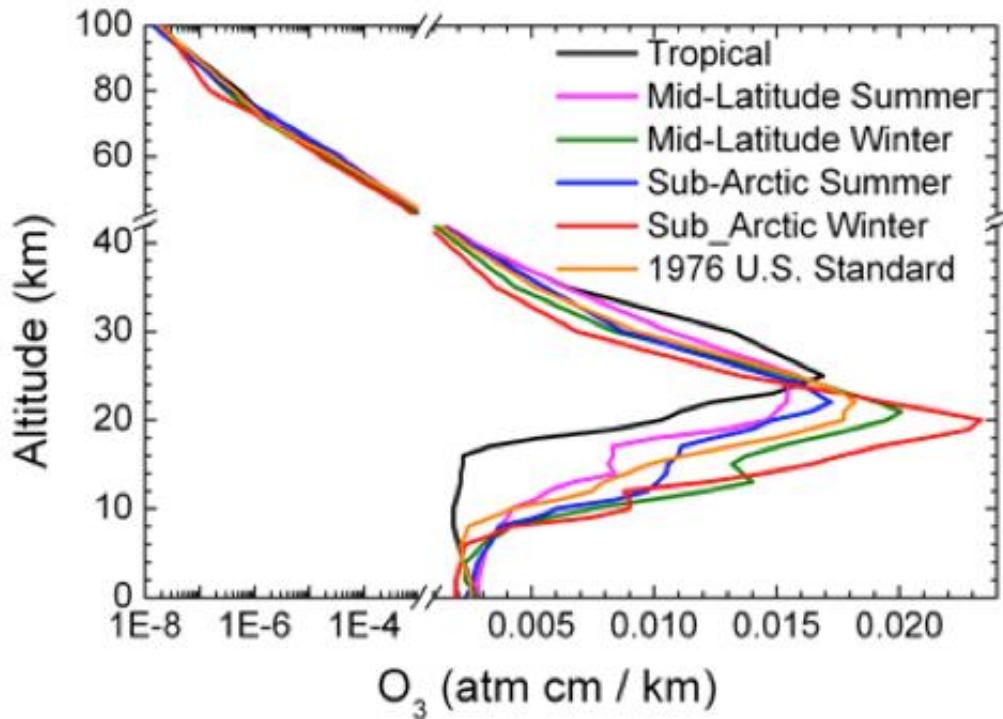


Рисунок 6 – Концентрация озона по высоте

Видно, что на высоте до 10 километров особой разницы в концентрации озона для каждого отдельного профиля модели атмосферы нет, тем не менее, исходя из представленного графика примем концентрацию озона равной 0.002 атм-см.

Для проведения дальнейшего моделирования необходимо знать концентрацию углекислого газа в миллионных долях. Концентрация в миллионных долях, также известная как ppm — это мера, используемая для описания количества молекул газа в миллионе молекул воздуха, а ppmv — это мера, используемая для описания количества молекул газа в миллионе молекул воздуха по объему.

Согласно прогнозу метеорологического бюро Великобритании, к маю 2025 года концентрация CO_2 в атмосфере достигнет 429,6 частей на миллион. Концентрация угарного газа равна 10 ppmv, а концентрация метана 2 ppmv.

Установив ключевые концентрации углекислого газа, угарного газа и метана в атмосфере, важно рассмотреть их влияние на климатическую систему Земли, в частности на температуру поверхности и альбедо. Согласно данным открытых источников, температура поверхности Земли в средних широтах варьируется от 260К до 300К зимой и летом соответственно. Исходя из условий

примем температуру поверхности равной 290К. Температура поверхности оказывает значительное влияние на альбедо, или отражательную способность поверхности, что, в свою очередь, влияет на общий энергетический баланс Земли. Альбедо определяет, какая доля солнечной радиации отражается обратно в космос, и какая поглощается, способствуя нагреву поверхности. Принимая во внимание полевое использование, а не городское в летнее время, альбедо может принимать значения от 0.2 до 0.4. Для усреднения примем значение альбедо, равное 0.3.

Так как в рамках текущей задачи атмосфера описывается до высоты 1 километр необходимо также выбрать модель аэрозоля. В программном комплексе MODTRAN существует 4 типа моделей:

- Сельская модель – эта модель лучше всего подходит для регионов, где нет заметных промышленных процессов. Водорастворимые вещества составляют 70% аэрозолей, а остальное приходится на пылевые аэрозоли. Сельские и городские модели были разработаны Шеттлом и Фенном.
- Городская модель – городская модель аэрозоля учитывает воздействие промышленности и сопровождающие их выделения загрязнений с крупными частицами.
- Морская модель – Эта модель адаптирована для морских аэрозолей и включает распределение аэрозолей по размерам, полученное из нескольких источников. Модель зависит от скорости ветра. Скорость ветра варьируется в зависимости от модели атмосферы.
- Пустынная модель – Эта модель описывает атмосферу над пустыней с повышенным содержанием частиц песка и пыли. Модель аэрозоля в пустыне была впервые предложена Лонгтином. Для описания эффекта используются три основных компонента (углеродсодержащие частицы, водорастворимые частицы и песок). Каждый компонент имеет различное логарифмически нормальное распределение по размерам и набор показателей преломления.

В условиях современных боевых действий поля сражений неизменно насыщаются разнообразными аэрозолями, включая пыль, копоть и крупные частицы. Эти элементы значительно изменяют оптические и физические свойства атмосферы, что требует учета в моделировании и прогнозировании. Городская аэрозольная модель оказывается наиболее адекватной в таких реалиях, поскольку она учитывает высокую концентрацию частиц и сложную динамику их взаимодействия с окружающей средой.

Выполнив моделирование с заданными ранее параметрами, был получен график коэффициента пропускания от длины волны, представленный на рисунке 7.

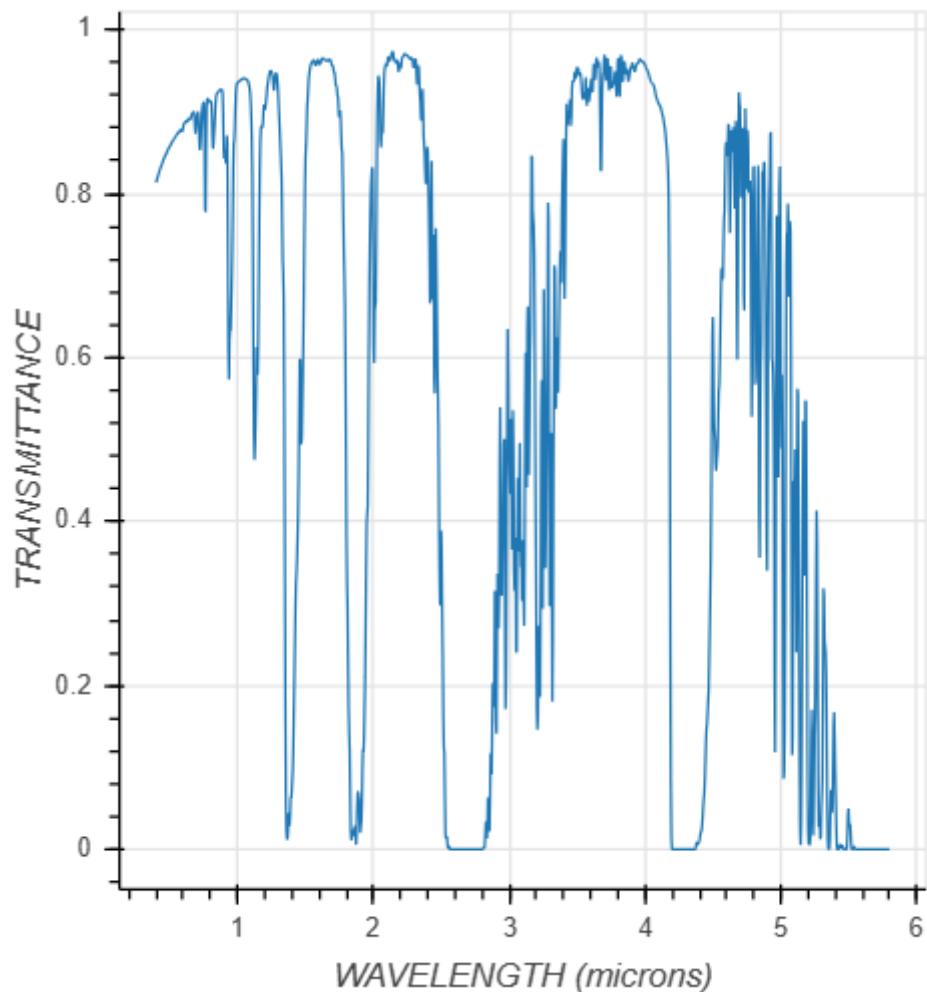


Рисунок 7 – Смоделированный коэффициент пропускания атмосферы

Из графика видно, что оптимальные окна с наибольшим коэффициентом пропускания обладает излучение на длинах волн 1 мкм, 1.2 мкм, 1.8 мкм, 3.1 - 4 мкм.

1.2. Отклонение луча от нормали к площади фотоприемника

Эффективность передачи, помимо атмосферных параметров, сильно зависит от геометрии падения лазерного луча на фотопринимающее устройство. Согласно закону излучения Ламберта радиальная интенсивность излучения от ламбертовской поверхности (излучателя) прямо пропорциональна косинусу угла между направлением на наблюдателя и нормалью к поверхности. Этот закон можно описать следующей формулой

$$I(\theta) = I_0 * \cos(\theta) \quad (2)$$

, где $I(\theta)$ – регистрируемая интенсивность под углом θ , I_0 – интенсивность при нормальном падении, θ – угол падения.

С учетом коэффициента отражения T формула (2) приобретает вид

$$I(\theta) = TI_0 * \cos(\theta) \quad (3)$$

В основном у большинства инфракрасных лазеров преобладает линейная поляризация.

Когда электромагнитная волна попадает на границу раздела сред часть энергии отражается, а часть проходит среду. Для описания взаимодействия лазерного излучения с поверхностью фотоприемника необходимо разложить поляризацию на s и p поляризации. Вектор поляризации лазера имеет вид

$$\overrightarrow{E_{\text{лазер}}} = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \hat{\epsilon} \quad (4)$$

, где $\hat{\epsilon}$ – единичный вектор поляризации под углом α к плоскости падения, имеющий вид

$$\hat{\epsilon} = \cos(\alpha) * \hat{s} + \sin(\alpha) * \hat{p} \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим уравнение следующего вида

$$\overrightarrow{E_{\text{лазер}}} = E_0 e^{i(\omega t - kz)} [\cos(\alpha) * \hat{s} + \sin(\alpha) * \hat{p}] = E_s e^{i(\omega t - kz)} \hat{s} + E_p e^{i(\omega t - kz)} \hat{p} \quad (6)$$

, где $E_s = E_0 \cos(\alpha)$, $E_p = E_0 \sin(\alpha)$

При падении излучения под углом к фотоприемнику отраженные на границе раздела сред компоненты будет иметь следующий вид

S-компоненты: $E_{s,\text{отр}} = r_s E_s = \sqrt{R_s} E_s$

P-компоненты: $E_{p,\text{отр}} = r_p E_p = \sqrt{R_p} E_p$

A компоненты прошедшего излучения будут иметь вид

S-компонент: $E_{s,\text{прош}} = t_s E_s = \sqrt{T_s} E_s = \sqrt{1 - R_s} E_s$

P-компонент: $E_{p,\text{прош}} = t_p E_p = \sqrt{T_p} E_p = \sqrt{1 - R_p} E_p$

Полная интенсивность падающей волны имеет вид:

$$I_0 = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 |E_0|^2 = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 (|E_s|^2 + |E_p|^2) = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 (E_0^2 \cos^2 \alpha + E_0^2 \sin^2 \alpha) \quad (7)$$

При угле падения θ эффективная площадь фотоприемника имеет вид

$$S_{eff} = S_0 \cos \theta$$

Поток излучения пропорционален интенсивности, умноженной на эффективную площадь:

$$\Phi \propto I S_{eff} = I * S_0 \cos \theta$$

Тогда, интенсивность прошедшего излучения по компонентам будет иметь вид

$$\begin{aligned} \text{S-компонент: } I_s(\theta) &= \frac{1}{2} c \varepsilon_0 |E_{s,\text{прош}}|^2 \cos \theta = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 (1 - R_s) |E_s|^2 \cos \theta = \\ &= \frac{1}{2} c \varepsilon_0 (1 - R_s) E_0^2 \cos^2 \alpha \cos \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{P-компонент: } I_p(\theta) &= \frac{1}{2} c \varepsilon_0 |E_{p,\text{прош}}|^2 \cos \theta = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 (1 - R_p) |E_p|^2 \cos \theta = \\ &= \frac{1}{2} c \varepsilon_0 (1 - R_p) E_0^2 \sin^2 \alpha \cos \theta \end{aligned}$$

Сумма компонентов дает полную интенсивность, зависящую от угла падения излучения на фотоприемник

$$I_{total}(\alpha, \theta) = I_s(\theta) + I_p(\theta) = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2 \cos \theta [(1 - R_s) \cos^2 \alpha + (1 - R_p) \sin^2 \alpha] \quad (8)$$

Компонент уравнения $\frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2$ равен I_0 , подставив в выражение (8), получим интенсивность излучения на фотоприемнике с учетом угла падения и угла поляризации

$$I_{total}(\alpha, \theta) = I_0 \cos \theta [(1 - R_s(\theta)) \cos^2 \alpha + (1 - R_p(\theta)) \sin^2 \alpha] \quad (9)$$

Поделив обе части уравнения на I_0 получим КПД передачи излучения через границу раздела сред в зависимости от угла поляризации и угла падения излучения на фотоприемник

$$\eta(\alpha, \theta) = \cos \theta [(1 - R_s(\theta)) \cos^2 \alpha + (1 - R_p(\theta)) \sin^2 \alpha] \quad (10)$$

1.3. Отклонение луча от геометрического центра матрицы фотоприемников

Еще одним немаловажным фактором, влияющим на эффективность передачи энергии является отклонение луча лазера от центра фотоприемника. В реалиях использования систем лазерной связи и передачи энергии посредством лазера применяют не одно фотопринимающее устройство, а матрицу фотоприемников. Существует несколько пространственных профилей распределения интенсивности лазерного излучения, представленные на рисунке 8.

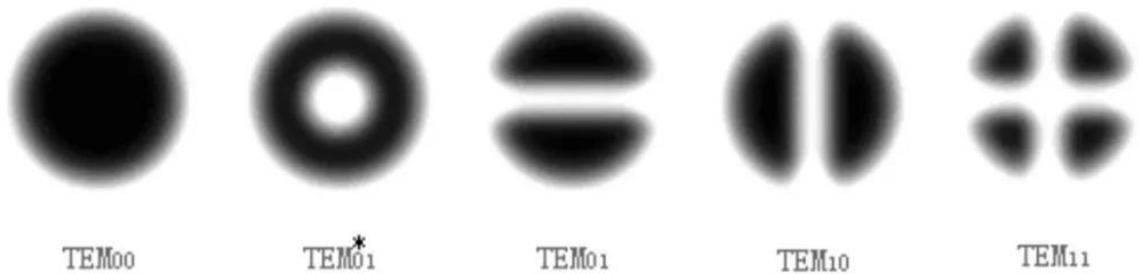


Рисунок 8 – Пространственные профили распределения интенсивности

Ввиду того, что лазерное излучение имеет гауссов профиль, распределение интенсивности излучения в световом пятне на матрице имеет вид:

$$I(r) = \frac{2P_0}{\pi\omega^2(z)} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \quad (11)$$

, где $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$ – радиус пучка на расстоянии z , $z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ – рэлеевская длина, λ – длина волны излучения.

В процессе эксплуатации БПЛА источник лазерного излучения непрерывно следует за беспилотным летательным аппаратом из-за чего пятно падающего излучения помимо того, что меняет форму на эллиптическую, еще и смещается по матрице фотоприемников, распределяя интенсивность по меньшему количеству фотопринимающих устройств, чем имеется на борту. Чтобы оценить влияние ошибок наведения лазерного источника на КПД передачи энергии, необходимо количественно рассчитать, какая доля мощности

лазерного излучения фактически улавливается фотоматрицей при различных положениях и ориентациях БПЛА относительно падающего пучка.

Для описания приведенных зависимостей необходимо ввести системы координат.

Глобальная или мировая система координат: начало координат расположено в точке лазерной установки, ось X – горизонтальная ось, направленная в сторону БПЛА вдоль распространения лазерного луча, ось Y – горизонтальная ось, перпендикулярная осям X и Z, ось Z – расположена перпендикулярно поверхности земли.

Локальная система координат: начало координат совпадает с центром матрицы фотоприемников, оси X'Y' лежат в плоскости матрицы фотоприемников, образуя локальную плоскость приема, ось Z' – нормаль к поверхности фотоприемника.

Наглядное расположение систем координат представлены на рисунке 9.

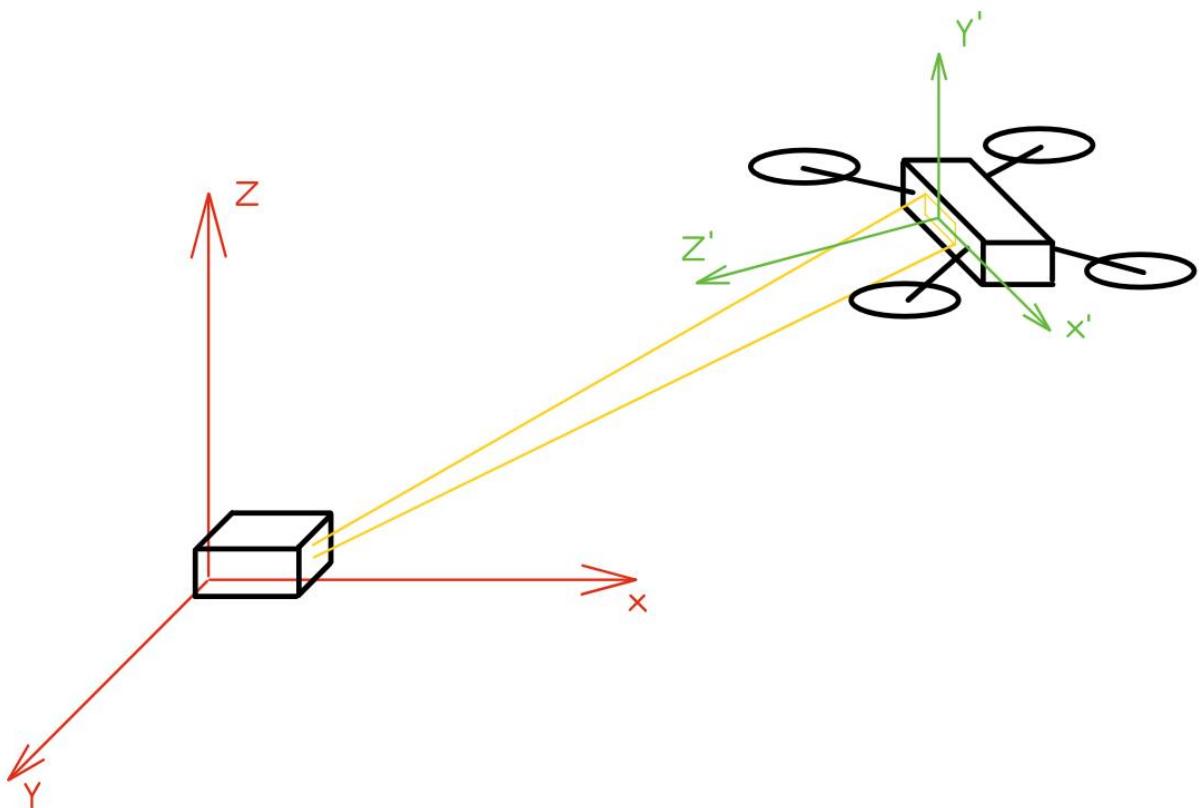


Рисунок 9 – Расположение систем координат

Для корректного расчёта КПД необходимо учитывать пространственное распределение интенсивности лазерного пучка и геометрические параметры

фотоприёмника. Однако, для понимания базовых закономерностей и получения аналитически выражаемой формулы КПД, целесообразно сначала рассмотреть классический случай без учёта углов поворота, когда локальная система совпадает с глобальной, а плоскость фотоприёмника перпендикулярна оси лазерного пучка. В этом случае интегрирование гауссова распределения интенсивности по прямоугольной апертуре фотоприёмника сводится к произведению функций ошибок, что даёт удобное и наглядное аналитическое выражение.

Уравнение (11) представлено в полярных координатах, для его перевода в декартову систему координат заменим r на координаты положения пятна на матрице x и y .

$$I(r) = \frac{2P_0}{\pi\omega^2(z)} \exp\left(-\frac{2(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{\omega^2(z)}\right) \quad (12)$$

, где x_0 и y_0 – смещение центра пучка относительно центра матрицы.

Определим КПД как отношение интеграла интенсивности по площади матрицы фотоприемников к полной мощности пучка

$$\eta = \frac{\int I(x, y) dx dy}{\iint_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dx dy}$$

Поскольку интеграл по бесконечной плоскости от гауссиана – это вся мощность P_0 , то

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dx dy = I_0 \frac{\pi\omega^2}{2}$$

Пусть матрица занимает $x \in \left[-\frac{a}{2}, \frac{a}{2}\right]$, $y \in \left[-\frac{b}{2}, \frac{b}{2}\right]$, тогда интеграл принимает вид

$$P_{\text{матрица}} = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} I_0 \exp\left(-\frac{2(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{\omega^2}\right) dx dy$$

После выноса констант получим

$$P_{\text{матрица}} = I_0 \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp\left(-\frac{2(x-x_0)^2}{\omega^2}\right) dx \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \exp\left(-\frac{2(y-y_0)^2}{\omega^2}\right) dy$$

Каждый интеграл – это интеграл от одномерного гауссиана, который выражается через функцию ошибок erf, тогда для x имеем:

$$\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp\left(-\frac{2(x-x_0)^2}{\omega^2}\right) dx = \frac{\omega\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(\frac{a}{2}-x_0\right)\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(-\frac{a}{2}-x_0\right)\right) \right]$$

Для y:

$$\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \exp\left(-\frac{2(y-y_0)^2}{\omega^2}\right) dy = \frac{\omega\sqrt{\pi}}{2\sqrt{2}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(\frac{b}{2}-y_0\right)\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(-\frac{b}{2}-y_0\right)\right) \right]$$

Тогда функция КПД будет иметь вид:

$$\eta = \frac{1}{\pi} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(\frac{a}{2}-x_0\right)\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(-\frac{a}{2}-x_0\right)\right) * \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(\frac{b}{2}-y_0\right)\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{\omega}\left(-\frac{b}{2}-y_0\right)\right) \right] \quad (13)$$

Однако, как было отмечено ранее, это классический вид уравнения КПД, которое не учитывает вращение системы координат БПЛА. Для уточнения уравнения необходимо использовать матрицу поворота R:

$$R = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma)$$

$$\text{где матрицы } R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix},$$

$$R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}$$

Умножим $R_y(\beta)$ на $R_x(\gamma)$ и получим

$$R_y(\beta)R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix}$$

Умножим полученную матрицу на $R_z(\alpha)$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma & \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & \end{pmatrix}$$

Локальная система координат фотоприемника имеет вид

$$\vec{r}' = (x', y', 0)^T$$

, где $x' \in [-a, a], y' \in [-b, b]$

Для получения реальных координат точек фотоприемника в пространстве и как следствие учета углов и смещений лазерного луча относительно их центра необходимо перевести локальную систему координат в глобальную с помощью матрицы поворота R .

$$\vec{r} = R^T \vec{r}' = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{21} & R_{31} \\ R_{12} & R_{22} & R_{32} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}x' + R_{21}y' \\ R_{12}x' + R_{22}y' \\ R_{13}x' + R_{23}y' \end{pmatrix}$$

Гауссов профиль с центром в $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, 0)^T$

$$I(\vec{r}) = I_0 \exp\left(-\frac{2(r_x - x_0)^2 + (r_y - y_0)^2}{\omega^2(z)}\right)$$

Подставив \vec{r} в выражение (12)

$$(r_x - x_0)^2 + (r_y - y_0)^2 = (R_{11}x' + R_{21}y' - x_0)^2 + (R_{12}x' + R_{22}y' - y_0)^2$$

Раскрыв скобки

$$\begin{aligned} &= x'^2(R_{11}^2 + R_{12}^2) + y'^2(R_{21}^2 + R_{22}^2) + 2x'y'(R_{11}R_{21} + R_{12}R_{22}) \\ &\quad - 2x'(R_{11}x_0 + R_{12}y_0) - 2y'(R_{21}x_0 + R_{22}y_0) + x_0^2 + y_0^2 \end{aligned}$$

Обозначив

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}^2 + R_{12}^2 & R_{11}R_{21} + R_{12}R_{22} \\ R_{11}R_{21} + R_{12}R_{22} & R_{21}^2 + R_{22}^2 \end{pmatrix}, \\ B &= \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}x_0 + R_{12}y_0 \\ R_{21}x_0 + R_{22}y_0 \end{pmatrix}, \\ C &= x_0^2 + y_0^2 \end{aligned}$$

Получим

$$(r_x - x_0)^2 + (r_y - y_0)^2 = \vec{r}^T A \vec{r} - 2\vec{B}^T \vec{r} + C$$

Как было отмечено ранее, КПД – это отношение мощности, попавшей на приемник к полной мощности пучка тогда, исходя из вышеизложенного, получаем

$$\eta_{\text{геом}} = \frac{1}{P_0} \int_{-a}^a \int_{-b}^b I_0 \exp\left(-\frac{2(\vec{r}^T A \vec{r} - 2\vec{B}^T \vec{r} + C)}{\omega^2}\right) dx' dy'$$

Выделив полный квадрат

$$\vec{r}^T A \vec{r} - 2\vec{B}^T \vec{r} = (\vec{r}' - A^{-1} \vec{B})^T A (\vec{r}' - A^{-1} \vec{B}) - \vec{B}^T A^{-1} \vec{B}$$

Подставляем

$$\eta_{\text{геом}} = \frac{I_0 e^{-\frac{2(C - \vec{B}^T A^{-1} \vec{B})}{\omega^2}}}{P_0} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \exp\left(-\frac{2(\vec{r}' - A^{-1} \vec{B})^T A(\vec{r}' - A^{-1} \vec{B})}{\omega^2}\right) dx' dy'$$

Применив разложение Холецкого

$$A = LL^T$$

Введем замену переменной

$$\vec{u} = \sqrt{\frac{2}{\omega^2}} L^T (\vec{r}' - A^{-1} \vec{B})$$

Тогда

$$(\vec{r}' - A^{-1} \vec{B})^T A (\vec{r}' - A^{-1} \vec{B}) = \vec{u}^T \vec{u} = u_1^2 + u_2^2$$

Получим полное уравнение КПД, учитывающее углы поворота БПЛА в глобальной системе координат и, как следствие, смещение пучка по матрице фотоприемников

$$\eta_{\text{геом}} = \frac{I_0 \omega^2}{2P_0 \sqrt{\det A}} \exp\left(-\frac{2(C - \vec{B}^T A^{-1} \vec{B})}{\omega^2}\right) \iint e^{-u_1^2 - u_2^2} du_1 du_2$$

, где А, В, С зависят от матрицы поворота R(α, β, γ) и смещения пучка, а двойной интеграл берется по области D, являющейся образом прямоугольника матрицы фотоприемников [-a, a] x [-b, b] при аффинном преобразовании.

1.4. Вывод по главе

В данной главе были подробно рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность передачи энергии с помощью инфракрасного лазера. Было проведено моделирование атмосферного тракта, где учитывались текущие уровни загрязненности атмосферы и концентрация в ней пыли и прочих крупных частиц, после чего получены окна прозрачности с оптимальными длинами волн. Были выведены зависимости КПД от каждого из критериев, влияющих на передачу, которые позднее будут использоваться для решения задачи оптимизации.

Глава2. Выбор фотопринимающего устройства для БПЛА

В системах беспроводной передачи энергии по инфракрасному каналу, то есть с использованием инфракрасного лазера, ключевым элементом, от которого зависит эффективность передачи энергии, является фотоприемник. Фотоприемник – полупроводниковый прибор, регистрирующий оптическое излучение и преобразующий его в электрическую энергию.

2.1. Обзор видов фотопринимающих устройств

Эти устройства подразделяют на несколько видов:

- 1) Фототранзистор – оптоэлектронный полупроводниковый прибор, являющийся вариантом транзистора, за исключением того, что область базы доступна для светового излучения.

Фототранзистор имеет структуру р-п-р или п-р-п и может усиливать ток. Дырки в электронно-дырочных парах, порожденных световым излучением, находятся на базе, а электроны перетекают в эмиттер или коллектор. При увеличении положительного потенциала базы происходит усиление фототока за счет инжекции электронов.

- 2) Фотодиод – оптоэлектронный полупроводниковый прибор, преобразующий попавший на его фоточувствительную область свет в заряд за счет процессов, протекающих в р-п переходе. Фотодиод, работа которого основана на фотovoltaическом эффекте, называют солнечным элементом. Кроме р-п фотодиодов, также существуют и PIN фотодиоды, у которых между слоями р- и п- находится слой нелегированного полупроводника i. Данные фотодиоды лишь преобразуют свет в электрический ток, но не усиливают его, в отличие от лавинных фотодиодов или фототранзисторов, о которых было сказано ранее.

- 3) Фототиристор – прибор, имеющий структуру схожую с устройством обычного тиристора, но отличающийся от него тем, что он включается не напряжением, а световым потоком, падающим на тиристорную структуру. Этот прибор применяется в управляемых

светом выпрямителях и наиболее эффективен в управлении сильными токами при высоких напряжениях.

- 4) Фоторезистор – полупроводниковый прибор, который изменяет величину своего сопротивления в зависимости от величины падающего на него светового потока.

Все типы фотоприемников независимо от их физического принципа и конструкции, описываются определенной совокупностью параметров.

- 1) Чувствительность – в общем случае чувствительность фотоприемника отражает изменение состояния на выходе фотоприемника при подаче на его вход единичного оптического сигнала. Количественно чувствительность можно определить как отношение измеряемой величины, вызванной падающим на фотоприемник излучением, к количественной характеристике этого излучения.

Токовая чувствительность $\left(\frac{A}{Bt}\right)$ определяется как

$$S_i = \frac{I_f}{P}$$

, где I_f – фототок, P – оптическая мощность

Вольтовая чувствительность $\left(\frac{B}{Bt}\right)$

$$S_U = \frac{U_o}{P}$$

Также различают спектральную и интегральную чувствительность. Абсолютная спектральная чувствительность — это реакция фотоприемника на монохроматический поток излучения.

$$S_\lambda = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi_\lambda}$$

, где $\Delta \Phi_\lambda$ – изменение монохроматического потока.

Интегральная чувствительность может быть записана как

$$S_\lambda = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} = \frac{\Delta U}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta \Phi(\lambda) d\lambda}$$

- 2) Энергетическая характеристика – отражает зависимость фототока I_f от падающего потока Φ .

$$I_f = k * \Phi^n$$

, где k – коэффициент пропорциональности, n – показатель степени, характеризующий линейность отклика.

Помимо полезного сигнала на выходе приемника всегда наблюдается хаотический сигнал со случайными амплитудой и частотой – шум приемника излучения. Уровень шумов ограничивает предельные возможности приемника при регистрации слабых сигналов. Механизмы возникновения шумов разнообразны, но в контексте задачи приема энергии с лазерного излучения одним из важнейших типов шумов является тепловой.

- 3) Тепловой шум возникает вследствие хаотичного теплового движения свободных электронов проводящего материала приемника. В результате такого движения число электронов, перемещающихся в одном направлении, не равно числу электронов, движущихся в противоположном направлении. В результате, возникающий ток и напряжения носят случайный характер.

$$\sigma_U = \sqrt{u_{\text{ш}}^2} = \sqrt{4kTR_T\Delta f}$$

- 4) Пороговая чувствительность – минимальный поток, который создает на выходе с фотоприемника сигнал, который равен среднеквадратичному значению шумов приемника.

$$\Phi_n = \frac{\sigma_U}{S_U} = \frac{\sqrt{u_{\text{ш}}^2}}{S_U}$$

- 5) Удельная обнаружительная способность – величина, обратная удельной пороговой чувствительности. Ее применяют для оценки способности приемника с площадью 1 квадратный сантиметр к обнаружению единичного потока 1 Вт в полосе частот 1 Гц.

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{n-\text{уд}}} = \frac{s_{\text{пр}}\sqrt{\Delta f}}{\Phi_n} = \frac{S_U}{\sqrt{u_{\text{ш}}^2}} S_{\text{пр}}\sqrt{\Delta f}$$

6) Удельная пороговая чувствительность – минимальная мощность, которую фотоприемник способен зарегистрировать с заданным отношением сигнал/шум.

$$\Phi_{n-\text{уд}} = \frac{\Phi_n}{S_{\text{пр}}\sqrt{\Delta f}}$$

Каждое из устройств обладает своими преимуществами и недостатками. Для наиболее оптимального выбора фотоприемника, устанавливаемого на БПЛА, необходимо привести сравнение плюсов и минусов каждого из них.

Достоинствами фоторезистора являются:

- низкая стоимость
- высокая надежность

К недостаткам относятся:

- инерционность фоторезистора – запаздывание сигнала понижает быстродействие устройств на базе фоторезисторов.

Одно из главных требований к системам управления летательными аппаратами является быстродействие, поэтому создавать блок управления на базе фоторезистора нецелесообразно, так как задержка в несколько миллисекунд может стать решающими во время полета.

Достоинствами фототранзистора являются:

- способны мгновенно создать высокую величину тока
- имеют высокую чувствительность
- низкая стоимость

К недостаткам фототранзистора можно отнести:

- нестабильность параметров
- большой уровень шумов
- плохие частотные характеристики

Таким образом, из-за своих недостатков фототранзистор является не лучшим выбором для использования в принимающем устройстве блока управления.

В перечень эксплуатационных достоинств фотодиодов входят:

- стабильность фототока
- линейная зависимость фототока от уровня освещенности
- низкое входное сопротивление при прямом включении
- нетребовательность к температурному режиму

К слабым сторонам фотодиода можно отнести:

- более низкая чувствительность по сравнению с фототранзистором
- малый коэффициент усиления входящего сигнала

Несмотря на все недостатки фотодиодов, линейная зависимость фототока, стабильность параметров и нетребовательность к температуре среды делают его хорошим выбором в качестве датчика инфракрасного излучения.

Существует большая разновидность фотодиодов, например такие как:

1. PIN-фотодиоды

Для этих полупроводников характерно наличие в зоне р-п перехода участка, обладающего собственной проводимостью и значительной величиной сопротивления. При попадании на этот участок светового потока появляются пары дырок и электронов. Электрополе в данной области постоянно, пространственного заряда нет. Такой вспомогательный слой расширяет диапазон рабочих частот полупроводника. По функциональному назначению PIN-фотодиоды разделяют на детекторные, смесительные, параметрические, ограничительные, умножительные, настроечные и другие.

2. Лавинные фотодиоды

Этот вид отличается высокой чувствительностью. Его функция – преобразование светового потока в электросигнал, усиленный с помощью эффекта лавинного умножения. Может применяться в условиях незначительного светового потока. В конструкции лавинных фотодиодов используются сверхрешетки, способствующие снижению помех при передаче сигналов.

3. С барьером Шоттки

Состоит из металла и полупроводника, вокруг границы соединения которых создается электрическое поле. Главным отличием от обычных фотодиодов PIN -типа является использование основных, а не дополнительных носителей зарядов.

4. С гетероструктурой

Образуется из двух полупроводников, имеющих разную ширину запрещенной зоны. Гетерогенным называют слой, находящийся между ними. Путем подбора таких полупроводников можно создать устройство, работающее в полном диапазоне длин волн. Его минусом является высокая сложность изготовления.

Исходя из представленных описаний и изученной теории составлена сравнительная таблица характеристик лавинного фотодиода и PIN фотодиода.

Таблица 3 – Характеристики фотодиодов

Характеристика	PIN-фотодиод	Лавинный фотодиод (APD)
Принцип работы	Прямое преобразование фотонов в ток	Прямое преобразование + внутреннее лавинное усиление фототока
Конструкция	PIN структура с широкой i-областью	Аналогичная PIN структура с зоной лавинного пробоя для усиления
Чувствительность	Высокая, но без внутреннего усиления	Значительно выше за счёт лавинного усиления (коэффициент усиления 10–100)
Уровень шума	Низкий, обусловлен темновым током и внешними шумами	Выше из-за усиления шума лавинного процесса
Рабочее напряжение	Низкое (обычно < 10 В)	Высокое (обратное напряжение порядка 100–200 В)

Скорость отклика	Высокая (наносекундный диапазон)	Очень высокая, но может снижаться из-за лавинного процесса
Линейность	Широкий линейный диапазон	Линейность ограничена лавинным усилением и шумами
Температурная стабильность	Хорошая, менее чувствителен к температуре	Требует компенсации температуры, чувствителен к изменениям температуры
Сложность схемы	Простая, требует только обратного смещения	Сложная, требует стабилизации напряжения и компенсации температуры

Исходя из представленных в таблице сравнительных характеристик видно, что наиболее подходящим видом фотодиода для приема инфракрасного лазерного излучения является PIN фотодиод

2.2. Обзор материалов выполнения фотоприемников

Еще одним немаловажным фактором в выборе фотодиода является материал, из которого выполнена фотопринимающая область. Фотодиоды в промышленности выполняют из следующих материалов:

- 1) Кремний – самый распространённый и технологически развитый материал для фотодиодов.

Основными характеристиками кремния являются:

- Спектральный диапазон: примерно 0,4–1,1 мкм, что охватывает видимый и ближний инфракрасный свет.
- Чувствительность: высокая, с низким темновым током и низким уровнем шумов, что обеспечивает качественное преобразование света в электрический сигнал.
- Быстродействие: хорошие показатели, время отклика в наносекундном диапазоне, что позволяет использовать их в высокоскоростных системах

- Спектральная ширина: кремниевые фотодиоды обладают широкой спектральной характеристикой с максимумом в видимой и ближней ИК области
- Преимущества: доступность, надёжность, низкая стоимость, хорошая линейность отклика, механическая прочность

2) Германий

Основными характеристиками являются:

- Спектральный диапазон: расширенный ближний ИК — до 1,7 мкм, что позволяет регистрировать излучение за пределами возможностей кремния.
- Чувствительность: выше в ИК-диапазоне, но с более высоким уровнем темнового тока и шумов по сравнению с Si.
- Быстродействие: среднее, уступает кремнию и InGaAs.
- Особенности: требуют охлаждения для снижения шума в чувствительных приложениях.
- Преимущества: расширенный спектр, но с ограничениями по шуму и температурной стабильности.

3) Фотодиоды на основе арсенида галлия и его соединений

Основными характеристиками являются:

- Спектральный диапазон: преимущественно ультрафиолет и видимый свет (примерно 0,2–0,9 мкм)
- Чувствительность: высокая стабильность и устойчивость к радиации.
- Быстродействие: высокое, подходят для высокоскоростных применений.
- Особенности: используются в условиях повышенной радиационной нагрузки, например, в космической технике.

4) Фотодиоды на основе индий-галлия арсенида

Основными характеристиками являются:

- Спектральный диапазон: 0,9–1,7 мкм, оптimalен для ближнего инфракрасного диапазона.
- Чувствительность: очень высокая квантовая эффективность, низкий уровень шума, особенно при охлаждении.
- Быстродействие: очень высокое, что делает их идеальными для телекоммуникаций и ИК-лазеров.
- Особенности: более дорогие и сложные в производстве по сравнению с Si, требуют систем охлаждения для максимальной эффективности.

5) Теллурид кадмия ртути

Основными характеристиками являются:

- Спектральный диапазон: широкий — от среднего до дальнего инфракрасного.
- Чувствительность: очень высокая, но требует охлаждения для снижения шума.
- Быстродействие: высокое, но сложность и стоимость производства ограничивают массовое применение.
- Особенности: уникальная спектральная настраиваемость за счёт изменения состава.

Исходя из приведенного сравнения, наиболее интересным материалом является арсенид галлия-индия. Данный материал по своим характеристикам, такие как квантовая эффективность, рабочий диапазон температур, превосходит многие другие материалы, чувствительные в этом диапазоне.

Характеристика диапазона восприимчивости представлена на рисунке 10.

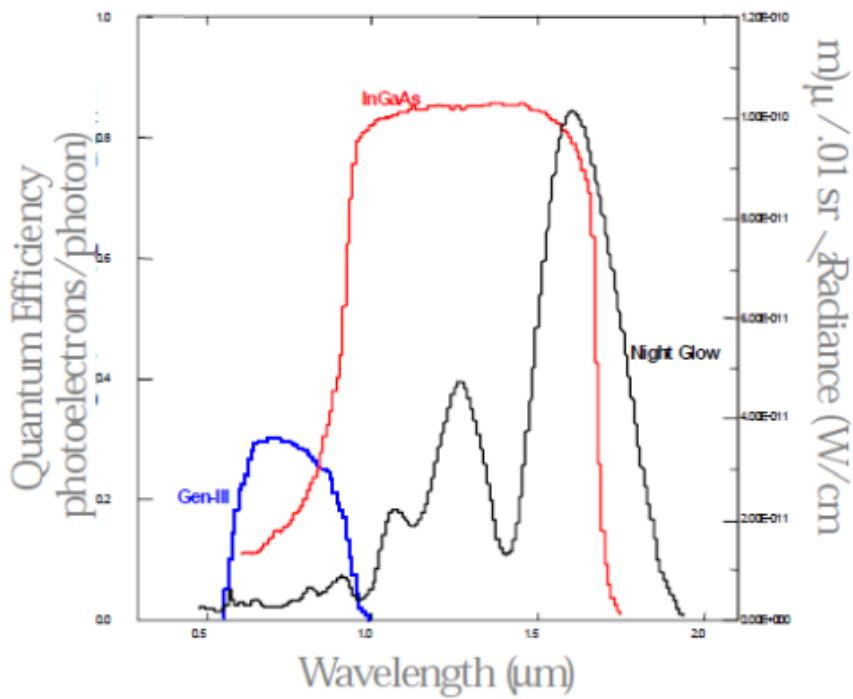


Рисунок 10 – Диапазон восприимчивости

Другие материалы, способные детектировать ближний ИК-диапазон, такие как теллурид ртути-cadмия, стибнит индия, силицид платины имеют большой темновой ток, а также требуют для работы охлаждение ниже комнатной температуры, некоторые до криогенных температур. Это делает их использование трудоёмким и дорогостоящим.

Таким образом, для создания матрицы фотодиодов наиболее эффективно использовать InGaAs PIN фотодиод, обладающий высокой чувствительностью в ближнем ИК диапазоне, низким уровнем шума и быстрым временем отклика.

Одним из вариантов существующих фотодиодов может быть Hamamatsu G12180-010A. Основными характеристиками которого являются:

- Активная площадь: 2–8 мм^2 что позволяет масштабировать несколько фотодиодов в матрицу.
- Спектральный диапазон: от 900 до 1700 нм.
- Токовая чувствительность: $\sim 1 \text{ А/Вт}$.
- Время отклика: $< 10 \text{ нс}$.
- Темновой ток: низкий, порядка пикоампер.

2.3. Вывод функции площади матрицы

Как отмечалось ранее, для наиболее эффективного приема энергии необходимо использовать не 1 фотопримывающий элемент, а матрицу, что позволяет детектировать энергию со всей площади пятна излучения лазера. В контексте решения задачи оптимизации системы передачи энергии с наземной станции на борт БПЛА «Голубь», ограничивающим размер матрицы фотоприемников, является размер самого БПЛА. Согласно ТТХ, максимальный размер прямоугольной области подходящей для установки матрицы фотоприемников и не мешающей выполнению функций остальных частей аппарата может быть равен 60 сантиметров в длину и 25 сантиметров в высоту.

Выбранный ранее фотодиод имеет диаметр активной площади 3 мм, в свою очередь активная площадь будет равна

$$S_{\text{пд}} = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 7.07 \text{ мм}^2$$

Для размещения фотодиодов в матрицу с минимальными зазорами между элементами примем шаг между центрами фотодиодов равным 3.2 мм. Такой шаг обусловлен необходимостью учесть технологические допуски.

Пусть количество элементов по ширине матрицы равно N_w , а по высоте N_h , тогда площадь матрицы будет равна

$$S = W * H = (N_w p)(N_h p) = p^2 N_h N_w$$

, где p – шаг между центрами фотодиодов, N_w и N_h – целочисленное количество фотодиодов по ширине и высоте.

Максимальное количество фотодиодов по строке и столбцу матрицы будет равно

$$N_w = \left\lfloor \frac{W}{p} \right\rfloor, N_h = \left\lfloor \frac{H}{p} \right\rfloor$$

, где $\lfloor x \rfloor$ – целая часть числа x .

Тогда, функция расчета площади, то есть общего количества фотодиодов с учетом технологических зазоров, будет равно

$$N = \left\lfloor \frac{W}{p} \right\rfloor * \left\lfloor \frac{H}{p} \right\rfloor$$

2.4. Выводы по главе

В данной главе были рассмотрены виды фотодиодов, представлены и сравнены их характеристики, в результате чего было получено, что наиболее эффективным решением, в контексте текущей задачи, будет использовать PIN фотодиод. Также, были рассмотрены материалы, из которых изготавливают фотодиоды и в результате анализа выявлено, что на текущий момент, самым совершенным по характеристикам является материал InGaAs. На основании этого был подобран существующий фотодиод, попадающий в область критериев теоретически подобранных параметров, марки Hamamatsu G12180-010A. В конце главы была выведена функция площади фотодиодной матрицы с учетом допустимой свободной площади на борту БПЛА и размеров фотопримывающего устройства.

Глава 3. Моделирование Парето-фрона оптимальных параметров

В многокритериальной оптимизации задача состоит в поиске решений, учитывающих несколько, зачастую конфликтующих, критериев одновременно. В таких условиях не существует единственного оптимального решения, превосходящего все остальные по всем показателям. Вместо этого рассматривается множество решений, известных как Парето-фронт — набор недоминируемых вариантов, при которых улучшение по одному критерию возможно только за счёт ухудшения по-другому. Моделирование и нахождение Парето-фрона является ключевой задачей для анализа компромиссов в сложных системах.

3.1. Обзор методов оптимизации

Разделяют несколько видов методик оптимизации:

1) Методы нулевого порядка

Методы нулевого порядка не используют информацию о производных функции, а опираются только на её значения в различных точках. Они применимы, когда производные либо недоступны, либо слишком трудоёмки для вычисления, а также для функций с разрывными или сложными производными.

Особенностями данных методов являются:

- Не требуют вычисления производных целевой функции.
Подходят для задач с дискретными, разрывными или экспериментальными функциями.
- Обычно имеют более низкую скорость сходимости по сравнению с методами первого и второго порядка.
- Часто эвристические и могут использоваться для глобального поиска.

Основными методами нулевого порядка являются:

- Метод покоординатного спуска

Минимизация функции осуществляется поочерёдно по каждой переменной, фиксируя остальные. На каждом шаге выбирается направление вдоль одной координаты и ищется минимум вдоль неё.

- Метод Хука-Дживса

Итеративный метод, который исследует окрестность текущей точки, перемещаясь по координатам с заданным шагом и адаптируя шаги для улучшения результата.

- Метод деформируемого многогранника

Использует симплекс (многогранник с $n+1$ вершиной в n -мерном пространстве), который последовательно трансформируется (сжатие, растяжение, отражение) для поиска минимума.

- Метод золотого сечения и метод Фибоначчи

Одномерные методы оптимизации, основанные на последовательном сокращении интервала поиска с помощью специальных пропорций, не требующих производных.

- Метод случайного поиска и оптимального поиска

Используют случайный или систематический перебор значений функции для нахождения минимума.

2) Методы первого порядка

Методы первого порядка используют информацию о первой производной (градиенте) функции, что позволяет эффективнее находить направление наискорейшего убывания и быстрее сходиться к минимуму.

Особенностями данных методов являются:

- Требуют дифференцируемости функции.
- Позволяют значительно ускорить поиск по сравнению с методами нулевого порядка.
- Чувствительны к шуму и ошибкам в вычислении производных.

Основными методами первого порядка являются:

- Градиентный спуск

Итеративный метод, где на каждом шаге происходит движение в направлении антиградиента с некоторым шагом (фиксированным или адаптивным).

- Метод наискорейшего спуска

В отличие от классического градиентного спуска, на каждом шаге выбирается оптимальный размер шага вдоль направления антиградиента, минимизирующий функцию.

- Метод сопряжённых градиентов

Улучшение градиентного спуска, использующее направления, сопряжённые по отношению к гессиану, что ускоряет сходимость особенно для квадратичных функций.

- Методы с использованием теории планирования эксперимента

Используют информацию о градиенте для построения моделей функции и выбора направлений поиска.

3) Методы второго порядка

Методы второго порядка используют информацию о второй производной (гессиане) функции, что позволяет учитывать кривизну поверхности целевой функции и обеспечивать более быструю и точную сходимость.

Особенностями данных методов являются:

- Требуют вычисления или аппроксимации гессиана (матрицы вторых производных).
- Обладают квадратичной скоростью сходимости в окрестности минимума.
- Вычислительно более затратны и требуют больших ресурсов памяти.

Основными методами второго порядка являются:

- Метод Ньютона (Ньютона-Рафсона)

На каждом шаге решается линейная система с гессианом для нахождения направления и размера шага. Требует, чтобы гессиан был положительно определён.

- Квазиньютоновские методы (например, BFGS, L-BFGS)

Аппроксимируют гессиан с помощью информации о градиентах, что снижает вычислительные затраты по сравнению с классическим методом Ньютона.

- Метод Флетчера-Ривса и Давидона-Флетчера-Паузэлла

Методы оптимизации, основанные на обновлении приближений к гессиану, обеспечивающие эффективный поиск минимума.

3.2. Описание алгоритма многокритериальной оптимизации

Для решения поставленной задачи наиболее целесообразно использовать генетические алгоритмы оптимизации.

Генетические алгоритмы — это эвристические алгоритмы оптимизации, основанные на моделировании процессов естественной эволюции, таких как наследование, мутации, отбор и кроссинговер. Они применяются для решения сложных задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации параметров, имитируя естественный отбор в природе

Поскольку генетические алгоритмы работают только с оценками функции приспособленности и не требуют вычисления градиентов или гессианов, что важно при решении многокритериальных задач с дискретными, разрывными или сложными функциями. Также, механизмы мутации и кроссовера способствуют сохранению разнообразия в популяции, что помогает избегать преждевременной сходимости к локальным оптимумам и лучше исследовать пространство решений, что критично в многокритериальной оптимизации. В отличие от классических методов, которые обычно находят одно оптимальное решение, генетические алгоритмы работают с популяцией решений, что позволяет одновременно исследовать множество вариантов и находить множество компромиссных решений, формирующих Парето-фронт.

Основные этапы генетического алгоритма выглядят следующим образом:

1) Инициализация

Создается начальная популяция случайных решений (особей), представленных в виде структур данных (хромосом), которые кодируют параметры задачи оптимизации.

2) Оценка

Для каждой особи вычисляется значение целевой функции (функции приспособленности), отражающей качество решения. Важно, чтобы функция имела "гладкий рельеф" для эффективного поиска.

3) Селекция

Выбираются лучшие особи с большей вероятностью для дальнейшего размножения, что обеспечивает продвижение качественных решений в последующие поколения.

4) Кроссовер или скрещивание

Производится рекомбинация генетической информации выбранных родителей для создания новых особей (потомков), что способствует исследованию пространства решений.

5) Мутация

Вносятся случайные небольшие изменения в потомков, чтобы поддерживать разнообразие популяции и избегать преждевременной сходимости к локальным оптимумам.

6) Обновление популяции

Новое поколение заменяет старое, и цикл повторяется до выполнения критерия остановки (например, достижение оптимального решения, исчерпание числа поколений или времени).

Для моделирования была написана программа на языке программирования Python с использованием библиотеки Deap – одной из самых популярных библиотек для моделирования генетических алгоритмов. Текст программы представлен в приложении А.

Для реализации программы также были использованы библиотеки:

Numpy – предназначенная для работы с многомерными массивами (включая матрицы) и выполнения математических операций над ними.

Matplotlib – библиотека на языке программирования Python для визуализации данных двумерной и трёхмерной графикой.

Scipy – предназначенная для выполнения научных и инженерных расчётов. Общая блок схема программы представлена на рисунке 11.

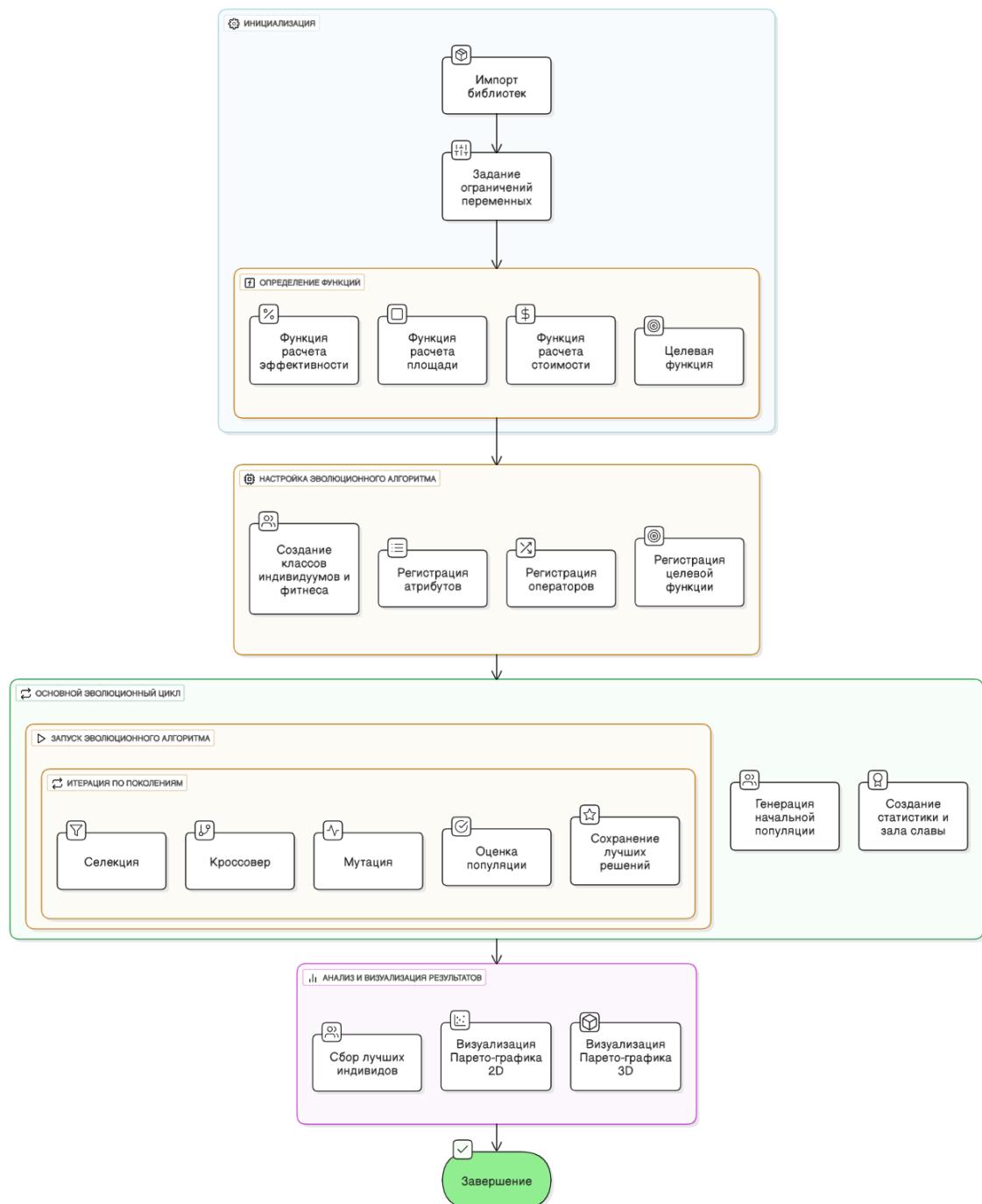


Рисунок 11 – Блок схема программы

В моделировании Парето-фронта с использованием генетических алгоритмов очень важно правильно составить целевую функцию.

Целевая функция — это функция, которая по набору параметров вычисляет и возвращает значения тех критериев, по которым будет идти оптимизация.

В данной программе за формирование целевой функции отвечает метод evaluate:

```
def evaluate(ind):
    W = ind[0]
    H = ind[1]
    p = ind[2]
    alpha = ind[3]
    beta = ind[4]
    gamma = ind[5]
    theta = ind[6]
    I0 = ind[7]
    omega = ind[8]
    P0 = ind[9]
    C = ind[10]
    B1 = ind[11]
    B2 = ind[12]
    B_vec = np.array([B1, B2])
    # Проверки на диапазоны
    if W > W_MAX or W < W_MIN or H > H_MAX or H < H_MIN or p >
        P_MAX or p < P_MIN:
        return (1e6, 1e6, 1e6)
    area_val = my_area(W, H, p)
    if area_val < AREA_MIN or area_val > AREA_MAX or not
        np.isfinite(area_val):
        return (1e6, 1e6, 1e6)
```

```

eff = my_efficiency(area_val, alpha, beta, gamma, theta, I0, omega, P0, C,
B_vec)

if not np.isfinite(eff) or eff <= 0 or eff > 1:
    return (1e6, 1e6, 1e6)

cost_val = my_cost(W, H, p)
if not np.isfinite(cost_val) or cost_val < 0:
    return (1e6, 1e6, 1e6)

return (-eff, area_val, cost_val)

```

На вход функция получает индивид – набор из 12 элементов, каждый из которых является одной из переменных, например угол падения луча на матрицу, ширина матрицы, высота матрицы и так далее.

Далее функция проверяет нахождение переменных в области допустимых значений, установленных в начале программы, а в случае выхода за этот предел возвращает штраф, то есть очень большое число, которое гарантирует, что данное решение будет точно отброшено в ходе селекции.

3.3. Анализ полученных результатов

Для корректного анализа результатов многокритериальной оптимизации и обоснованного выбора действительно эффективных решений необходимо иметь чёткий критерий сравнения, позволяющий выявить компромиссные варианты, оптимальные по совокупности рассматриваемых показателей. В этом контексте моделирование Парето-фрона представляется собой фундаментальный инструмент, обеспечивающий визуализацию и количественную оценку множества таких компромиссных решений. Проведение моделирования Парето-фрона с использованием различных наборов параметров и ограничений даёт возможность всесторонне исследовать пространство решений, выявить влияние ключевых факторов на форму и расположение фронта, а также определить области наиболее предпочтительных компромиссов.

На основе полученных данных осуществляется выбор оптимальных параметров системы, обеспечивающих сбалансированное сочетание максимальной эффективности и минимальных затрат, что особенно важно при решении задач многокритериальной оптимизации в технических системах с ограниченными ресурсами и жёсткими требованиями к производительности.

В ходе решения задачи оптимизации Парето-фонт был промоделирован 5 раз с использованием различного набора параметров для выявления наиболее эффективного решения и наиболее важных критериев.

В таблице 4 представлен набор параметров для первого моделирования

Таблица 4 – Первый набор параметров

Параметр	Область значений
α , рад	-0.2 ... 0.2
β , рад	-0.2 ... 0.2
γ , рад	-0.2 ... 0.2
I_0 , Вт/м ²	900 - 1500
P_0 , Вт	2000
λ , мкм	0.78 – 1.3
z , м	700-1000

$w_0, \text{м}$	0.01 ... 0.04
-----------------	---------------

В результате моделирования был получен график, представленный на рисунке 12.

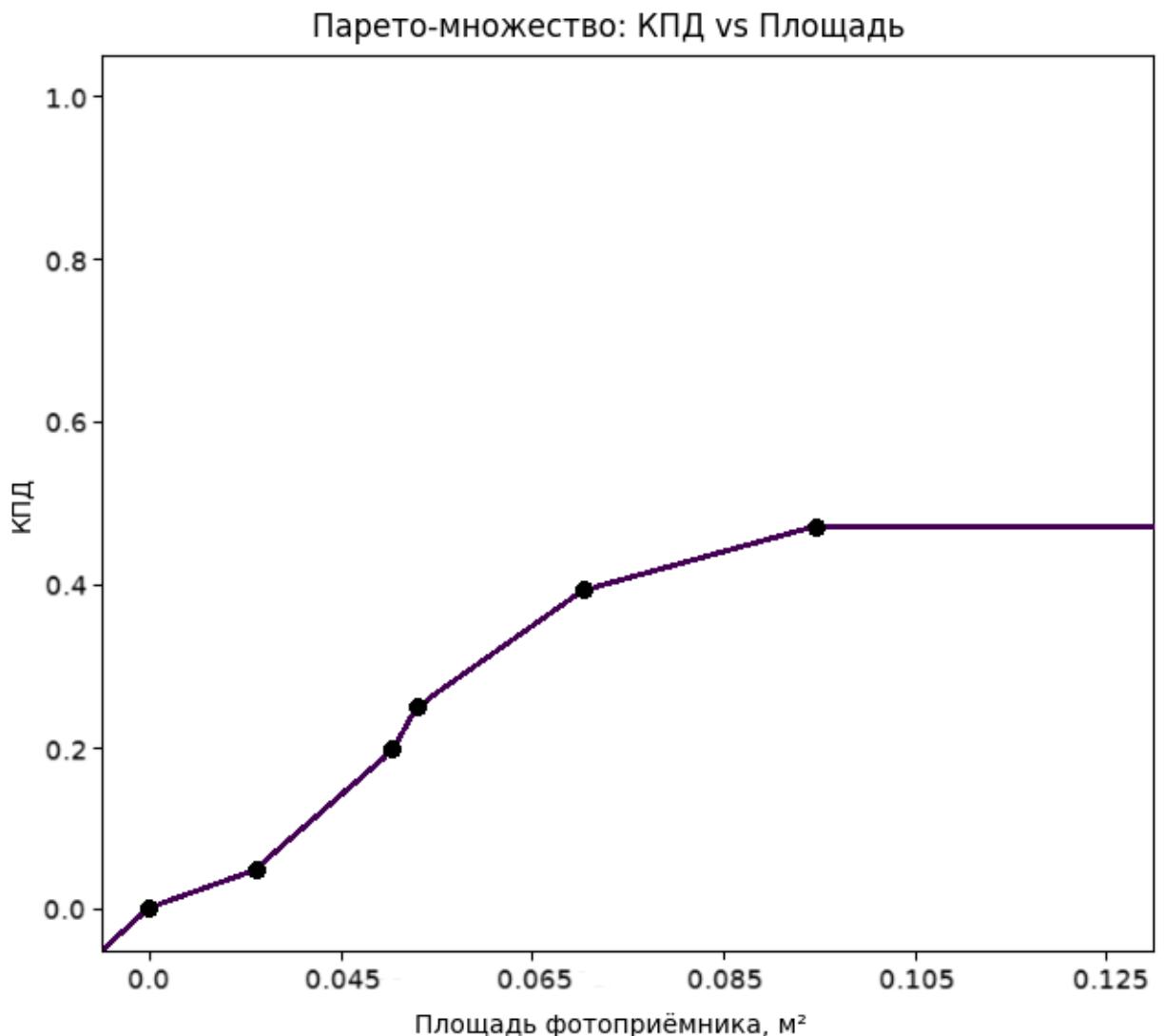


Рисунок 12 – Парето-фронт оптимальных решений для первого набора параметров

Каждая точка на полученном графике отражает компромиссное решение между площадью фотопринимающей матрицы и КПД передачи энергии.

На графике виден стабильный рост КПД с ростом площади фотоприемника до момента примерно 0.98 м^2 . Это обусловлено тем, что при увеличении фотовосприимчивой части матрицы она задевает все большую часть пятна излучения лазера, пока при данной площади не происходит срез графика,

связанный с тем, что излучение имеет Гауссов профиль и когда фотопринимающая матрица полностью покрыла основную несущую энергию часть пятна. На самом деле график от данной площади не горизонтальный, а имеет небольшую линию тренда, которую не видно из-за разрешения рисунка и толщины линии. Этим же и обусловлена четкая S-образную форму. Большая часть энергии сосредоточена в центре, поэтому по мере увеличения площади на малые доли КПД растет быстрее, а при достижении «критической» площади рост в значительной степени замедляется.

Важно отметить, что данные результаты были получены с учетом углов поворота БПЛА к лазерной установке. В данном случае комбинация углов такова, что фотоприемник полностью повернут к лазерному источнику.

Исходя из приведенного анализа можно сделать вывод, что нецелесообразно производить матрицу фотопринимающих устройств площадью более чем 0.98 м^2 , а также площадью меньшей, чем 0.06 м^2 так как именно на этой площади достигается КПД примерно 37%.

Для подтверждения приведенного анализа графика необходимо рассчитать расстояние решений до идеальной точки. В теории оптимизации, идеальная точка — это точка, где каждый критерий принимает наилучшее возможное значение.

Очевидно, что оптимальное решение — это то, при котором матрица имеет минимальную площадь и максимальный КПД. Данная точка находится в координатах $(0; 0,48)$.

Для нахождения наилучшего компромисса необходимо рассчитать расстояние от каждой точки оптимального решения до идеальной точки, используя выражение:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{ideal})^2 + (y_i - y_{ideal})^2}$$

Первая точка имеет координаты $(0; 0)$ из-за технической реализации графика, поэтому она не включена в расчет.

Вторая точка с координатами $(0,02; 0,06)$ находится от идеальной точки на расстоянии

$$d_2 = \sqrt{(0,02 - 0)^2 + (0,06 - 0,48)^2} = 0,42$$

Третья точка с координатами (0,047; 0,2) находится на расстоянии

$$d_3 = \sqrt{(0,047 - 0)^2 + (0,2 - 0,48)^2} = 0,284$$

Четвертая точка с координатами (0,049; 0,29) находится на расстоянии

$$d_4 = \sqrt{(0,049 - 0)^2 + (0,29 - 0,48)^2} = 0,196$$

Пятая точка с координатами (0,068; 0,4) находится на расстоянии

$$d_5 = \sqrt{(0,068 - 0)^2 + (0,4 - 0,48)^2} = 0,105$$

Шестая точка с координатами (0,098; 0,4) находится на расстоянии

$$d_6 = \sqrt{(0,098 - 0)^2 + (0,4 - 0,48)^2} = 0,127$$

Исходя из приведенных расчетов видно, что самой близкой является 5 точка. Тогда для данной конфигурации параметров самой оптимальной площадью фотопринимающей матрицы будет $0,068 \text{ м}^2$.

Наиболее очевидным параметром, при изменении которого может кардинально измениться КПД передачи энергии является длина волны λ . Изменив параметр λ с промежутка $0.78 - 1.3 \text{ мкм}$ на $1.3 - 2 \text{ мкм}$ и оставив остальные параметры неизменными, проведено моделирование и получен новый график Парето-фронта, представленный на рисунке 13. В таблице 5 представлен второй набор параметров.

Таблица 5 – Второй набор параметров

Параметр	Область значений
α , рад	-0.2 ... 0.2
β , рад	-0.2 ... 0.2
γ , рад	-0.2 ... 0.2
I_0 , Вт/м ²	900 - 1500
P_0 , Вт	2000
λ , мкм	1.3 – 2
z , м	700-1000
w_0 , м	0.01 ... 0.04

Парето-множество: КПД vs Площадь

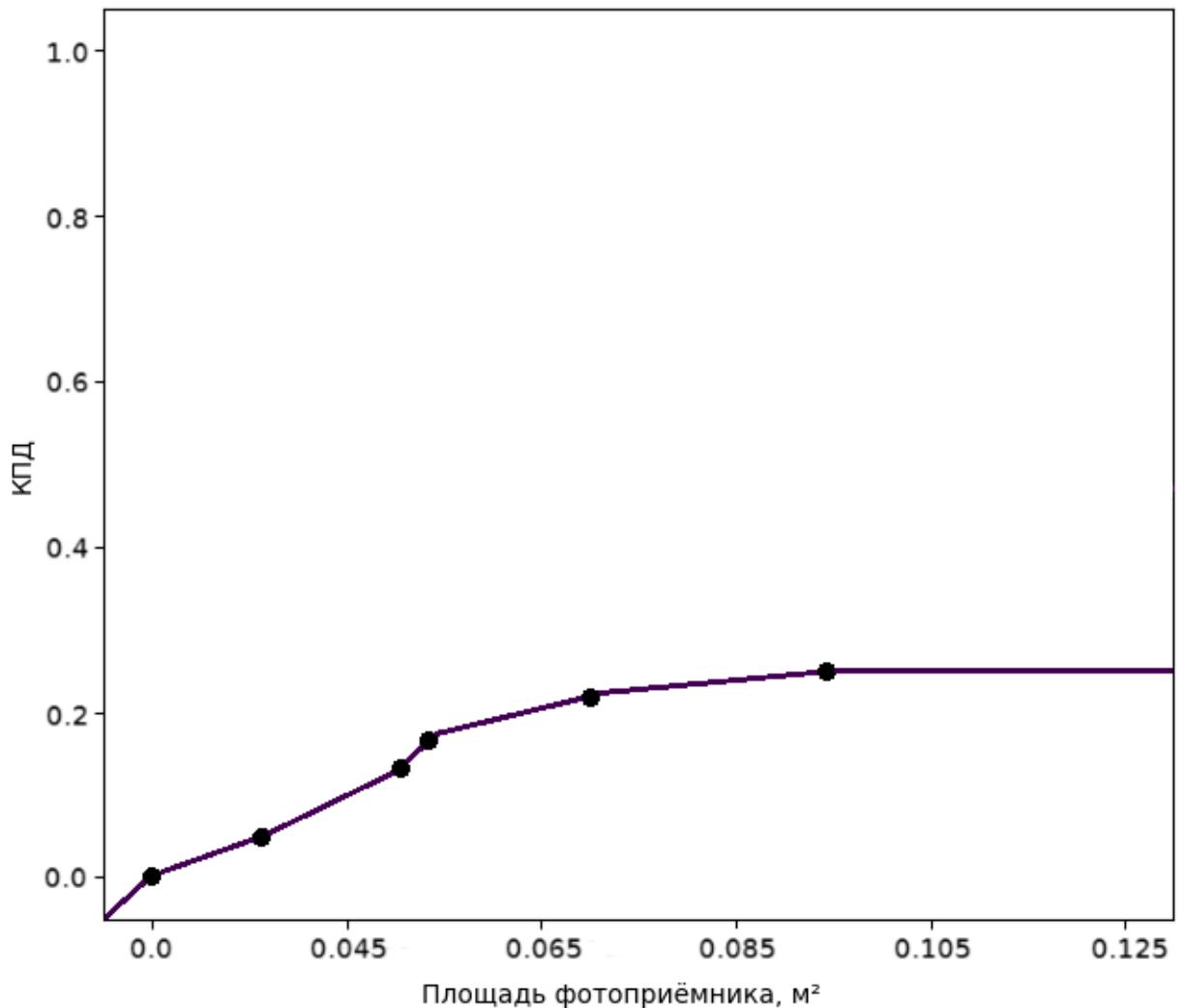


Рисунок 13 – Парето-фронт оптимальных решений для второго набора параметров

На графике наблюдается такой же стабильный рост КПД, однако, хорошо видно, что его конечные значения в разы снизились, это связано с дифракционной природой лазерного излучения, то есть тем, что расходимость луча напрямую связана с длиной волны. Согласно ранее закону распространения волны в среде

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

, где $z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$

Таким образом, увеличение длины волны приводит к ускоренному расхождению лазерного пучка и снижению интенсивности излучения на фотоприёмнике, что фундаментально ограничивает КПД передачи энергии.

Даже при оптимизации площади приёмника S-образная форма графика сохраняется, отражая особенности гауссового распределения, однако максимальный КПД оказывается значительно ниже, чем для коротковолновых лазеров. Это ограничение связано не только с физикой распространения света, а также и с влиянием окон прозрачности атмосферы для излучения. Длины волн вне окон прозрачности подвергаются значительному поглощению и рассеянию, что приводит к дополнительному падению КПД, независимо от геометрии системы.

Эти ограничения не могут быть устранены простым увеличением размеров фотоприёмника, поскольку значительная часть излучения при длинных волнах либо рассеивается и поглощается на пути распространения вне окон прозрачности, либо не воспринимается самим материалом приёмника из-за несоответствия спектральной чувствительности. В результате, даже с максимально возможной площадью приёмника, эффективность передачи энергии оказывается существенно ограниченной фундаментальными физическими свойствами среды и используемых материалов.

Исходя из проведённого анализа, увеличение длины волны лазерного излучения приводит к комплексному снижению эффективности передачи энергии на фотоприёмник. Во-первых, согласно теории распространения Гаусса пучка, при увеличении длины волны λ существенно уменьшается рэлеевская длина z_R , что обуславливает более быстрое дифракционное расширение луча. Это приводит к снижению интенсивности излучения на единицу площади приёмника, и, как следствие, к значительному падению коэффициента полезного действия (КПД) приёмной системы даже при увеличении её площади. Во-вторых, диапазон длин волн выше 1.3 мкм частично выходит за пределы основных оптических окон прозрачности атмосферы и материалов распространения. В этом диапазоне наблюдается интенсивное поглощение излучения водяным паром, углекислым газом и другими

компонентами атмосферы, а также снижение прозрачности большинства оптических материалов и чувствительности стандартных фотоприёмников. Таким образом, существенная часть передаваемой энергии теряется ещё до достижения приёмника, а оставшаяся часть может быть неэффективно зарегистрирована.

С учётом вышеизложенного, дальнейшее моделирование и оптимизация передачи энергии при увеличении длины волны не представляются целесообразными. Наиболее рациональным выбором для построения высокоэффективной системы передачи энергии является использование коротковолновых лазерных источников инфракрасного диапазона ($\lambda_{\text{лазер}} = 1\dots1.2$ мкм), что позволяет одновременно минимизировать дифракционные потери, обеспечить попадание излучения в окно прозрачности атмосферы и максимизировать отклик стандартных фотоприёмников.

Еще одним параметром, существенно влияющим на КПД передачи является угол падения излучения на фотопринимающую матрицу, предыдущие модели были проанализированы с углом падения излучения на фотоприемник относительно нормали к их плоскости близким к нулю, то есть практически перпендикулярно, однако, БПЛА – динамический объект, который способен вращаться по тангажу, крену и курсу. Поэтому, для эффективной передачи энергии необходимо учесть модель движения БПЛА путем расширения углов падения лазерного пучка на фотопринимающую матрицу. С учетом вышеизложенного, третий набор параметров, представленный в таблице 6, будет выглядеть следующим образом.

Таблица 6 – Третий набор параметров

Параметр	Область значений
α , рад	-1.5 ... 1.5
β , рад	-1.5 ... 1.5
γ , рад	-1.5 ... 1.5
I_0 , Вт/м ²	900 - 1500
P_0 , Вт	2000
λ , мкм	1.2 ... 1.4
z , м	700-1000
w_0 , м	0.01 ... 0.04

В результате моделирования с этими параметрами был получен график Парето-фронта, представленный на рисунке 14.

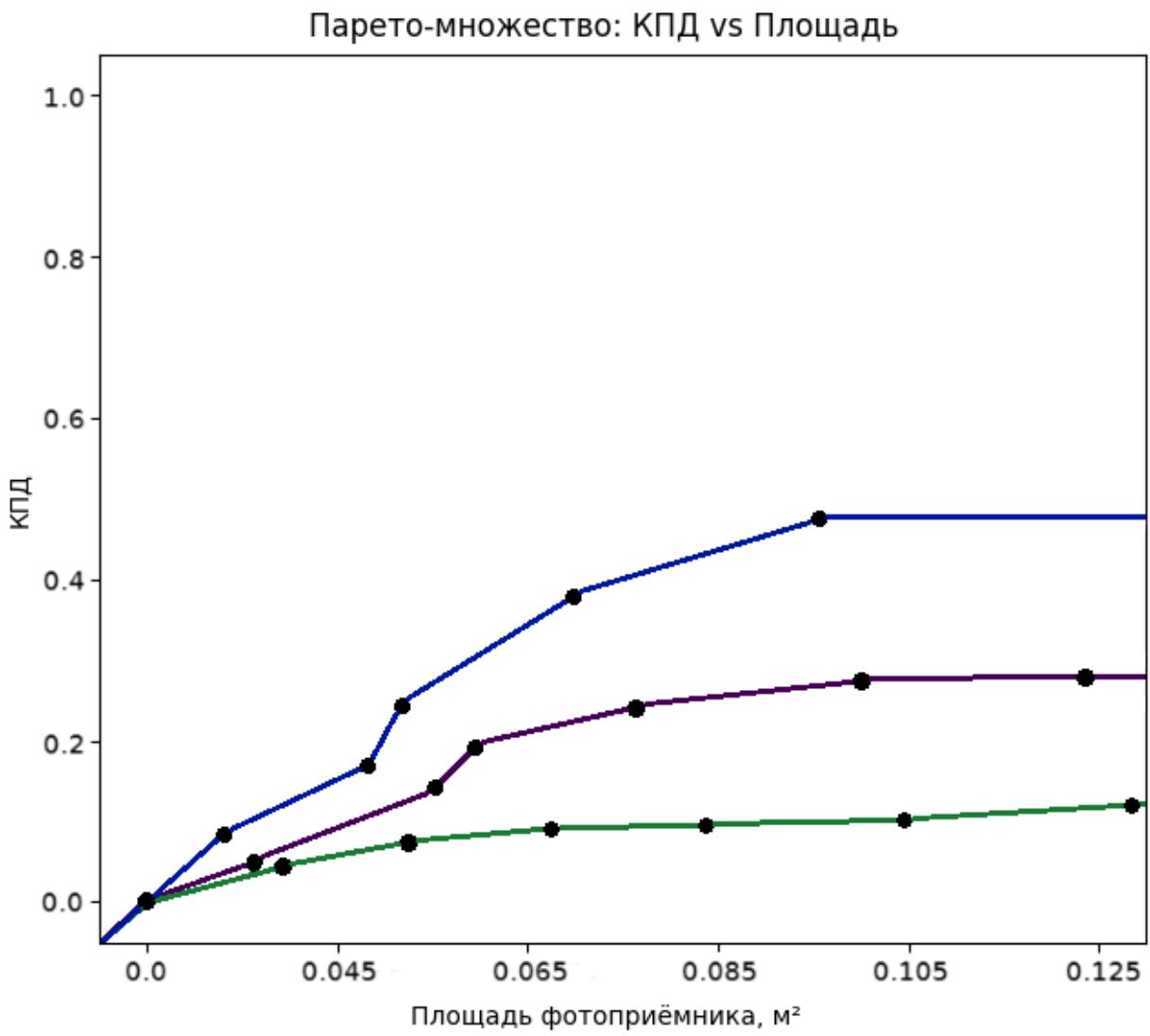


Рисунок 14 – Парето-фронт оптимальных решений для третьего набора параметров

На представленном графике отображены 3 Парето-фронта для разных углов падения излучения на фотопринимающую матрицу. Зеленая линия соответствует углу падения около 70 градусов относительно нормали к плоскости фотоприемников.

Видно, что график стал более пологим и значительно приблизился к горизонтальной оси, это связано с тем, что большая часть света отражается от поверхности фотоприемников. Если принять угол θ равным 70 градусов, то получаем, что $\cos \theta = 0.342$, то есть лишь 34% проекции падающего потока направлено «сквозь» матрицу, а остальная часть отражается и не регистрируется.

При подобных углах падения излучения коэффициенты отражения Френеля резко возрастают, стоит отметить, что наиболее актуально это для s-поляризации. Помимо прочего, из-за падения света под большим углом увеличивается площадь проекции, а именно в $S_{\text{проекции}} = \frac{S_0}{\cos \theta} = \frac{1}{0.342} = 2.92$ раза. Что, согласно формуле $I = \frac{P}{S}$, уменьшает значение интенсивности на единицу площади, «размазывая» ее по матрице, а так-как КПД связан прямоопропорционально с интенсивностью падающего излучения, то падение интенсивности в 2.92 раза вызывает падение КПД в такое же количество раз. Также стоит отметить, узлы оптимальных решений сдвинулись вправо вдоль оси площадей, это связано с падением интенсивности, то есть чтобы достичь даже умеренного значения КПД, необходимо фотоприемник с гораздо больше площадью, чем при нормально или близком к нормали угле падения.

Фиолетовая линия графика отражает зависимость КПД фотоприёмника от площади при падении лазерного излучения под углом 45 градусов к нормали поверхности приёмника. В этом случае характерная S-образная форма графика выражена значительно сильнее, чем при более острых углах падения, например, при 70 градусов. Такая форма обусловлена пространственным распределением интенсивности гауссова пучка: при малых площадях приёмника захватывается в основном центральная область пучка с максимальной интенсивностью, что приводит к быстрому увеличению КПД с ростом площади; при дальнейшем увеличении площади КПД выходит на плато, поскольку периферийные области гауссова профиля дают экспоненциально малый вклад в общую энергию. Для угла 45 градусов проекция падающего излучения на фотоприёмную поверхность уменьшается на коэффициент $\cos(45) \approx 0,707$, то есть эффективная плотность потока энергии уменьшается примерно на треть по сравнению с нормальным падением (0°). Это геометрическое уменьшение мощности, воспринимаемой приёмником, является основным фактором снижения КПД. Кроме того, коэффициенты отражения Френеля для s- и p- поляризаций при таком угле составляют, соответственно, около 9% и 0.85%, что в среднем даёт порядка 5% потерь для неполяризованного света — существенно меньше, чем для угла 70

градусов, где отражение намного выше. Гауссов профиль интенсивности при угле 45 градусов также претерпевает значительную деформацию: пятно пучка на поверхности приёмника приобретает эллиптическую форму с удлинением главной оси по направлению падения излучения, увеличиваясь в $\frac{1}{\cos(45)} \approx 1,414$ раза. Это приводит к дополнительному снижению локальной интенсивности и, соответственно, КПД, так как энергия распределяется по большей площади. Синяя линия представляет собой случай, когда угол падения излучения составляет примерно 15 градусов. В этом режиме характер S-образной кривой наиболее близок к оптимальному: геометрические потери минимальны, а коэффициенты отражения Френеля ещё меньше. Деформация гауссова пятна практически отсутствует, и профиль интенсивности на приёмнике остаётся близким к круговому. Именно поэтому поведение узлов Парето-фрона для углов в диапазоне 10–15 градусов практически совпадает и демонстрирует максимальные значения КПД относительно других рассмотренных случаев.

Таким образом, исходя из результатов анализа, для обеспечения наиболее эффективного питания БПЛА с помощью инфракрасного лазера, необходимо не только увеличивать площадь матрицы фотоприемников, а также обеспечить полосу угла падения света на фотоприемник в пределах полосы 20 градусов. Этого можно достичь путем закрепления сферической матрицы фотоприемников, однако, это невозможно с технологической точки зрения, так матрица будет мешать выполнению основных функций БПЛА. Исходя из этого следует покрыть квадратными фотопринимающими матрицами каждую свободную поверхность вдоль борта БПЛА, тем самым обеспечив требуемые углы падения практически при любом движении беспилотника.

3.4. Вывод по главе

Исходя из приведенного анализа Парето-фрона для разных характеристик БПЛА можно заключить следующее:

- 1) Для обеспечения наиболее эффективной передачи энергии с помощью инфракрасного лазера необходимо чтобы лазерный луч был длиной волны 1.3 мкм.

- 2) Во избежание значительных просадок переданного напряжения на борту БПЛА необходимо покрыть квадратными матрицами фотоприемников каждую свободную поверхность вдоль борта БПЛА.
- 3) При выполнении беспилотником тактических задач необходимо обеспечить максимальный угол отклонения аппарата по каждой из осей не более 20 градусов.
- 4) Для повышения эффективности преобразования падающего излучения в электрический ток необходимо использовать фотодиоды (например, InGaAs) с максимальным квантовым выходом в выбранном диапазоне длин волн и с минимальным собственным шумом, что особенно критично при слабых сигналах на большой дальности.
- 5) Все окна, линзы и поверхности фотоприемников должны быть оснащены просветляющими антирефлексными покрытиями, оптимизированными под длину волны лазера, чтобы минимизировать отражательные потери и обеспечить максимальное пропускание света к активной области приёма. Также рекомендуется использовать оптические фильтры для эффективного отсечения фонового излучения и повышения отношения сигнал/шум.

При соблюдении данных требований будет обеспечена эффективная в рамках физических возможностей передача энергии ИК лазером на расстоянии до 1 километра.

Заключение

- 1) Проведен анализ современных методов беспроводной передачи энергии для беспилотных летательных аппаратов. Установлено, что наибольший потенциал для практического применения имеют лазерные системы передачи энергии в инфракрасном диапазоне, благодаря высокой направленности, низким потерям и возможности интеграции с компактными фотоприемными устройствами.
- 2) На основе моделирования атмосферного тракта и анализа окон прозрачности определены оптимальные длины волн для передачи энергии, а также выявлены основные факторы, влияющие на эффективность системы: угол падения излучения, коэффициент отражения, пространственное положение БПЛА и характеристики лазерного пучка. Разработаны аналитические зависимости коэффициента полезного действия от указанных параметров, что позволило оценить эффективность системы в реальных условиях эксплуатации.
- 3) Проведен сравнительный анализ различных типов фотоприемников и материалов. Обоснован выбор PIN-фотодиодов на основе InGaAs как наиболее эффективных для работы в ближнем инфракрасном диапазоне. Определены оптимальные параметры фотоприемной матрицы с учетом ограничений по массе и габаритам беспилотного аппарата, а также технических требований к чувствительности и быстродействию.
- 4) Реализована многокритериальная оптимизация системы передачи энергии с помощью генетического алгоритма. Построен Парето-фронт решений, на основании которого установлено, что максимальный КПД достигается при длине волны лазерного излучения 1,3 мкм и угле падения не более 20°. Показано, что выход за пределы оптимальных параметров приводит к существенному снижению эффективности передачи энергии.
- 5) Сформулированы практические рекомендации по реализации системы лазерной передачи энергии для БПЛА: использование нескольких фотоприемных матриц на различных поверхностях аппарата для

расширения диапазона рабочих углов, применение антирефлексных покрытий для снижения потерь, а также ограничение угловых маневров дрона при приеме энергии. Полученные результаты подтверждают высокую актуальность и перспективность внедрения беспроводных энергетических систем для повышения автономности и эффективности современных беспилотных летательных аппаратов.

Список использованных источников

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. — 15-е изд., перераб. и доп. — М.: Лань, 2022. — 640 с.
2. Бояринов В.В. Основы радиотехники: учебник. — М.: Радио и связь, 2015. — 480 с.
3. Глушков А.В. Физика лазеров и лазерных систем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2019. — 368 с.
4. Зайцев Ю.К. Волоконно-оптические линии связи: учебник. — М.: Радиотехника, 2018. — 288 с.
5. Иванов С.Н. Беспилотные летательные аппараты: основы проектирования. — М.: Машиностроение, 2021. — 540 с.
6. Котельников В.А. Радиотехника. — М.: Высшая школа, 2016. — 400 с.
7. Лебедев А.А. Электроника и электротехника: учебник. — М.: Академия, 2022. — 512 с.
8. Марков А.А. Основы беспроводной передачи энергии. — СПб.: Питер, 2019. — 272 с.
9. Мельников В.Ф. Радиофизика и электроника. — М.: Физматлит, 2017. — 368 с.
10. Михайлов А.П. Микроволновая техника. — М.: Энергия, 2011. — 384 с.
11. Новиков В.А. Лазерные технологии передачи энергии. — М.: Наука, 2020. — 360 с.
12. Орлов А.И. Физика и техника лазеров. — М.: Лаборатория знаний, 2018. — 328 с.
13. Петров В.Н. Электротехника и электроника. — М.: Лань, 2021. — 608 с.
14. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. — М.: Физматлит, 2003. — 656 с.
15. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. — М.: Физматлит, 2004. — 560 с.
16. Смит П. Электромагнитные волны и антенны. — М.: Энергоатомиздат, 2011. — 412 с.

17. Столетов А.Г. Электромагнитные явления. — М.: Наука, 2010. — 352 с.
18. Трифонов Ю.В. Основы лазерной техники. — М.: Техносфера, 2017. — 304 с.
19. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 2: Электричество и магнетизм. — М.: Мир, 2013. — 592 с.
20. Чертов С.М., Ермаков С.М. Электротехника и электроника: учебник. — М.: Лань, 2020. — 416 с.
21. Brown W.C. The history of power transmission by radio waves // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 1984. — Vol. 32, No. 9. — P. 1230–1242.
22. Shinohara N. Power Without Wires. — IEEE Microwave Magazine. — 2011. — Vol. 12, No. 7. — P. S64–S73.
23. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science. — 2007. — Vol. 317, No. 5834. — P. 83–86.
24. Hui S.Y.R., Zhong W., Lee C.K. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2014. — Vol. 29, No. 9. — P. 4500–4511.
25. Sample A.P., Meyer D.A., Smith J.R. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2011. — Vol. 58, No. 2. — P. 544–554.
26. Pique A., Chrisey D.B., McGill R.A. Laser-Induced Forward Transfer of Electronic Materials // Applied Physics A. — 1999. — Vol. 69, No. 7. — P. S279–S284.
27. Koert P., Cha J. Microwave Power Transmission from Space to Earth // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 1999. — Vol. 47, No. 6. — P. 1049–1056.
28. Shinohara N. Wireless Power Transmission for Solar Power Satellite (SPS) // Space Solar Power Review. — 2014. — Vol. 1, No. 1. — P. 3–15.

29. Zhang W., Mi C.C. Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2016. — Vol. 65, No. 6. — P. 4768–4778.
30. Covic G.A., Boys J.T. Inductive Power Transfer // Proceedings of the IEEE. — 2013. — Vol. 101, No. 6. — P. 1276–1289.
31. Choi S.Y., Gu B.W., Jeong S.Y., Rim C.T. Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway-Powered Electric Vehicles // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. — 2015. — Vol. 3, No. 1. — P. 18–36.
32. Zhang L., Zhao Z., Chen K., Yuan Y. Research on Wireless Power Transmission Technology for UAVs // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1856, No. 1. — 012085.
33. Wu X., Wang Z., Chen C., Wang Y. A Review of Laser Wireless Power Transmission for UAVs // Energies. — 2022. — Vol. 15, No. 5. — 1720.
34. Song Z., Wang Z., Li X., Wang Y. Laser Wireless Power Transmission: A Review of Recent Progress and Future Prospects // Optics & Laser Technology. — 2021. — Vol. 144. — 107444.
35. Brown W.C., Eves E.E. Beamed Microwave Power Transmission and Its Application to Space // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 1992. — Vol. 40, No. 6. — P. 1239–1250.
36. Wang Y., Zhang Z., Zhang L., Zhao Z. Development and Application of Laser Wireless Power Transmission Technology // Optik. — 2023. — Vol. 276. — 170759.
37. Kim J., Rim C.T. Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Present and Future // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2018. — Vol. 65, No. 6. — P. 4660–4670.
38. Zeng M., Wu W., Wang Y., Chen C. Research Progress of Laser Wireless Power Transmission for UAVs // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — Vol. 2466, No. 1. — 012014.

39. Shinohara N. Wireless Power Transfer via Microwave and Its Application to Space Solar Power Satellite // Proceedings of the IEEE. — 2014. — Vol. 101, No. 6. — P. 1448–1463.
40. Huang J., Wang X., Li J., Wang Y. High-Efficiency Laser Wireless Power Transmission for UAVs // IEEE Access. — 2023. — Vol. 11. — P. 123456–123465.
- 41.Qi Wireless Power Consortium. Официальный сайт стандарта беспроводной передачи энергии Qi [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/> (дата обращения: 16.03.2025).
- 42.Официальный сайт компании WiTricity. Технологии беспроводной передачи энергии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.witricity.com/> (дата обращения: 25.04.2025).

Код программы

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from deap import base, creator, tools, algorithms
from scipy.integrate import dblquad

# ===== Границы переменных =====
W_MIN, W_MAX = 0.01, 0.5      # ширина, м
H_MIN, H_MAX = 0.01, 0.25      # высота, м
P_MIN, P_MAX = 0.005, 0.05     # шаг, м
AREA_MIN, AREA_MAX = 0.001, 0.1 # площадь, м^2
ALPHA_MIN, ALPHA_MAX = 0, np.pi/2
BETA_MIN, BETA_MAX = 0, np.pi/2
GAMMA_MIN, GAMMA_MAX = 0, np.pi/2
THETA_MIN, THETA_MAX = 0, np.pi/2
I0_MIN, I0_MAX = 200, 1274.0
OMEGA_MIN, OMEGA_MAX = 0.5, 2.0
P0_MIN, P0_MAX = 0.5, 2000.0
LAMBDA_MIN, LAMBDA_MAX = 0.4e-6, 2e-6 # длина волны, м
Z_MIN, Z_MAX = 0.01, 1.0          # расстояние до фотоприёмника, м
W0_MIN, W0_MAX = 0.001, 0.02      # минимальная ширина пучка, м
X0_MIN, X0_MAX = -0.05, 0.05      # координата центра по x, м
Y0_MIN, Y0_MAX = -0.05, 0.05      # координата центра по y, м

def my_area(W, H, p):
    if p <= 0 or W <= 0 or H <= 0:
        return 0.0
    Nw = int(W // p)
    Nh = int(H // p)

```

```
if Nw < 1 or Nh < 1:
```

```
    return 0.0
```

```
N = Nw * Nh
```

```
area = N * p * p
```

```
return area
```

```
def my_efficiency(area, alpha, beta, gamma, theta, I0, omega, P0,
```

```
    x0, y0, w0, z, lambda_):
```

```
    if area < 1e-7 or not np.isfinite(area):
```

```
        return 0.0
```

```
Rs_theta = 0.1
```

```
Rp_theta = 0.05
```

```
part1 = np.cos(theta) * ((1 - Rs_theta) * np.cos(alpha)**2 + (1 - Rp_theta) *  
np.sin(alpha)**2)
```

```
R = np.array([
```

```
    [np.cos(alpha)*np.cos(beta),
```

```
     np.cos(alpha)*np.sin(beta)*np.sin(gamma) - np.sin(alpha)*np.cos(gamma),
```

```
     np.cos(alpha)*np.sin(beta)*np.cos(gamma) + np.sin(alpha)*np.sin(gamma)],
```

```
    [np.sin(alpha)*np.cos(beta),
```

```
     np.sin(alpha)*np.sin(beta)*np.sin(gamma) + np.cos(alpha)*np.cos(gamma),
```

```
     np.sin(alpha)*np.sin(beta)*np.cos(gamma) - np.cos(alpha)*np.sin(gamma)],
```

```
    [-np.sin(beta),
```

```
     np.cos(beta)*np.sin(gamma),
```

```
     np.cos(beta)*np.cos(gamma)]
```

```
])
```

```
R11, R12, R21, R22 = R[0,0], R[0,1], R[1,0], R[1,1]
```

```
B_vec = np.array([
```

```
    R11 * x0 + R12 * y0,
```

```

R21 * x0 + R22 * y0
])

C_val = x0**2 + y0**2

A_mat = np.array([
    [R11**2 + R12**2, R11*R21 + R12*R22],
    [R11*R21 + R12*R22, R21**2 + R22**2]
])

try:
    detA = np.linalg.det(A_mat)
except:
    return 0.0

if detA < 1e-8 or not np.isfinite(detA):
    return 0.0

try:
    A_inv = np.linalg.inv(A_mat)
except np.linalg.LinAlgError:
    return 0.0

try:
    BTAinvB = np.dot(B_vec.T, np.dot(A_inv, B_vec))
except:
    return 0.0

if omega == 0 or P0 == 0:
    return 0.0

zr = np.pi * w0 ** 2 / lambda_
w_z = w0 * np.sqrt(1 + (z / zr) ** 2)

try:
    val_exp = -2 * (C_val - BTAinvB) / (omega**2)

```

```

if val_exp < -700:
    exp_val = 0.0
elif val_exp > 700:
    return 0.0
else:
    exp_val = np.exp(val_exp)
    geom_factor = (I0 * omega**2) / (2 * P0 * np.sqrt(detA)) * exp_val
except:
    return 0.0

a = np.sqrt(area)
u1_min, u1_max = -a/2, a/2
u2_min, u2_max = -a/2, a/2

try:
    integral, _ = dblquad(
        lambda u2, u1: np.exp(-2 * ((u1**2 + u2**2)/(w_z ** 2))),
        u1_min, u1_max,
        lambda u1: u2_min,
        lambda u1: u2_max
    )
except Exception:
    return 0.0

eta = part1 * geom_factor * integral
if not np.isfinite(eta) or eta < 0 or eta > 1:
    return 0.0
return eta

def evaluate(ind):
    W      = ind[0]

```

```

H    = ind[1]
p    = ind[2]
alpha = ind[3]
beta  = ind[4]
gamma = ind[5]
theta = ind[6]
I0   = ind[7]
omega = ind[8]
P0   = ind[9]
lambda_ = ind[10]
z    = ind[11]
w0   = ind[12]
x0   = ind[13]
y0   = ind[14]

```

if (W > W_MAX or W < W_MIN or H > H_MAX or H < H_MIN or p > P_MAX
or p < P_MIN or

```

lambda_ < LAMBDA_MIN or lambda_ > LAMBDA_MAX or
w0 < W0_MIN or w0 > W0_MAX or z < Z_MIN or z > Z_MAX or
x0 < X0_MIN or x0 > X0_MAX or y0 < Y0_MIN or y0 > Y0_MAX):
return (1e6, 1e6)
```

area_val = my_area(W, H, p)

if area_val < AREA_MIN or area_val > AREA_MAX or not np.isfinite(area_val):
return (1e6, 1e6)

eff = my_efficiency(area_val, alpha, beta, gamma, theta, I0, omega, P0,
x0, y0, w0, z, lambda_)

if not np.isfinite(eff) or eff <= 0 or eff > 1:
return (1e6, 1e6)

```

    return (-eff, area_val)

creator.create("FitnessMulti", base.Fitness, weights=(1.0, -1.0))
creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMulti)

toolbox = base.Toolbox()

toolbox.register("attr_W", np.random.uniform, W_MIN, W_MAX)
toolbox.register("attr_H", np.random.uniform, H_MIN, H_MAX)
toolbox.register("attr_p", np.random.uniform, P_MIN, P_MAX)
toolbox.register("attr_alpha", np.random.uniform, ALPHA_MIN, ALPHA_MAX)
toolbox.register("attr_beta", np.random.uniform, BETA_MIN, BETA_MAX)
toolbox.register("attr_gamma", np.random.uniform, GAMMA_MIN, GAMMA_MAX)
toolbox.register("attr_theta", np.random.uniform, THETA_MIN, THETA_MAX)
toolbox.register("attr_I0", np.random.uniform, I0_MIN, I0_MAX)
toolbox.register("attr_omega", np.random.uniform, OMEGA_MIN, OMEGA_MAX)
toolbox.register("attr_P0", np.random.uniform, P0_MIN, P0_MAX)
toolbox.register("attr_lambda", np.random.uniform, LAMBDA_MIN, LAMBDA_MAX)
toolbox.register("attr_z", np.random.uniform, Z_MIN, Z_MAX)
toolbox.register("attr_w0", np.random.uniform, W0_MIN, W0_MAX)
toolbox.register("attr_x0", np.random.uniform, X0_MIN, X0_MAX)
toolbox.register("attr_y0", np.random.uniform, Y0_MIN, Y0_MAX)

toolbox.register("individual", tools.initCycle, creator.Individual,
                (toolbox.attr_W, toolbox.attr_H, toolbox.attr_p, toolbox.attr_alpha,
                 toolbox.attr_beta, toolbox.attr_gamma,
                 toolbox.attr_theta, toolbox.attr_I0, toolbox.attr_omega, toolbox.attr_P0,
                 toolbox.attr_lambda,
                 toolbox.attr_z, toolbox.attr_w0, toolbox.attr_x0, toolbox.attr_y0), n=1)
toolbox.register("population", tools.initRepeat, list, toolbox.individual)

```

```

toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=0, sigma=0.01, indpb=0.3)
toolbox.register("select", tools.selNSGA2)
toolbox.register("evaluate", evaluate)

def main():
    pop = toolbox.population(n=1000)
    hof = tools.ParetoFront()
    stats = tools.Statistics(lambda ind: ind.fitness.values)
    stats.register("avg", np.mean, axis=0)
    stats.register("min", np.min, axis=0)
    stats.register("max", np.max, axis=0)

    algorithms.eaMuPlusLambda(pop, toolbox, mu=1000, lambda_=2000, cxpb=0.7,
    mutpb=0.3, ngen=50,
        stats=stats, halloffame=hof, verbose=True)

    effs = []
    areas = []
    for ind in hof:
        eff, area = ind.fitness.values
        effs.append(-eff)
        areas.append(area)

    plt.figure(figsize=(8,6))
    plt.scatter(areas, effs, s=40)
    plt.xlabel("Площадь фотоприёмника, м2")
    plt.ylabel("КПД")
    plt.title("Парето-множество: КПД vs Площадь")
    plt.tight_layout()
    plt.show()

```

```
if __name__ == "__main__":
    main()
```