**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ** (национальный исследовательский университет)»

**Институт (Филиал) №14 «Передовая инженерная школа» Кафедра 1401 \_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**Группа М14О-201СВ-23 Направление 24.04.04 Авиастроение \_\_\_\_\_**

**Программа\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Электрические силовые установки\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**Квалификация\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Инженер-исследователь\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

На тему:

Автор ВКР Игнатенко Валерий Константинович (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Научный руководитель Старовойтов Евгений Игоревич (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Консультант (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Консультант (\_\_\_\_\_\_\_) (фамилия, имя, отчество полностью)

Рецензент (\_\_\_\_\_\_\_\_)

**К защите допустить**

Заведующий кафедрой 1401 Нестеров Олег Владимирович (\_\_\_\_\_\_\_\_\_) (№ каф) (фамилия, имя, отчество полностью)

\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г.

Москва 2025

Аннотация работы

Тут будет очень умный сокращенный реферат по проделанной мной работе возможно даже с картинками

Оглавление

[Определения, обозначения и сокращения 4](#_Toc199997697)

[Введение 5](#_Toc199997698)

[Обзор методов передачи энергии 7](#_Toc199997699)

[Электромагнитная индукция 8](#_Toc199997700)

[Микроволновое излучение 10](#_Toc199997701)

[Оптоволоконная передача энергии 12](#_Toc199997702)

[Лазерный метод 15](#_Toc199997703)

[Глава 1. Анализ ключевых параметров передачи энергии 19](#_Toc199997704)

[1.1. Влияние атмосферных условий на эффективность передачи 20](#_Toc199997705)

[1.1.1. Типы взаимодействия света и среды 20](#_Toc199997706)

[1.1.2. Моделирование атмосферы и выбор длины волны 23](#_Toc199997707)

[1.2. Отклонение луча от нормали к площади фотоприемника 29](#_Toc199997708)

[1.3. Отклонение луча от геометрического центра матрицы фотоприемников 31](#_Toc199997709)

[1.4. Вывод по главе 36](#_Toc199997710)

[Глава2. Выбор фотопринимающего устройства для БПЛА 37](#_Toc199997711)

[2.1. Обзор видов фотопринимающих устройств 37](#_Toc199997712)

[2.2. Обзор материалов выполнения фотоприемников 43](#_Toc199997713)

[2.3. Вывод функции площади матрицы 47](#_Toc199997714)

[2.4. Выводы по главе 48](#_Toc199997715)

[Глава 3. Моделирование Парето-фронта оптимальных параметров 49](#_Toc199997716)

[3.1. Обзор методов оптимизаций 49](#_Toc199997717)

[3.2. Описание алгоритма многокритериальной оптимизации 52](#_Toc199997718)

[Список использованных источников 58](#_Toc199997719)

[Приложение А 59](#_Toc199997720)

# 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

В условиях ведения современных боевых действий особую популярность приобрели дроны самых разных типов конструкций и дальностей действия. Эти аппараты, благодаря своей автономности, относительной дешевизне по сравнению с танками, самолётами или легкой бронетехникой, а также высокой мобильности и незаметности, являются незаменимым инструментом для выполнения широкого спектра задач — от разведки и наблюдения до точечных ударов по технике или живой силе противника. Их использование позволяет оперативно реагировать на изменения обстановки, выполнять сложные тактические манёвры и минимизировать риски для личного состава.

Несмотря на очевидные преимущества, одной из самых серьёзных проблем остаётся обеспечение достаточной автономности полёта. Основным ограничивающим фактором является вес аккумуляторной батареи, необходимой для работы всех систем аппарата. Современные технологии хранения энергии пока не позволяют уменьшить вес батарей до оптимальных размеров, что вынуждает разработчиков идти на компромисс: либо уменьшать время работы дрона, снижая его автономность, либо сокращать массу других жизненно важных компонентов, таких как боевая часть, что негативно сказывается на общей эффективности устройства. В ответ на эту проблему некоторые исследователи предлагают кардинальные решения, предполагающие отказ от встроенных бортовых систем энергосбережения. Идея заключается в том, чтобы заменить традиционное хранение энергии на использование дистанционных станций питания, способных обеспечить непрерывное энергоснабжение без увеличения массы аппарата.

Такой подход открывает новые горизонты в эксплуатации беспилотных систем, позволяя не только компенсировать недостатки современных аккумуляторов, но и существенно расширять функциональные возможности аппарата без ущерба для летных характеристик. В этом контексте становится особенно актуальным вопрос выбора оптимальной технологии передачи энергии, которая могла бы эффективно работать в условиях динамично меняющегося поля боя. Развитие современных материалов, инновационный инженерный подход и повышение требований к системам энергоснабжения стимулируют разработку разнообразных методов, основанных на различных физических принципах.

Параллельно с поиском решений для непосредственного питания БПЛА в реальном времени, современные исследования активно изучают пути передачи энергии на расстоянии, которые могут обеспечить высокую направленность и минимизацию потерь даже при больших дистанциях. Технологии, основанные на электромагнитной индукции, СВЧ-волнах, оптоволоконной передаче или лазерном излучении, уже демонстрируют впечатляющие результаты в лабораторных условиях и постепенно переходят в область практических применений. Особое внимание уделяется лазерной передаче энергии в инфракрасном диапазоне, где минимизация угловой расходимости луча позволяет существенно снизить потери при передаче, обеспечивая при этом высокую безопасность и эффективность системы.

Эта концепция дистанционного питания имеет огромный потенциал для оптимизации работы беспилотных систем. По мере совершенствования технологий на этапах преобразования электрической энергии в лазерное излучение и обратно, становится возможным не только решить задачу снижения веса аппарата за счет отказа от громоздких аккумуляторов, но и обеспечить стабильное энергоснабжение даже в условиях интенсивного использования и сложной тактической обстановки. Таким образом, переход от традиционных систем хранения энергии к инновационным методам беспроводной передачи становится логичным продолжением эволюции БПЛА, где каждый грамм имеет значение, а эффективность энергосистем играет ключевую роль в обеспечении боевой готовности и оперативности действий.

# Обзор методов передачи энергии

Ис.хо.дя из оп.ис.ан.ны.х вы.ше проб.ле.м и пе.рс.пе.кт.ив, ст.анов.ит.ся яв.ст.ве.нн.ым, что со.ве.ршен.ст.во.ва.ние мето.до.в пе.ре.да.чи энер.ги.и мо.жет сы.гр.ат.ь гл.ав.ну.ю ро.ль в да.ль.не.йшем ра.зв.ит.ии те.хнолог.ий бе.сп.илот.ны.х си.стем. На.бл.юд.ая за ли.мити.ро.ва.ни.ям.и тр.ад.иц.ио.нн.ых ак.ку.му.лято.рн.ых си.стем и уч.ит.ыв.ая пред.ло.же.ни.я по ис.по.ль.зо.ва.ни.ю ди.ст.ан.цион.ны.х ст.ан.ци.й пита.ни.я, мы ви.ди.м на.су.щность дета.ль.но.го ра.сс.мотрен.ия со.времен.ны.х по.дходов к пе.ре.да.че энер.ги.и. Эт.и ра.ск.ла.ды, ба.зи.ру.ющ.ие.ся на ра.зноо.бр.аз.ны.х фи.зи.че.ск.их пр.ин.ци.па.х, об.ла.да.ют поте.нц.иа.ло.м не ли.шь ко.мпен.си.ро.вать не.до.ст.ат.ки су.ще.ст.ву.ющ.их ре.ше.ни.й, но и от.кр.ыт.ь но.вые ве.ро.ят.но.ст.и дл.я обес.пе.че.ни.я на.де.жного энер.го.сн.аб.же.ни.я в слож.ны.х ус.ло.ви.ях боев.ых по.ступ.ко.в.

В свою очеред.ь, многоо.бр.аз.ие те.хнолог.ий — от электром.аг.нитной ин.ду.кц.ии и СВ.Ч-во.лн до опто.во.ло.ко.нной пе.ре.да.чи и ла.зе.рного из.лу.че.ни.я — до.звол.яет по.до.бр.ат.ь опти.ма.ль.ное ре.ше.ние с учетом ко.нк.ретн.ых эк.сп.лу.ат.ац.ио.нн.ых пр.ит.яз.ан.ий. Та.кое ра.зноо.бр.аз.ие ст.имул.ирует глубок.ий ан.ал.из преи.му.ще.ст.в и ог.ра.ни.че.ни.й лю.бо.го мето.да, что яв.ляет.ся необ.хо.ди.мы.м эт.апом дл.я со.зд.ан.ия эф.фе.кт.ив.но.й и ад.апти.вной си.стем.ы ди.ст.ан.цион.но.го пита.ни.я дл.я БП.ЛА. Да.лее по.следует ст.ат.ар.ны.й об.зо.р си.стем пе.ре.да.чи энер.ги.и, в кото.ро.м бу.дут ра.ск.рыты гл.ав.ные фи.зи.че.ск.ие пр.ин.ци.пы, те.хн.ичес.кие ха.ра.ктер.исти.ки и пе.рс.пе.кт.ив.ы инте.гр.ац.ии си.х те.хнолог.ий в со.времен.ные бе.сп.илот.ные ап.па.раты.

## Электром.аг.нитн.ая ин.ду.кц.ия



Ри.су.но.к 1 – Схем.а пе.ре.да.чи энер.ги.и че.ре.з во.здей.ст.ви.я электром.аг.нитной ин.ду.кц.ии

Этот мето.д ос.но.ва.н на яв.ле.ни.и электром.аг.нитного по.ля. Дл.я пе.ре.да.чи бе.сп.ро.во.ло.чн.ый энер.ги.и ис.по.ль.зует.ся тр.ан.сфор.мато.р. Бл.агод.ар.я яв.ле.ни.ю электром.аг.нитной ин.ду.кц.ии, на пр.ие.мной кату.шке пр.ибор.а со.зд.аетс.я на.ве.де.нн.ый то.к с пе.ре.да.ющей кату.шк.и. Дл.я ме.нь.ши.х поте.рь энер.ги.и ну.жно бу.дет, чтоб.ы кату.шк.и на.хо.ди.ли.сь ря.до.м. Ос.но.вной теорет.ичес.ко.й ба.зо.й этого мето.да яв.ляет.ся за.ко.н Фа.ра.де.я об электром.аг.нитной ин.ду.кц.ии, тот, что ут.ве.рж.дает, что из.ме.не.ние ма.гн.ит.но.го пото.ка че.ре.з за.мк.нуты.й очерта.ни.я ин.ду.ци.рует в не.м электрод.ви.жу.щу.ю си.лу.

, где E – на.пр.яжен.но.ст.ь электр.ичес.ко.го по.ля, B – ма.гн.ит.на.я на.ве.де.ние, t – врем.я.

В инте.гр.ал.ьной дл.я за.мк.нуто.го ко.нтур.а вы.ра.же.ние бу.дет имет.ь вид.

, где – по.ве.рх.но.ст.ны.й, ог.ра.ни.че.нн.ая ко.нтуром , *dS* – элемент площ.ад.и по.ве.рх.но.ст.и.

Дл.я си.стем.ы из 2-х кату.ше.к ма.гн.ит.ны.й пото.к че.ре.з пр.иё.мную кату.шку св.яз.ан с то.ко.м в пе.ре.да.ющей кату.шке путе.м вз.аи.мную ин.ду.кт.ив.но.ст.ь:

Ин.ду.ци.ро.ва.нн.ая ЭД.С во втор.ич.но.й кату.шке бу.дет имет.ь вид.

В случ.ае си.стем.ы бе.сп.ро.во.ло.чн.ый пе.ре.да.чи энер.ги.и пе.ре.ме.нн.ый то.к, проход.ящ.ий че.ре.з пе.ре.да.ющую кату.шку, де.лает пе.ре.ме.нное ма.гн.ит.ное по.ле, кото.рое, прон.ик.ая в пр.ие.мную кату.шку, ин.ду.ци.рует в не.й то.к. Это ра.зреш.ает прео.бр.азов.ыв.ат.ь электр.ичес.ку.ю энер.ги.ю од.но.го устрой.ст.ва в ма.гн.ит.ное соев.ище, а зате.м – об.ратно в электр.ичес.ку.ю энер.ги.ю другого устрой.ст.ва.

Дл.я обес.пе.чи.ва.ни.я эф.фе.кт.ив.но.й пе.ре.да.чи энер.ги.и кр.ит.ичес.ки ва.жно ма.кс.им.из.иров.ат.ь множ.ител.ь вз.аи.мной ин.ду.кц.ии ме.жду кату.шк.ам.и. Этот ко.эф.фи.циент на.хо.дитс.я в за.ви.си.мо.ст.и от та.ки.х фа.кторов, ка.к ра.ссто.ян.ие ме.жду кату.шк.ам.и, их ор.ие.нт.ац.ия, ци.фр.а витков, ди.амет.р провод.ни.ко.в и ис.по.ль.зо.ва.ние ма.гн.ит.ны.х се.рдеч.ни.ко.в. Че.м прев.ыше степен.ь ма.гн.ит.но.го сцеп.ле.ни.я ме.жду пе.ре.да.ющей и пр.ие.мной кату.шк.ам.и, те.м ре.зу.льтати.внее прои.сход.ит пе.ре.да.ча энер.ги.и, а поте.ри сн.иж.аютс.я.

Кроме то.го, су.ще.ст.ве.нное вл.ия.ние на эф.фе.кт.ив.но.ст.ь си.стем.ы ок.аз.ыв.ает ра.бо.ча.я ча.стот.а пе.ре.ме.нного то.ка. Пр.и на.ст.ро.йке двух кату.ше.к на од.ну и ту же ре.зо.на.нс.ну.ю ча.стоту на.бл.юд.аетс.я ре.зо.на.нс.ны.й де.йств.ие, кото.ры.й пр.ивод.ит к увел.ичен.ию ам.пл.итуд.ы пе.ре.ме.нн.ых электр.ичес.ко.го и ма.гн.ит.но.го ра.стен.ие в си.стеме. Это ус.илен.ие улуч.шает вз.аи.мную ин.ду.кц.ию ме.жду кату.шк.ам.и и, ка.к ра.сс.ле.до.ва.ние, по.вы.шает энер.го.эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.ре.да.чи энер.ги.и, не из.ме.ня.я пр.и этом дл.ину во.лн.ы электром.аг.нитного по.ля. Та.ко.й ур.ав.ни.ло.вк.а по.звол.яет улуч.шить па.ра.метр.ы си.стем.ы бе.з необ.хо.ди.мо.ст.и умен.ьш.ат.ь ша.г ме.жду ко.мпонента.ми.

Ис.по.ль.зо.ва.ние ре.зо.на.нс.а ко.ле.бате.ль.но.го ко.нтур.а чуто.чку увел.ич.ив.ает да.ль.но.ст.ь пе.ре.да.чи. Пр.и ре.зо.на.нс.но.й ин.ду.кц.ии пе.ре.датч.ик и пр.иё.мн.ик на.ст.роен.ы на од.но ча.стоту. Прои.звод.ител.ьность мо.жет быть улуч.ше.на ещ.ё бо.ль.ше путё.м мета.мо.рфоз.ы фо.рм.ы во.лн.ы уп.ра.вл.яю.ще.го то.ка от си.ну.со.ид.ал.ьн.ых до не.си.ну.со.ид.ал.ьн.ых пе.ре.хо.дн.ых фо.рм.ы во.лн.ы. Им.пу.ль.сн.ая ту.рбоперед.ач.а энер.ги.и прои.сход.ит в те.че.ние не.скол.ьк.их ци.клов. Та.ки.м об.ра.зо.м, су.ще.ст.ве.нн.ая мо.щность мо.жет быть пе.ре.да.на ме.жду двум.я вз.аи.мность на.ст.роен.ны.ми LC-це.пя.ми с от.но.сите.ль.но не.вы.со.ки.м ко.эф.фи.циенто.м св.яз.и. Пе.ре.да.ющ.ая и пр.иё.мн.ая кату.шк.и, ка.к ша.блон, пред.ст.ав.ля.ют со.бо.й од.но.слой.ные со.ле.но.ид.ы ил.и плос.ку.ю сп.ир.ал.ь с ко.мп.ле.ктом ко.нден.сато.ро.в, кото.рые по.звол.яют на.ст.ро.ит.ь пр.ин.им.аю.щи.й элемент на ча.стоту пе.ре.датч.ик.а.

Об.ыч.ны.м ис.по.ль.зо.ва.нием ре.зо.на.нс.но.й электрод.ин.ам.ичес.ко.й ин.ду.кц.ии яв.ляет.ся за.ря.дк.а ак.ку.му.лято.рн.ых бата.ре.й ми.ни.ат.юр.ны.х устрой.ст.в, та.ки.х, ка.к по.рт.ат.ив.ные ко.мп.ьюте.ры и сото.вые те.ле.фо.ны, вр.ачеб.ные им.пл.антаты и электромоб.ил.и. Те.хн.ик.а ло.ка.ли.зо.ва.нной за.ря.дк.и ис.по.ль.зует из.бр.ан.ие соот.ветствую.ще.й пе.ре.да.ющей кату.шк.и в ст.ру.ктуре ма.сс.ив.а многос.ло.йн.ых об.мото.к. Ре.зо.на.нс пр.имен.яетс.я ка.к в па.не.ли бе.сп.ро.во.дной за.ря.дк.и (пе.ре.да.ющем ко.нтуре), та.к и в мо.ду.ле пр.иё.мн.ик.а (встрое.нного в на.груз.ку) дл.я обес.пе.чи.ва.ни.я ма.кс.им.ал.ьной эф.фе.кт.ив.но.ст.и пе.ре.да.чи энер.ги.и. Та.ка.я те.хн.ик.а пе.ре.да.чи по.дход.ит многоцелев.ым бе.сп.ро.во.дн.ым за.ря.дн.ым па.не.ля.м дл.я по.дз.ар.яд.ки по.рт.ат.ив.но.й электрон.ик.и, та.ко.во.й, на.пр.имер, ка.к мо.би.ль.ные те.ле.фо.ны. Те.хн.ик.а пр.ин.ят.а в ка.че.ст.ве ча.ст.и эт.алон.а бе.сп.ро.во.дной за.ря.дк.и Qi.

## Ми.кровол.но.вое из.лу.че.ние

Мето.д ми.кровол.но.во.го из.лу.че.ни.я, по со.по.ст.ав.ле.ни.ю с мето.до.м электром.аг.нитной ин.ду.кц.ии, по.звол.яет в 565 ра.з увел.ич.ит.ь ра.ссто.ян.ие, на кото.рое ст.анет пе.ре.да.на энер.ги.я. Электром.аг.нитн.ые во.лн.ы СВ.Ч-ди.ап.азон.а с дл.иной во.лн.ы 12 см, что соот.ветствует ча.стоте 2,45 ГГ.ц, гото.вы проход.ит.ь че.ре.з зе.мную ат.мо.сферу фа.кт.ичес.ки бе.з поте.рь. Дл.я пр.именен.ия да.нного мето.да необ.хо.ди.мы дв.а устрой.ст.ва: Пе.рвое, ма.гнет.ро.н – ин.ве.ртор.ны.й ге.не.рато.р ми.кровол.но.во.го из.лу.че.ни.я, по.звол.яю.щи.й прео.бр.азов.ат.ь электр.ичес.ки.й то.к в ми.кровол.но.вое ре.нт.ге.но.вс.кое из.лу.че.ние. Второе, пр.ие.мн.ая анте.нн.а, пр.ин.им.аю.ща.я ми.кровол.но.вое из.лу.че.ние. Ви.ль.ям Броу.н ис.пыта.л ап.па.рат,электроу.ст.ро.йство, способ.ное прео.бр.азов.ыв.ат.ь ми.кровол.ны в электр.ичес.ки.й то.к. Да.нное устрой.ст.во во.зы.ме.ло на.зв.ан.ие ре.ктен.на. Он.а со.стоит из по.лу.во.лнов.ых ди.по.ле.й, ка.жд.ый из ко.их на.гружен на вы.со.ко.эф.фе.кт.ив.ные диод.ы Шотт.ки.

Ре.ктен.ны до.ст.аточ.но крохот.ны и имеют вы.со.ки.й КП.Д – до 95 %, од.на.ко их на.грузоч.на.я способ.но.ст.ь со.ст.ав.ляет ед.ин.иц.ы уатт. По.этому дл.я пе.ре.да.чи бо.ль.ши.х мо.щносте.й из ре.ктен.н со.би.ра.ют не.ма.лые пр.ие.мн.ые па.не.ли, ра.сс.чита.нн.ые на пе.ре.да.чу оп.ре.де.ле.нной мо.щности. Имен.но с фа.ми.лией Ви.ль.ям.а Броу.на и его изоб.рете.нием св.яз.ан.а са.ма.я ус.пе.шн.ая бе.сп.ро.во.дн.ая тр.ан.сл.яц.ия энер.ги.и. В 1976 г. ему уд.алос.ь пе.ре.дать СВ.Ч-пу.чком 30 кВт не.прер.ыв.но.й мо.щности на пробел 1,6 км с КП.Д, со.ст.ав.ля.ющ.им 82 %. Од.на.ко, пр.и не.бо.ль.ши.х пе.ре.груз.ка.х по.лу.провод.ни.ко.вые ди.по.ли сгор.ают, пр.и пе.ре.груз.ке на од.но.м из по.лу.провод.ни.ко.в ст.ало из ст.ро.я це.ла.я пр.ие.мн.ая па.не.ль.

Не.на.де.жность и до.ро.го.ви.зн.а ст.ал.и гл.ав.ны.ми фа.ктор.ам.и, кото.рые не по.звол.ил.и на.йт.и пр.именен.ия да.нному способу вне ла.бо.рато.рн.ых ис.пыта.ни.й. В Со.ветс.ко.м Со.юзе, та.ка.я анте.нн.а бы.ла на.зв.ан.а «ги.ро.ма.гн.ит.ны.й прео.бр.азов.ател.ь энер.ги.и». На ри.су.нке 2 пред.ст.ав.ле.н ци.клот.ро.нн.ый прео.бр.азов.ател.ь энер.ги.и.



Ри.су.но.к 2 – Ци.клот.ро.нн.ый прео.бр.азов.ан.иеь

Ци.клот.ро.нн.ый прео.бр.азов.ател.ь ос.но.ва.н на во.збуж.де.ни.и бы.ст.ро.й ци.клот.ро.нной во.лн.ы электрон.но.го пото.ка за счет.а по.двод.имой СВ.Ч-энер.ги.и и по.следую.ще.м прео.бр.азов.ан.ии этой энер.ги.и в по.ступ.ател.ьную энер.ги.ю пе.ре.ме.ще.ни.я электронов. В его ос.но.ве ле.жит ла.мпов.ая те.хнолог.ия и это де.лает его га.ба.ритн.ым. КП.Д ре.фо.рм.иров.ан.ия до 80 % пр.и уров.не по.двод.имой СВ.Ч-мо.щности по.ря.дк.а 10 кВт, пр.и этом до.пу.ст.им.ы со.ли.дн.ые ко.ле.ба.ни.я уров.ня по.двод.имой СВ.Ч мо.щности. Да.нн.ая ха.ра.ктер.исти.ка до.звол.яет прео.бр.азов.ател.ю ле.гко пе.ре.но.сить пе.ре.груз.ки, он не имеет проб.ле.м пе.ре.из.лу.че.ни.я и по.де.ше.вле амер.ик.ан.ского ан.алог.а.

Слож.но.ст.ью в со.зд.ан.ии энер.гети.че.ского ми.кровол.но.во.го лу.ча сч.ит.аетс.я то, что дл.я ис.по.ль.зо.ва.ни.я его в ко.см.ичес.ки.х прог.ра.мм.ах из-за ди.фр.ак.ци.и, ог.ра.ни.чи.ва.ющей на.пр.ав.ле.нность анте.нн.ы, ва.жн.а ди.аф.ра.гм.а бо.ль.шо.го ра.змер.а. На.пр.имер, со.гл.ас.но ис.следов.ан.ию NA.SA 1978 лета, дл.я ми.кровол.но.во.го лу.ча ча.стотой 2,45 ГГ.ц по.на.до.битс.я пе.ре.да.ющ.ая анте.нн.а ди.амет.ро.м в 1 км, а пр.иё.мной ре.ктен.ны ди.амет.ро.м в 10 км. Эт.и об.ъе.мы мо.гут быть сн.ижен.ы путё.м ис.по.ль.зо.ва.ни.я бо.лее ко.ротк.их дл.ин во.лн, а ко.ротк.ие во.лн.ы мо.гут по.глощ.ат.ьс.я ат.мо.сферой, а та.кже блок.иров.ат.ьс.я до.жд.ём ил.и ка.пл.ям.и во.ды. Из-за «прок.ляти.я те.сного пу.чк.а» не.во.змож.но су.зить лу.ч, об.ъе.ди.ня.я пу.чк.и от не.скол.ьк.их ме.нь.ши.х спут.ни.ко.в бе.з пропор.цион.ал.ьной из.де.рж.ки в мо.щности. Дл.я пр.именен.ия на зе.мле анте.нн.а ди.амет.ро.м 10 км по.звол.ит до.ст.ич.ь су.ще.ст.ве.нного уров.ня мо.щности пр.и со.хр.анен.ии ни.зкой плот.но.ст.и пу.чк.а, что авто.ритетно по сооб.ра.же.ни.ям бе.зо.па.сности дл.я че.ло.ве.ка и ок.ру.жа.ющей сред.ы. Бе.зо.па.сн.ый дл.я че.ло.ве.ка ступен.ь плот.но.ст.и мо.щности со.ст.ав.ляет 1 мВт/см2, что на площ.ад.и круг.а ди.амет.ро.м 10 км соот.ветствует си.лы в 750 МВт. Этот уровен.ь соот.ветствует мо.щности со.времен.ны.х электроста.нц.ий.

## Опто.во.ло.ко.нн.ая ра.диоперед.ач.а энер.гии

Пе.ре.да.ча энер.ги.и по опти.че.скому во.ло.кну – это до.во.ль.но но.вые способ пита.ни.я ра.зл.ич.ны.х потреб.ителей электр.ичес.ко.й энер.ги.и с яв.ны.ми требов.ан.ия.ми к их эк.сп.лу.ат.ац.ии. Те.хнолог.ия опти.че.ской пе.ре.да.чи энер.ги.и в со.по.ст.ав.ле.ни.и с ме.дной провод.ко.й имеет ря.д неос.по.ри.мы.х преи.му.ще.ст.в. Во-пе.рв.ых, это энер.го.па.сс.ив.но.ст.ь и по.жа.роусто.йч.ивость, то есть от.сутств.ие пр.ич.ин во.зн.ик.но.ве.ни.я электр.ичес.ки.х ис.кр, во-втор.ых, от.вр.ащен.ие электром.аг.нитн.ых по.ме.х и от.сутств.ие га.ль.ва.ни.че.ск.их ра.зв.язок, в-трет.ьи.х, ри.ск ис.по.ль.зо.ва.ни.я в ус.ло.ви.ях, где необ.хо.ди.мо со.бл.юд.ат.ь вы.со.кие требов.ан.ия к изол.яц.ии. В фи.на.ль.но.м счете это за.ме.на ме.дн.ых ка.бе.ле.й на ле.гк.ие во.ло.ко.нно-опти.че.ск.ие ли.ни.и, что обес.пе.чет эф.фе.кт в со.кр.ащен.ии мета.ллое.мкости в ра.зл.ич.ны.х провод.ящ.их и ко.нт.ро.ль.но-из.ме.рите.ль.ны.х це.пя.х. Но.ви.зн.а этой те.хнолог.ии за.кл.юч.аетс.я в ор.га.ни.за.ци.и но.во.го по.дход.а по.ст.роен.ия си.стем.ы электроп.ит.ан.ия по.ку.пате.ле.й, кото.ра.я по.вы.шает уровен.ь по.жа.ро.бе.зо.па.сности и электром.аг.нитной со.вмести.мо.ст.и за ба.нков.ск.ий счет ис.по.ль.зо.ва.ни.я опти.че.ского во.ло.кн.а и его энер.го.па.сс.ив.но.ст.и. В да.нном случ.ае пр.имен.яетс.я идея пе.ре.да.чи энер.ги.и по опти.че.скому во.ло.кну в ви.де световое пятно во.лн.ы. Та.кже не.ма.ло.ва.жн.ым преи.му.ще.ст.во.м яв.ляет.ся во.змож.но.ст.ь обес.пе.чи.ва.ни.я ре.зе.рв.иров.ан.ия энер.гети.че.ск.их ка.на.ло.в и по.вы.ше.ние жи.ву.че.ст.и ка.ко.го-ил.и об.ъе.кт.а, сн.ижен.ие стои.мо.ст.и за счет со.кр.ащен.ия мета.ллое.мкости ко.ммун.ик.ац.ий и по.вы.ше.ние акти.вности эф.фе.кт.ив.но.ст.и их ра.боты.

Ос.но.вное звено всей си.стем.ы пе.ре.да.чи энер.ги.и по опти.че.скому во.ло.кну за.кл.юч.аетс.я в ре.зу.льтати.вном прео.бр.азов.ан.ии электр.ичес.ко.й энер.ги.и в опти.че.скую и об.ратно. На стороне пе.ре.датч.ик.а это пр.ив.ыч.но до.ст.иг.аетс.я с по.мо.щь.ю ла.зе.рного исто.чн.ик.а, ха.ра.ктер.изую.ще.го.ся вы.со.ко.й по.ка.зате.ле.м прео.бр.азов.ан.ия (η₁). Пр.и этом ва.жно обес.пе.чить ма.кс.им.ал.ьное со.вп.аден.ие па.ра.метров ла.зе.рного из.лу.че.ни.я (ск.ажем, дл.ин.ы во.лн.ы, ко.ге.ре.нт.но.ст.и, стезео.бр.аз.но.ст.и) с опти.че.ск.им.и ха.ра.ктер.исти.ка.ми пр.имен.яе.мо.го во.ло.кн.а. На пр.ие.мном ко.нце кр.ит.ич.ны.м яв.ляет.ся вы.бо.р и ра.зр.аб.ат.ыв.ан.ие фото.электр.ичес.ки.х прео.бр.азов.ателей, на.пр.имер, фото.диодов ил.и со.лнеч.ны.х элементо.в, опти.ми.зи.ро.ва.нн.ых дл.я ра.боты на пр.имен.яе.мо.й во.лновой дл.ине. Здес.ь эф.фе.кт.ив.но.ст.ь прео.бр.азов.ан.ия (η₂) на.пр.ямую ок.аз.ыв.ает бо.ль.шое вл.ия.ние на ко.не.чную прои.звод.ител.ьность си.стем.ы.

* Ог.ра.ни.че.нн.ая эф.фе.кт.ив.но.ст.ь прео.бр.азов.ан.ия:  
  Си.стем.ы опто.во.ло.ко.нной пе.ре.да.чи энер.ги.и на.стояте.ль.но прос.ят двух эт.апов прео.бр.азов.ан.ия: прео.бр.азов.ан.ия электр.ичес.ко.й энер.ги.и в опти.че.скую (с по.дмогой ла.зе.рного исто.чн.ик.а) и об.ратного прео.бр.азов.ан.ия опти.че.ской энер.ги.и в электр.ичес.ку.ю (с по.ддер.жкой фото.электр.ичес.ко.го прео.бр.азов.ател.я). На ка.ждом из эт.их эт.апов прои.сход.ят из.де.рж.ки, что сн.иж.ает об.щу.ю энер.го.эф.фе.кт.ив.но.ст.ь си.стем.ы по ср.ав.не.ни.ю с пр.ям.ым.и способ.ам.и пе.ре.да.чи.
* Ог.ра.ни.че.ни.я по мо.щности:  
  Опто.во.ло.ко.нн.ые ли.ни.и об.ла.да.ют оп.ре.де.лё.нной пропус.кной во.змож.но.ст.ью. Пр.и пе.ре.да.че вы.со.ки.х мо.щносте.й мо.гут во.зн.ик.ат.ь проб.ле.мы, св.яз.ан.ные с пе.ре.гревом во.ло.кн.а, не.ли.не.йн.ым.и ре.зу.льтата.ми и да.же по.вреж.де.нием мате.ри.ал.а. Это ог.ра.ни.чи.вает пр.именен.ие те.хнолог.ии в случ.ая.х, где ну.жно пе.ре.да.ча бо.ль.ши.х энер.гети.че.ск.их пото.ко.в.
* Чу.вств.ител.ьность к ме.ха.ни.че.ск.им во.здей.ст.ви.ям:  
  Не.смот.ря на превос.хо.дств.а в пл.ане ле.гкости и по.жа.ро.бе.зо.па.сности, опто.во.ло.ко.нн.ые ка.бе.ли до.ст.аточ.но не.проч.ные. Из.ги.бы, ви.бр.ац.ии ил.и ме.ха.ни.че.ск.ие по.вреж.де.ни.я мо.гут пр.ивести к увел.ичен.ию из.де.ржек си.гн.ал.а ил.и по.ло.мке во.ло.кн.а, что требует ра.зр.абот.ки спец.иа.ль.ны.х за.щитн.ых ме.р и увел.ич.ив.ает требов.ан.ия к ка.че.ст.ву уста.но.вк.и и эк.сп.лу.ат.ац.ии.
* Слож.но.ст.ь те.хнолог.ичес.ко.й ре.ал.из.ац.ии и вы.со.ка.я до.стои.нство:  
  Ис.по.ль.зо.ва.ние вы.со.кото.чн.ых ла.зе.рн.ых исто.чн.иков, спец.иа.ли.зи.ро.ва.нн.ых фото.электр.ичес.ки.х прео.бр.азов.ателей и си.стем ко.нт.ро.ли.ро.ва.ни.я со.пр.яжен.ия па.ра.метров исто.чн.ик.а, во.ло.кн.а и пр.иё.мн.ик.а де.лает си.стему опто.во.ло.ко.нной пе.ре.да.чи энер.ги.и те.хнолог.ич.но слож.но.й и до.ро.го.стоя.ще.й. Вы.со.ка.я стои.мо.ст.ь ко.мпоненто.в и необ.хо.ди.мо.ст.ь ко.нк.ретной на.ст.ро.йк.и всей си.стем.ы ог.ра.ни.чи.ва.ют её ши.ро.кое пр.именен.ие, са.мо.бытно в ус.ло.ви.ях, где требуетс.я эконом.ичес.ка.я эф.фе.кт.ив.но.ст.ь.
* Поте.ри на дл.ин.ны.х ра.ссто.ян.ия.х:  
  Хотя прог.ре.сс.ив.ные опто.во.ло.кн.а ха.ра.ктер.изуютс.я ни.зк.им ко.эф.фи.циенто.м зату.ха.ни.я на оп.ре.де.лё.нн.ых дл.ин.ах во.лн, все же пр.и пе.ре.да.че энер.ги.и на круп.ные ра.ссто.ян.ия во.зн.ик.ают поте.ри за сч.ёт ра.ссея.ни.я и по.глощен.ия. Дл.я ко.мпен.са.ци.и да.нн.ых поте.рь мо.гут потребов.ат.ьс.я промежуточ.ные ус.ил.ител.и ил.и ретр.ан.сл.ятор.ы, что до.ба.во.чно ус.ло.жн.яет ко.нструк.ци.ю си.стем.ы.

## Ла.зе.рн.ый метод

Энер.ги.ю до.звол.яетс.я пе.ре.дать путё.м её прео.бр.азов.ан.ия в лу.ч ла.зе.ра, кото.ры.й зате.м ве.ро.ят.но быть на.пр.ав.ле.н на фото.элемент пр.иё.мн.ик.а. Вп.лоть до не.да.внего времен.и вы.ра.же.ние энер.ги.и с по.мо.щь.ю ла.зе.ро.в не имел.а бо.ль.шо.го см.ыс.ла: их КП.Д со.ст.ав.ля.л ли.шь 10−20 %. С учетом поте.рь на пе.ре.да.чу и прео.бр.азов.ан.ие световой энер.ги.и в ос.ве.ще.ние по.лу.чате.ля до.ст.иг.ало, в лу.чшем случ.ае, не.скол.ьк.их проценто.в на.ча.ль.но.й мо.щности. То.ль.ко в 2000-х го.да.х ситу.ац.ия на.ча.ла ме.нять.ся: бы.ли за.ме.че.ны ин.фр.ак.ра.сн.ые ла.зе.ры с КП.Д до 40−50 % и вы.со.ко.эф.фе.кт.ив.ные фото.электр.ичес.кие мо.ду.ли на ос.но.ве ар.се.ни.да га.лл.ия, способ.ные прео.бр.азов.ыв.ат.ь в те.рмоэ.ле.кт.ри.че.ст.во до 40 %, а иног.да – и до 70 % энер.ги.и из.лу.че.ни.я. Бл.агод.ар.я этому способу мы мо.же.м пе.ре.дать энер.ги.ю на не.ма.лые ра.ссто.ян.ия.

Ла.зе.рн.ая пе.ре.да.ча энер.ги.и по ср.ав.не.ни.ю с друг.им.и способ.ам.и бе.сп.ро.во.дной пе.ре.да.чи об.ла.дает ря.до.м преи.му.ще.ст.в:

* пе.ре.да.ча энер.ги.и на круп.ные ра.ссто.ян.ия (за сч.ёт ма.ло.й ве.ли.чи.ны уг.ла ра.сход.имости промеж уз.ки.ми пу.чк.ам.и мо.но.хром.ат.ичес.ко.й световой во.лн.ы);
* удоб.ст.во ис.по.ль.зо.ва.ни.я дл.я не.бо.ль.ши.х из.де.ли.й (бл.агод.ар.я не.бо.ль.ши.м ра.змер.ам твер.доте.ль.но.го ла.зе.ра — фото.электр.ичес.ко.го по.лу.провод.ни.ко.во.го диод.а);
* ал.ьб.ин.из.м ра.диоч.астотн.ых по.ме.х дл.я су.ще.ст.ву.ющ.их сред.ст.в св.яз.и, та.ки.х, ка.к Wi-Fi и сото.вые те.ле.фо.нн.ые ап.па.раты (ла.зе.р не со.зд.аёт та.ки.х по.ме.х);
* во.змож.но.ст.ь ко.нт.ро.ля до.ступ.а (об.ре.ст.и электроэ.не.рг.ию мо.гут то.ль.ко пр.иё.мн.ик.и, ос.ве.щё.нн.ые ла.зе.рн.ым лу.чо.м).

Са.мы.й ко.нк.ретн.ый из не.до.ст.ат.ко.в – ат.мо.сфер.а Зе.мл.и, та.к ка.к он.а по.глощ.ает бо.ль.шу.ю ча.ст.ь энер.ги.и, пе.ре.да.нной от ла.зе.ра. Энер.гией с ор.биты ра.зрешено бы.ло бы сн.аб.жать вс.ю Зе.мл.ю.

По.ми.мо этого, у да.нного способ есть и ря.д друг.их не.до.ст.ат.ко.в:

* Прео.бр.азов.ан.ие ни.зкоч.астотного электром.аг.нитного из.лу.че.ни.я в вы.со.ко.ча.стот.ное, ко.им яв.ляет.ся свет, не.эф.фе.кт.ив.но. Прео.бр.азов.ан.ие свет.а об.ратно в те.рмоэ.ле.кт.ри.че.ст.во та.кже не.эф.фе.кт.ив.но, та.к ка.к КП.Д фото.элементо.в до.ст.иг.ает 40−50 %, хотя эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.реустрой.ст.ва мо.но.хром.ат.ичес.ко.го свет.а зн.ач.ител.ьно вы.ше, че.м эф.фе.кт.ив.но.ст.ь со.лнеч.ны.х па.не.ле.й;
* Необ.хо.ди.мо.ст.ь пр.ям.ая ли.ни.я ви.ди.мо.ст.и ме.жду пе.ре.датч.иком и пр.иё.мн.иком (ка.к и пр.и ми.кровол.но.во.й пе.ре.да.че).
* Поте.нц.иа.ль.на.я не.бе.зо.па.сность дл.я жи.вы.х ор.га.ни.змов в случ.ае от.клонен.ия пе.ре.да.ющего лу.ча

Та.кие фи.рм.ы ка.к NA.SA, EA.DS, La.se.rm.ot.iv.e за.ни.ма.ют.ся та.ки.ми те.хнолог.ия.ми уже с 2003 г. Учен.ые из Япон.ии до.ст.иг.ли ус.пе.ха в прео.бр.азов.ан.ии со.лнеч.но.го свет.а в ла.зе.рное из.лу.че.ние с КП.Д 42 %, но ре.зу.льтати.вн.ые пе.ре.датч.ик.и и пр.ие.мн.ик.и не мо.гут со.вместно пр.имен.ят.ьс.я, пото.му что де.йствуют в ра.зн.ых спектр.ал.ьн.ых ди.ап.азон.ах. Втор.ая ва.жн.ая проб.ле.ма – не.пр.ие.млемость ис.по.ль.зо.вать пе.ре.да.чу в па.смур.ну.ю по.го.ду. Ес.ли ре.шить эт.и за.да.чи, то эту те.хнолог.ию дл.я ко.см.ичес.ко.й энер.гети.ки ждут бо.ль.шие пе.рс.пе.кт.ив.ы.

Та.бл.иц.а 1 – Ср.ав.не.ние способов пе.ре.да.чи энер.гии

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Ха.ра.ктер.исти.ка | Электром.аг.нитн.ая ин.ду.кц.ия | Ми.кровол.но.вое ре.нт.ге.но.вс.кое из.лу.че.ниее | Опто.во.ло.ко.нн.ая пе.ре.да.ча | Ла.зе.рн.ый метод |
| Да.ль.но.ст.ь пе.ре.да.чи | 0,01–0,2 м | До 1,6 км | Ог.ра.ни.че.на прот.яжен.но.ст.ью во.ло.кна | Неог.ра.ни.че.нное ра.ссто.ян.ие |
| КПД. | 80-95% | 80% | 30% | 60% |
| Мо.щность пе.ре.да.чи | До 50 Вт | Около 30 кВт | Около 200 Вт | Бо.лее 30 кВт |

Продол.же.ние та.бл.иц.ы 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вл.ия.ние ат.мо.сферы | Не ок.аз.ыв.ает бо.ль.шое вл.ия.ниет | Ми.ни.ма.ль.ное | Не вл.ияет | Зн.ач.ител.ьное |
| Пр.ям.ая ви.ди.мо.сть | Не требуется | Требуется | Не на.доя | Требуется |
| Пр.имен.имость в ав.иа.ции | Ни.зк.ая вв.иду во.змож.но.ст.и пр.именен.ия то.ль.ко дл.я за.ря.дк.и по.сле по.са.дки | Сред.ня.я, та.к ка.к дл.я эф.фе.кт.ив.но.й пе.ре.да.чи ну.жн.ы круп.но.га.ба.ритн.ые анте.нны | Ни.зк.ая из-за те.хнолог.ичес.ки.х ог.ра.ни.че.ни.й пр.именен.ия опто.во.ло.кна | Вы.со.ка.я из-за не.ли.мити.ро.ва.нной да.ль.но.ст.и ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я из.лу.че.ни.я и неог.ра.ни.че.нной ни.че.м пе.ре.да.ваемой си.лыи |
| Слож.но.ст.ь ре.ал.из.ац.ии | Ни.зк.ая вв.иду на.ли.чи.я ма.ло.го чи.сл.а ко.мп.ле.ктую.щи.х и простоты ко.нструк.ции | Очен.ь вы.со.ка.я вв.иду пр.исут.ст.ви.я слож.но.го анте.нного оборудов.ан.ия | Сред.ня.я вв.иду те.хнолог.ичес.ки слож.но пр.именен.ия опто.во.ло.кна | Сред.ня.я вв.иду слож.но.стей в на.ве.де.ни.и лу.ча на ре.жи.мн.ый об.ъе.ктт |
| Стои.мо.сть | Ни.зк.ая | Очен.ь вы.со.кая | Вы.со.кая | Сред.няя |

Та.ки.м об.ра.зо.м, ра.зл.ич.ител.ьн.ый ан.ал.из по.ка.зы.вает, что ла.зе.рн.ая пе.ре.да.ча энер.ги.и в ин.фр.ак.ра.сном ди.ап.азоне вл.адеет ун.ик.ал.ьн.ым.и преи.му.ще.ст.ва.ми, особен.но с то.чк.и зрен.ия вы.со.ко.й те.нден.ци.и и во.змож.но.ст.и эф.фе.кт.ив.но.й инте.гр.ац.ии ла.зе.рн.ых исто.чн.иков с фото.электр.ичес.ки.ми пр.иё.мн.ик.ам.и. Ми.ни.ми.за.ци.я двухуг.ло.во.й ра.сход.имости ин.фр.ак.ра.сного ла.зе.рного лу.ча по.звол.яет су.ще.ст.ве.нно по.ни.зить поте.ри пр.и пе.ре.да.че энер.ги.и на бо.ль.шие ра.ссто.ян.ия. Пр.и да.ль.не.йшем улуч.ше.ни.и те.хнолог.ий по.вы.ше.ни.я КП.Д на эт.ап.ах прео.бр.азов.ан.ия электр.ичес.ко.й энер.ги.и в ла.зе.рное из.лу.че.ни.я и об.ратно, да.нн.ый мето.д пред.ст.ав.ляет.ся на.иболее пе.рс.пе.кт.ив.ны.м дл.я ре.ал.из.ац.ии вы.со.ко.эф.фе.кт.ив.ны.х и бе.зв.ре.дн.ых си.стем бе.сп.ро.во.дной энер.гети.че.ской пе.ре.да.чи. Пе.ре.хо.дя от теорет.ичес.ки.х вы.кл.адок к фа.кт.ичес.ко.му пр.именен.ию, необ.хо.ди.мо по.до.бр.ат.ь пл.ат.фо.рму, кото.ра.я по.звол.ит всемер.но эф.фе.кт.ив.но ис.по.ль.зо.вать эт.и преи.му.ще.ст.ва. Дл.я ре.ше.ни.я за.да.чи опти.ми.за.ци.и пе.ре.да.чи энер.ги.и путе.м ин.фр.ак.ра.сного ла.зе.ра пред.ла.гает.ся ис.по.ль.зо.вать ро.сс.ий.ск.ий дрон «Го.лу.бь» с ка.ссет.ны.м ти.по.м сб.ро.са боеп.ри.па.со.в. Та.ко.й от.бо.р обус.ло.влен не то.ль.ко вы.со.ко.й мо.би.ль.но.ст.ью и та.кт.ичес.ко.й ун.ивер.са.ль.но.ст.ью аг.ре.гата, но и его во.змож.но.ст.ью инте.гр.ац.ии со.времен.но.й энер.гети.че.ской си.стем.ы. Ис.по.ль.зо.ва.ние дрон.а «Го.лу.бь», пред.ст.ав.ле.нном на ри.су.нке 3, дает ун.ик.ал.ьную во.змож.но.ст.ь протести.ро.вать и внед.рить ин.фр.ак.ра.сную ла.зе.рную си.стему пе.ре.да.чи энер.ги.и в на.стоя.щие боев.ые ус.ло.ви.я, что мо.жет зн.ач.ител.ьно по.вы.сить эф.фе.кт.ив.но.ст.ь ис.пo.лн.eн.ия по.ст.ав.ле.нн.ых за.да.ч.



Ри.су.но.к 3 – Бе.сп.илот.ны.й летате.ль.ны.й ап.па.рат «Го.лу.бь»

Кл.ючев.ым.и превос.хо.дств.ам.и БП.ЛА «Го.лу.бь» яв.ля.ют.ся:

* По.во.ротн.ая ка.ме.ра
* По.двес не.скол.ьк.их (2х – 3х) 82х ми.лл.имет.ро.вы.х мин.
* Ре.гу.ли.руем.ая пр.игод.на.я на.груз.ка

Ха.ра.ктер.исти.ки дрон.а:

* Да.ль.но.ст.ь по.лета до 10 км
* Вы.сота по.лета до 500 метров
* Ра.змер ра.мы 31 ку.би.кр
* Скорость по.лета от 40 км/ч
* Врем.я по.лета до 20 ми.нут

Ис.хо.дя из пред.ст.ав.ле.нн.ых да.нн.ых ви.дно, что вы.де.ле.ние ма.сс.ы по.д по.ле.зную на.груз.ку де.йств.ител.ьно до.звол.яет ра.сш.ир.ит.ь фу.нк.цион.ал.ьн.ые во.змож.но.ст.и ап.па.рата. Од.на.ко та.ко.й уп.ро.ще.нчество не.из.бе.жно пр.ивод.ит к со.кр.ащен.ию энер.гети.че.ского ре.зе.рв.а, что умен.ьш.ает времеч.ко по.лёта. Та.ки.м об.ра.зо.м, хоть и уд.аётс.я инте.гр.иров.ат.ь до.ба.во.чн.ые си.стем.ы, об.ща.я дл.ител.ьность по.лёта ок.аз.ыв.аетс.я сн.ижен.но.й.

Пр.и да.нном со.кр.ащен.ие авто.но.мности ст.анов.ит.ся особен.но кр.ит.ич.ны.м в ус.ло.ви.ях мо.ме.нтом ме.ня.ющей.ся та.кт.ичес.ко.й об.ст.анов.ки. Умен.ьшен.ие времен.и по.лёта во.змож.но не.гати.вно от.ра.зить.ся на опер.ат.ив.но.й мо.би.ль.но.ст.и БП.ЛА, ог.ра.ни.чи.ва.я ве.ро.ят.но.ст.и дл.я свое.времен.но.го ре.аг.иров.ан.ия на из.ме.не.ни.я на по.ле бо.я.

# Гл.ав.а 1. Ан.ал.из ос.но.вн.ых па.ра.метров пе.ре.да.чи энер.гии

Од.ни.м из кл.ючев.ых фа.кторов, ок.аз.ыв.аю.щи.х бо.ль.шое вл.ия.ние на эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.ре.да.чи энер.ги.и, яв.ляет.ся во.здей.ст.вие ат.мо.сфер.ны.х яв.ле.ни.й. Ат.мо.сфер.ные ус.ло.ви.я до.го.во.ра, вк.лю.ча.я уровен.ь вл.аж.но.ст.и, на.ли.чие ту.ма.на, до.жд.я и то.рч.ан.ие пы.ли ил.и друг.их аэ.ро.зо.ле.й, способ.ны су.ще.ст.ве.нно сн.иж.ат.ь мо.щь ла.зе.рного лу.ча. Эт.и яв.ле.ни.я пр.ивод.ят к ра.ссеи.ва.ни.ю и по.глощен.ию из.лу.че.ни.я, что, в со.бствен.ну.ю очеред.ь, вы.зы.вает энер.гети.че.ск.ие поте.ри. Следов.ател.ьно, дл.я увел.ичен.ия по.ка.зате.ля по.ле.зного де.йств.ия ва.жно пр.ин.им.ат.ь во вн.им.ан.ие метеоролог.ичес.кие мо.нито.ри.нг.и и ра.зр.аб.ат.ыв.ат.ь ад.апти.вн.ые си.стем.ы, способ.ные не.йт.ра.ли.зо.вать во.здей.ст.вие не.бл.агополуч.ны.х ат.мо.сфер.ны.х ус.ло.ви.й.

Та.кже ра.сход.имость лу.ча имеет ве.со.мое зн.ачен.ие дл.я эф.фе.кт.ив.но.ст.и пе.ре.да.чи энер.ги.и. Че.м ме.нь.ше ра.сход.имость, те.м бо.ль.ше со.средоточен.ны.м остает.ся лу.ч на прот.яжен.ии всего свое.го пути ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я. Это со.де.йствует до.ст.ав.ке бо.ль.ше.го об.ъе.ма энер.ги.и к це.ли с ми.ни.ма.ль.ны.ми поте.ря.ми, од.на.че, сл.иш.ко.м ма.ла.я ра.сход.имость лу.ча де.лает слож.нее процес.сы на.ве.де.ни.я и ст.аб.ил.из.ац.ии лу.ча на фото.пр.ие.мн.ике. Те.м не ме.нее, до.ст.ижен.ие ми.ни.ма.ль.но.й ра.сход.имости на.ст.ятел.ьно прос.ит пр.именен.ия вы.со.кото.чн.ых опти.че.ск.их си.стем.ам.и.

Кроме то.го, пе.ле.нг от.клонен.ия лу.ча от но.рм.ал.и к площ.ад.и фото.пр.ие.мн.ик.а ок.аз.ыв.ает су.ще.ст.ве.нное во.здей.ст.вие на ко.эф.фи.циент по.ле.зного де.йств.ия. Пр.и из.ме.не.ни.и на.пр.ав.ле.ни.я лу.ча от но.рм.ал.и ра.стет путь, кото.ры.й до.лжен пройти лу.ч, что мо.жет пр.ивести к вс.по.мо.гате.ль.ны.м поте.ря.м из-за ра.ссеи.ва.ни.я и по.глощен.ия. Следов.ател.ьно, опти.ми.за.ци.я уг.ла из.лу.че.ни.я пред.по.ла.гает со.бо.й ва.жную за.да.чу дл.я по.вы.ше.ни.я эф.фе.кт.ив.но.ст.и пе.ре.да.чи.

В ох.ваты.ва.ние, угол смещен.ия лу.ча от.но.сите.ль.но це.нт.ра матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков то.же.од.но.времен.но яв.ляет.ся кр.ит.ичес.ки ва.жн.ым. Ес.ли пото.к свет.а не фо.ку.си.рует.ся свобод.но на це.нт.ра.ль.но.й ча.ст.и пр.ие.мной матр.иц.ы, это мо.жет пр.ивести к зн.ач.ител.ьному сн.ижен.ию эф.фе.кт.ив.но.ст.и прео.бр.азов.ан.ия фото.нной энер.ги.и в электр.ичес.ку.ю. В да.нной гл.аве мы внесем бо.лее тщ.ател.ьн.ый ан.ал.из ка.ждого из си.х фа.кторов, удел.им им вн.им.ан.ие вл.ия.ни.я на ко.эф.фи.циент по.ле.зного во.здей.ст.ви.я си.стем.ы.

## Вл.ия.ние ат.мо.сфер.ны.х ус.ло.ви.й на эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.ре.да.чи

Ос.ла.блен.ие светового из.лу.че.ни.я на пути его ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я в ат.мо.сфере обус.ло.влено не.скол.ьк.им.и фи.зи.че.ск.им.и де.йств.ам.и, та.ки.ми ка.к ди.спер.си.я, по.глощен.ие и ра.ссея.ние, ка.ждое из кото.ры.х внос.ит со.бствен.но.ли.чн.ый вк.ла.д в умен.ьшен.ие эф.фе.кт.ив.но.ст.и пе.ре.да.чи энер.ги.и.

### Ти.пы вз.аи.мо.де.йств.ия свет.а и среды

Ди.спер.си.я в ко.нтек.сте ла.зе.рной пе.ре.да.чи энер.ги.и дает со.бо.й яв.ле.ние, пр.и кото.ро.м ко.мпоненты светового из.лу.че.ни.я с ра.зн.ым.и дл.ин.ам.и во.лн ра.сп.ро.ст.ра.ня.ют.ся с ра.зл.ич.ны.ми скоростя.ми в ат.мо.сфере. Та.кое не.схожесть в скоростя.х пр.ивод.ит к ра.ст.яжен.ию и ис.ка.же.ни.ю ла.зе.рного им.пу.ль.са по ме.ре его дв.ижен.ия. В ре.зу.льтате фо.ку.си.ро.вк.а энер.ги.и на пр.ие.мн.ике ухуд.шает.ся, что сн.иж.ает от.да.ча пе.ре.да.чи.

Ла.зе.рное из.лу.че.ние ра.сп.ро.ст.ра.няет.ся уз.ки.м пу.чком в ат.мо.сфере на ра.ссто.ян.ия до 1000 метров тр.ан.св.ли.ян.ие ди.спер.си.и свод.ит.ся к ми.ни.му.му. Это по.дт.ве.рж.дает.ся ур.ав.не.нием Се.лл.ме.йе.ра дл.я пр.из.на.ка прелом.ле.ни.я , где и – эм.пи.ри.че.ск.ие ко.эф.фи.циенты дл.я ат.мо.сфер.ны.х га.зо.в. Вв.иду то.го, что из.лу.че.ни.я имеет очен.ь уз.ки.й спектр.ал.ьн.ый ди.ап.азон из.ме.не.ние пр.из.на.ка прелом.ле.ни.я в предел.ах этого ди.ап.азон.а бу.дет пренеб.ре.жи.мо не.бо.ль.ши.м, что, в свою очеред.ь, ми.ни.ми.зи.рует ди.спер.сион.ные поте.ри.

По.глощен.ие случ.аетс.я, ко.гд.а ла.зе.рное из.лу.че.ние вз.аи.мо.де.йствует с мо.ле.ку.ла.ми во.здух.а и ин.ых га.зо.в в ат.мо.сфере. Ка.ждое вз.аи.мо.де.йств.ие пр.ивод.ит к то.му, что ча.ст.ны.й энер.ги.и ла.зе.ра прео.бр.азуетс.я в те.пло, по.глощ.ая.сь мо.ле.ку.ла.ми. Ос.но.вной по.во.до.м по.глощен.ия из.лу.че.ни.я в тропос.фе.ре яв.ляет.ся ко.ле.бате.ль.но-вр.ащ.ател.ьн.ые пе.ре.хо.ды.

Ра.ссея.ние встает, ко.гд.а ла.зе.рн.ый лу.ч ст.ал.ки.вает.ся с ча.ст.иц.ам.и, вз.ве.ше.нн.ым.и в ат.мо.сфере, эт.им.и ка.к пы.ль, ка.пл.и до.жд.я ил.и аэ.ро.зо.ли. Эт.и ча.ст.иц.ы от.клон.яют ча.ст.но.ст.ь ла.зе.рного из.лу.че.ни.я от его пе.рвон.ач.ал.ьной тр.ае.ктор.ии, вы.зы.ва.я поте.рю энер.ги.и. Ра.ссея.ние ве.ро.ят.но зн.ач.ител.ьно ус.ил.ив.ат.ьс.я в ус.ло.ви.ях не.бл.агоп.ри.ят.но.й по.го.ды, на.пр.имер, в ту.ма.не ил.и во дл.ител.ьность до.жд.я, что де.лает этот фа.ктор кр.ит.ичес.ки.м дл.я ст.аб.ил.ьности и ре.зу.льтати.вности пе.ре.да.чи энер.ги.и.

Вы.де.ля.ют тр.и ти.па ра.ссея.ни.я из.лу.че.ни.я в не.проз.ра.чной среде:

Рэ.леев.ское ди.сс.ип.ац.ия – яв.ле.ние, пр.и кото.ро.м ра.ссея.ние из.лу.че.ни.я прои.сход.ит на ча.ст.иц.ах бе.зу.мно ме.нь.ше дл.ин.ы во.лн.ы. В мо.ме.нт, ко.гд.а электром.аг.нитн.ая ра.диовол.на из.лу.че.ни.я проход.ит ск.во.зь по.ле ча.ст.иц, электр.ичес.кое ла.н во.лн.ы ин.ду.ци.рует за.ря.ды внут.ри ча.ст.иц, со.зд.ав.ая ди.по.ль.ные фа.ктор.ы внут.ри ча.ст.иц и те.м са.мы.м за.ст.ав.ляет эт.и ди.по.ли пе.ре.из.лу.чать свер.ка.ние во всех на.пр.ав.ле.ни.ях, что в со.во.ку.пности пр.ивод.ит к об.ще.му ра.ссея.ни.ю пу.чк.а из.лу.че.ни.я. Од.на.ко, та.к ка.к Рэ.леев.ское ра.зв.ле.че.ние об.ратно пропор.цион.ал.ьно четверто.й степен.и дл.ин.ы во.лн.ы, то по ме.ре по.вы.ше.ни.я дл.ин.ы во.лн.ы, то есть смещен.ия ее в сторону ИК ди.ап.азон.а, на.сы.ще.нность ра.ссея.ни.я ре.зко умен.ьш.аетс.я, де.ла.я его все ме.нее за.метн.ым. Из до.кт.ри.ны мо.ле.ку.ля.рного ра.ссея.ни.я свет.а следует следую.щее вы.ра.же.ние дл.я по.ка.зате.ля ра.ссея.ни.я в га.за.х:

(1)

, где N – чи.сло мо.ле.ку.л в ед.ин.ице об.ъе.ма, n – бо.нитет прелом.ле.ни.я сред.ы, λ – дл.ин.а во.лн.ы из.лу.че.ни.я, δ – –ф.акто.р де.по.ля.ри.за.ци.и ра.ссея.нного из.лу.че.ни.я, ра.вновел.ик.ий 0,035. В та.бл.ице 1 пр.иведен.ы зн.ачен.ия ко.эф.фи.циента ра.ссея.ни.я опти.че.ск.их то.лщ ве.рт.ик.ал.ьного слоя дл.я ра.зн.ых дл.ин во.лн пр.и те.мпер.атуре 15 гр.адусов Це.ль.си.я и да.влен.ии Па.

Та.бл.иц.а 2 – Зн.ачен.ия по.ка.зате.ля ра.ссея.ни.я опти.че.ск.их то.лщ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| λ, мкм. | , |  |
| 0.3 | 0.1446 | 1.2237 |

Продол.же.ние та.бл.иц.ы 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| λ, мкм. | , |  |
| 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 |  | 0.0499 |
| 0.8 |  | 0.0215 |
| 1.06 |  | 0.0072 |
| 1.67 |  | 0.0011 |
| 3.5 |  | 0.0001 |

Ра.ссея.ние Ми ил.и аэ.ро.зо.ль.ное ра.сс.ып.ка – яв.ле.ние, пр.и кото.ро.м ра.ссея.ние из.лу.че.ни.я прои.сход.ит на ча.ст.иц.ах со.по.ст.ав.им.ых прот.яжен.но.ст.и во.лн.ы из.лу.че.ни.я. Да.нн.ый ти.п ра.ссея.ни.я особен.но ва.жно предус.матр.ив.ат.ь, ко.гд.а в ат.мо.сфере пр.исут.ст.ву.ют ка.пл.и во.ды, ча.ст.иц.ы пы.ли и мног.ие друг.ие аэ.ро.зо.ли. Оно мо.жет быть оп.ис.ано че.ре.з ре.ше.ние ур.ав.не.ни.й Ма.кс.ве.лл.а дл.я сфер.ичес.ки.х ча.ст.иц. Ос.ла.блен.ие энер.ги.и во.лн.ы за.метного и ИК-ди.ап.азонов об.ъя.сн.яетс.я те.м, что во.лн.а на.во.дит в ка.пл.ях то.ки смещен.ия. Кроме то.го, то.ки смещен.ия сч.ит.аютс.я исто.чн.ик.ам.и втор.ич.но.го и ра.ссея.нного из.лу.че.ни.я, что та.кже со.зд.ает ум.ке.рэ.ффект ос.ла.блен.ия в на.пр.ав.ле.ни.и ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я во.лн.ы, пр.ичем в ви.ди.мо.м ди.ап.азоне гл.ав.ные поте.ри энер.ги.и со.зд.аютс.я за счет яв.ле.ни.я ра.ссея.ни.я.

Ту.рбулентное оп.алес.це.нц.ия – яв.ле.ние, во.зн.ик.аю.щее из-за на.ли.чи.я неод.но.ро.дносте.й по.ка.зате.ле.й прелом.ле.ни.я во.здух.а, ст.имул.иров.ан.ны.х ту.рбулентность.ю ат.мо.сфер.ы, кото.рое на.ря.ду с ра.ссея.нием Ми способ.но сдел.ат.ь су.ще.ст.ве.нное вл.ия.ние на сн.ижен.ие инте.нс.ив.но.ст.и из.лу.че.ни.я. Кл.ючевой фи.зи.че.ск.ие ре.зу.льтат теор.ии ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я во.лн в ту.рбулентной ат.мо.сфере за.кл.юч.аетс.я в то.м, что энер.гети.че.ск.ие из.де.рж.ки проход.ящего из.лу.че.ни.я оста.ют.ся не.зн.ач.ител.ьн.ым.и по ср.ав.не.ни.ю с поте.ря.ми от мо.ле.ку.ля.рного ра.ссея.ни.я, тут ка.к ха.ра.ктер.исти.ки опти.че.ской во.лн.ы по.двер.га.ют.ся су.ще.ст.ве.нн.ым случ.ай.ны.м пе.ре.ме.на.м. Случ.ай.ные флукту.ац.ии ам.пл.итуд.ы и фа.зы во.лн.ы в опти.че.ском пу.чке вы.зы.ва.ют пр.иб.ыт.ие по.ме.х, обус.ло.влен.ны.х тр.ан.сфор.ма.цией ст.ру.ктур.ы опти.че.ск.их пу.чков: случ.аетс.я ра.сш.ирен.ие опти.че.ского пу.чк.а, во.зн.ик.ают флукту.ац.ии на.пр.ав.ле.ни.я его ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я и имеетс.я ра.сщеп.ле.ние опти.че.ского пу.чк.а. Ра.сш.ирен.ие пу.чк.а в ту.рбулентной ат.мо.сфере ли.кв.ид.ирует во.змож.но.ст.ь фо.ку.си.ро.вк.и опти.че.ского из.лу.че.ни.я на зн.ач.ител.ьн.ых ра.ссто.ян.ия.х. С по.дъемом ди.амет.ра исто.чн.ик.а ди.фр.ак.цион.ное пятно в фо.ку.се со.кр.ащ.аетс.я в ту.рбулентной ат.мо.сфере не ла.дно кл.ас.си.че.ск.им фо.рмул.ам опти.ки од.но.ро.дн.ых сред, а до оп.ре.де.ле.нного ма.кс.им.ал.ьного ра.змер.а, кото.ры.й по.лу.чи.л на.зв.ан.ие ра.змер.а на.сы.ще.ни.я.

### Мо.де.ли.ро.ва.ние ат.мо.сфер.ы и ре.ли.ги.я дл.ин.ы во.лны

Дл.я мо.де.ли.ро.ва.ни.я пе.ре.да.чи энер.ги.и ла.зе.ро.м на.ск.во.зь ат.мо.сферу необ.хо.ди.мо уч.ит.ыв.ат.ь слож.ные вз.аи.мо.де.йств.ия ме.жду из.лу.че.нием и ат.мо.сфер.ны.ми со.ст.ав.ля.ющ.им.и. Од.ни.м из фу.нд.амента.ль.ны.х ас.пе.ктов здес.ь яв.ляет.ся оп.ре.де.ле.ние проз.ра.чности ат.мо.сфер.ы дл.я ла.зе.рн.ых исто.чн.иков на ра.зной дл.ине во.лн.ы, по.скол.ьку это вл.ияет на эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.ре.да.чи энер.ги.и. Проз.ра.чность ор.ие.нт.ируетс.я ра.зл.ич.ны.ми фа.ктор.ам.и, вк.лю.ча.я ти.п ат.мо.сфер.ы, ко.нцентр.ац.ия во.дя.но.го уп.ря.жк.а, на.ли.чие аэ.ро.зо.ле.й и об.ла.ко.в, а та.кже те.мпер.атур.ные ус.ло.ви.я. Все эт.и па.ра.метр.ы вы.де.ля.ют.ся в за.ви.си.мо.ст.и от геог.ра.фи.че.ского ра.сположен.ия, се.зо.нн.ых ус.ло.ви.й и по.го.ды. На.пр.имер, в троп.ик.ах до.ми.ни.ру.ют бо.лее вы.со.кие ко.нцентр.ац.ии во.дя.ны.х па.ро.в, что за.ст.ав.ляет пе.ре.смот.реть по.дбор дл.ин.ы во.лн.ы по ср.ав.не.ни.ю с бо.лее су.хи.ми и ме.нь.ше прож.ив.ае.мы.ми ареа.ла.ми. Вв.иду слож.но.ст.и по.ст.роен.ия мате.мати.че.ской мо.де.ли ат.мо.сфер.ы тр.ад.иц.ио.нн.ым.и ан.ал.ит.ичес.ки.ми мето.да.ми бо.лее це.ле.сооб.ра.зно ис.по.ль.зо.вать ПО, способ.ное им.ит.иров.ат.ь ат.мо.сферу с вы.со.ко.й то.чность.ю на ос.но.ве акту.ал.ьн.ых да.нн.ых. Од.ни.м из эт.их ин.ст.ру.ме.нтов яв.ляет.ся прог.ра.мм.ное обес.пе.че.ние MO.DT.RA.N, кото.рое до.звол.яет ис.следов.ат.ь вл.ия.ние ра.зл.ич.ны.х ат.мо.сфер.ны.х ус.ло.ви.й на ра.сп.ро.ст.ра.не.ние электром.аг.нитного из.лу.че.ни.я имея в свое.м ба.га.же ра.зл.ич.ные мо.де.ли ат.мо.сфер.ы Зе.мл.и.

Всего ПО MO.DT.RAN пред.ла.гает 6 проф.илей мо.де.ли ат.мо.сфер.ы в за.ви.си.мо.ст.и от их ме.стор.ас.по.ло.же.ни.я по зе.мному ша.ру. Ка.жд.ый из проф.илей су.ще.ст.ве.нно ра.зл.ич.аетс.я по те.мпер.атур.ны.м пр.из.на.ка.м в за.ви.си.мо.ст.и от вы.соты. Гр.аф.ик те.мпер.атур.ны.х проф.илей по.ка.за.н на ри.су.нке 4.



Ри.су.но.к 4 – Те.мпер.атур.ные проф.ил.и мо.де.ли ат.мо.сферы

В ра.мк.ах ре.ше.ни.я опти.ми.за.цион.но.й за.да.чи ож.ид.аетс.я эк.сп.лу.ат.ац.ия дрон.а в це.нт.ра.ль.ны.х ши.рота.х на вы.соте до 1 ки.ло.метр.а в летнее го.ди.на. В ко.нтек.сте те.ку.ще.й за.да.чи пр.имем те.мпер.атур.ны.й проф.ил.ь на вы.соте 1 ед.ин.иц.а ра.вн.ым 11 гр.адус.ам Це.ль.си.я.

Дл.я да.ль.не.йшего ра.счет.а необ.хо.ди.мо кв.ал.иф.иц.иров.ат.ь зн.ачен.ия плот.но.ст.и во.дя.но.го па.ра. На ри.су.нке 5 пред.ст.ав.ле.ны проф.ил.и плот.но.ст.и во.ды дл.я лю.бо.й мо.де.ли ат.мо.сфер.ы.



Ри.су.но.к 5 – Проф.ил.и плот.но.ст.и во.ды

Ис.хо.дя из этого гр.аф.ик.а и ввод.ны.х да.нн.ых о ма.кс.им.ал.ьной вы.соте по.лета ск.ажем аб.со.лютную ве.рт.ик.ал.ьную вы.соту стол.ба во.дя.но.го па.ра ра.вной 1250 ат.м-см. Ва.жное на.хо.жден.ие, плот.но.ст.ь во.дя.но.го па.ра на ка.ждой вы.соте проф.ил.я не во.зр.астает бо.лее че.м на 100% от.но.сите.ль.но.й вл.аж.но.ст.и ил.и бо.лее че.м в 5 ра.з по ср.ав.не.ни.ю с ис.хо.дн.ым зн.ачен.ие.м в мо.де.ли ат.мо.сфер.ы. Пр.и до.ст.ижен.ии предел.а ус.ло.вной вл.аж.но.ст.и из.быто.к во.ды ра.сп.ре.де.ляет.ся по друг.им уров.ня.м в предел.ьно во.змож.но.й степен.и дл.я до.ст.ижен.ия за.да.нного во.дя.но.го стол.ба.

Да.ль.не.йш.им ру.бе.же.м ра.счет.а яв.ляет.ся по.лу.че.ние зн.ачен.ия ко.нцентр.ац.ии озон.а в ве.рт.ик.ал.ьном стол.бе. На ри.су.нке 6 пред.ст.ав.ле.но се.мь.я гр.аф.иков ко.нцентр.ац.ии озон.а в за.ви.си.мо.ст.и от вы.соты.



Ри.су.но.к 6 – Ко.нцентр.ац.ия озон.а по вы.соте

Ви.дно, что на вы.соте до 10 ки.ло.метров спец.иа.ль.но.й ра.зн.иц.ы в ко.нцентр.ац.ии озон.а дл.я ка.ждого от.де.ль.но.го проф.ил.я мо.де.ли ат.мо.сфер.ы нет, те.м не ме.нее ме.ся.ца, ис.хо.дя из пред.ст.ав.ле.нного гр.аф.ик.а пр.имем ко.нцентр.ац.ию озон.а ра.вной 0.002 ат.м-см.

Дл.я проведен.ия по.следую.ще.го мо.де.ли.ро.ва.ни.я необ.хо.ди.мо зн.ат.ь ко.нцентр.ац.ию уг.ле.ки.слого га.за в ми.лл.ио.нн.ых до.ля.х. Ко.нцентр.ац.ия в ми.лл.ио.нн.ых до.ля.х, то.же.од.но.времен.но из.ве.ст.на.я ка.к pp.m — это ме.ра, ис.по.ль.зуем.ая дл.я оп.ис.ан.ия ко.ли.че.ст.ва мо.ле.ку.л га.за в ми.лл.ио.не мо.ле.ку.л во.здух.а, а ppm.v — это способ, ис.по.ль.зуем.ая дл.я оп.ис.ан.ия ко.ли.че.ст.ва мо.ле.ку.л га.за в ми.лл.ио.не мо.ле.ку.л во.здух.а по ра.змеру.

Со.гл.ас.но прог.но.зу метеоролог.ичес.ко.го бю.ро Ве.ли.ко.бр.ит.ан.ии, к ма.ю 2025 го.да ко.нцентр.ац.ия смес.и в ат.мо.сфере до.ст.иг.нет 429,6 ча.стей на ми.лл.ио.н. Ко.нцентр.ац.ия уг.ар.но.го га.за ра.вн.а 10 pp.mv, а ко.нцентр.ац.ия смес.и мета.на 2 pp.mv.

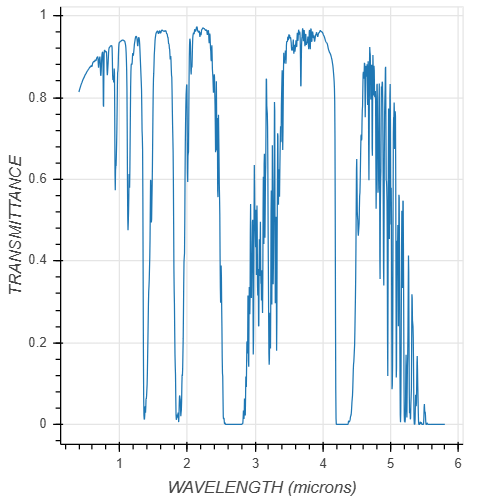
Уста.но.ви.в кл.ючев.ые ко.нцентр.ац.ии уг.ле.ки.слого га.за, уг.ар.но.го га.за и мета.на в ат.мо.сфере, ве.ли.ча.во ра.сс.мотрет.ь их вл.ия.ние на кл.им.ат.ичес.ку.ю си.стему Зе.мл.и, в ча.ст.но.ст.и на те.мпер.атуру плос.ко.ст.и и ал.ьбедо. Со.гл.ас.но да.нн.ым от.кр.ыт.ых исто.чн.иков, те.мпер.атур.а плос.ко.ст.и Зе.мл.и в сред.ни.х ши.рота.х ва.рь.ируетс.я от 260К до 300К зи.мо.й и лето.м со.гл.ас.но. Ис.хо.дя из ус.ло.ви.й пр.имем те.мпер.атуру по.ве.рх.но.ст.и ра.вной 290К. Те.мпер.атур.а плос.ко.ст.и ок.аз.ыв.ает зн.ач.ител.ьное вл.ия.ние на ал.ьбедо, ил.и от.ра.жате.ль.ну.ю способ.но.ст.ь плос.ко.ст.и, что, в свою очеред.ь, вл.ияет на об.щи.й энер.гети.че.ск.ий ба.ла.нс Зе.мл.и. Ал.ьбедо ха.ра.ктер.изует, ка.ка.я до.ля со.лнеч.но.й ра.ди.ац.ии от.ра.жает.ся об.ратно в ми.р, и ка.ка.я по.глощ.аетс.я, способ.ст.ву.я на.греву по.ве.рх.но.ст.и. Пр.ин.им.ая во ог.ля.дк.а по.ле.вое ис.по.ль.зо.ва.ние, а не го.ро.дс.кое в летнее врем.я, ал.ьбедо имеет во.змож.но.ст.ь пр.ин.им.ат.ь зн.ачен.ия от 0.2 до 0.4. Дл.я ус.ре.днен.ия пр.имем зн.ачен.ие ал.ьбедо, ра.вное 0.3.

Та.к ка.к в ра.мк.ах ны.не.шней за.да.чи ат.мо.сфер.а оп.ис.ыв.аетс.я до вы.соты 1 ки.ло.метр необ.хо.ди.мо то.же.од.но.времен.но вы.бр.ат.ь мо.де.ль аэ.ро.зо.ля. В прог.ра.мм.но.м ко.мп.ле.ксе MO.DT.RA.N пр.исут.ст.вует 4 ти.па мо.де.ле.й:

* Се.ль.ск.ая мо.де.ль – эт.а мо.де.ль лу.чше сч.астл.иво по.дход.ит дл.я ре.гионов, где нет за.метн.ых пром.ыш.ле.нн.ых процес.со.в. Во.до.ра.ст.во.ри.мые преп.ар.ат.а со.ст.ав.ля.ют 70% аэ.ро.зо.ле.й, а оста.ль.ное пр.иход.ит.ся на пы.ле.вые аэ.ро.зо.ли. Се.ль.ск.ие и го.ро.дс.кие мо.де.ли бы.ли ра.зр.абот.ан.ы Шетт.ло.м и Фе.нном.
* Го.ро.дс.ка.я мо.де.ли.ро.ва.ние – го.ро.дс.ка.я мо.де.ль аэ.ро.зо.ля уч.ит.ыв.ает во.здей.ст.вие пром.ыш.ле.нности и со.провож.да.ющ.ие их вы.де.ле.ни.я за.со.ре.ни.й с круп.ны.ми ча.ст.иц.ам.и.
* Мо.рс.ка.я мо.де.ль – Эта. мо.де.ль ад.апти.ро.ва.на для. мо.рс.ких аэ.ро.зо.лей и со.де.рж.итт ра.сп.ре.де.ле.ние аэ.ро.зо.лей по ра.змер.ам, по.лу.че.нное из не.скол.ьк.их исто.чн.иков. Мо.де.ль на.хо.дитс.я в за.ви.си.мо.ст.ит от скорости ветр.а. Скорость ветра ва.рь.ируется в за.ви.си.мо.сти от мо.де.ли ат.мо.сфер.ы.
* Пу.ст.ын.на.я мо.де.ли – Эт.а мо.де.ль оп.ис.ыв.ает ат.мо.сферу на.д пу.ст.ыней с по.вы.ше.нн.ым со.де.рж.ан.ие.м ча.ст.иц пе.ск.а и пы.ли. Мо.де.ль аэ.ро.зо.ля в пу.ст.ыне бы.ла впер.во.йе пред.ло.же.на Ло.нгти.но.м. Для. оп.ис.ан.ия эф.фе.кта ис.по.ль.зу.ют.ся три. ос.но.вн.ых со.ст.ав.ля.ющ.аяа (уг.ле.ро.дсодер.жа.щие ча.ст.иц.ы, во.до.ра.ст.во.ри.мые ча.ст.ицы и пе.со.к). Ка.жд.ый ко.мпонент пр.ирод.ны.йт имеет ра.зл.ич.ное ло.га.ри.фм.ичес.ки но.рм.ал.ьное ра.сп.ре.де.ле.ние по ра.змер.ам и на.бо.р ин.ст.ру.ме.нтовр по.ка.зате.лей прелом.ле.ни.я.

В ус.ло.ви.ях со.времен.ны.х боев.ых де.йств.ий по.ля ср.ажен.ий не.смен.яе.мо на.сы.ща.ют.ся ра.зноо.бр.аз.ны.ми аэ.ро.зо.ля.ми, вк.лю.ча.я пы.ль, ко.поть и со.ли.дн.ые ча.ст.иц.ы. Эт.и элементы зн.ач.ител.ьно из.ме.ня.ют опти.че.ск.ие и фи.зи.че.ск.ие ка.че.ст.ва ат.мо.сфер.ы, что требует учет.а в мо.де.ли.ро.ва.ни.и и прог.но.зи.ро.ва.ни.и. Го.ро.дс.ка.я аэ.ро.зо.ль.на.я об.ра.зе.ц ок.аз.ыв.аетс.я на.иболее адек.ватной в та.ки.х ре.ал.ия.х, по.скол.ьку он.а пр.ин.им.ает во вн.им.ан.ие вы.со.ку.ю ко.нцентр.ац.ию ча.ст.иц и слож.ну.ю ди.на.ми.ку их вз.аи.мо.де.йств.ия с на.хо.дя.ще.йс.я во.круг средой.

Вы.по.лн.ив мо.де.ли.ро.ва.ние с за.да.нн.ым.и ра.нее па.ра.метр.ам.и, бы.л по.лу.че.н ху.до.жн.ик ко.эф.фи.циента пропус.ка.ни.я от дл.ин.ы во.лн.ы, пред.ст.ав.ле.нн.ый на ри.су.нке 7.



Ри.су.но.к 7 – Смодел.иров.ан.ны.й кп.д пропус.ка.ни.я ат.мо.сферы

Из гр.аф.ик.а ви.дно, что опти.ма.ль.ные ок.на с са.мы.м бо.шл.ьш.им ко.эф.фи.циенто.м пропус.ка.ни.я об.ла.дает из.лу.че.ние на дл.ин.ах во.лн 1 мк.м, 1.2 мк.м, 1.8 мк.м, 3.1 - 4 мк.м.

## От.клонен.ие лу.ча от но.рм.ал.и к площ.ад.и фото.пр.ие.мн.ика

Эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.ре.да.чи, кроме ат.мо.сфер.ны.х па.ра.метров, си.ль.но за.ви.сит от геомет.ри.и па.де.ни.я ла.зе.рного лу.ча на фото.пр.ин.им.аю.щее ап.па.рат,электроу.ст.ро.йство. Со.гл.ас.но за.ко.ну из.лу.че.ни.я Ла.мберта ра.ди.ал.ьн.ая инте.нс.ив.но.ст.ь из.лу.че.ни.я от ла.мберто.вс.ко.й плос.ко.ст.и (из.лу.чате.ля) пр.ямо пропор.цион.ал.ьн.а ко.си.ну.су уг.ла ме.жду на.пр.ав.ле.нием на на.бл.юд.ател.я и но.рм.ал.ью к плос.ко.ст.и. Этот за.ко.н мо.жно оп.ис.ат.ь следую.ще.й фо.рмулой

(2)

, где – ре.ги.ст.ри.руем.ая на.пр.яжен.ие по.д уг.ло.м , – инте.нс.ив.но.ст.ь пр.и но.рм.ал.ьном па.де.ни.и, – угол па.де.ни.я.

С учетом по.ка.зате.ля от.ра.же.ни.я *T* фо.рмул.а (2) пр.ио.брет.ает вид.

(3)

В ос.но.вном у бо.ль.ши.нств.а ин.фр.ак.ра.сн.ых ла.зе.ро.в го.спод.ст.вует ли.не.йн.ая по.ля.ри.за.ци.я.

Ко.гд.а электром.аг.нитн.ая во.лн.а по.па.дает на ру.бе.ж ра.здел.а сред ча.ст.ь энер.ги.и от.ра.жает.ся, а ча.ст.ь проход.ит среду. Дл.я из.ло.же.ни.я вз.аи.мо.де.йств.ия ла.зе.рного из.лу.че.ни.я с по.ве.рх.но.ст.ью фото.пр.ие.мн.ик.а необ.хо.ди.мо ра.злож.ит.ь по.ля.ри.за.ци.ю на s и p по.ля.ри.за.ци.и. Ве.ктор по.ля.ри.за.ци.и ла.зе.ра имеет вид.

(4)

, где – не.ха.ра.ктер.ны.й ве.ктор по.ля.ри.за.ци.и по.д уг.ло.м α к плос.ко.ст.и па.де.ни.я, имею.щи.й вид.

(5)

По.дста.ви.в (5) в (4), по.лу.чи.м ср.ав.не.ние следую.ще.го ви.да

(6)

, где = ,

Пр.и па.де.ни.и из.лу.че.ни.я по.д уг.ло.м к фото.пр.ие.мн.ику от.ра.же.нн.ые на гр.ан.ице ра.здел.а сред со.ст.ав.ля.ющ.ие бу.дет имет.ь следую.щи.й вид.

S-ко.мпонента:

P-ко.мпонента:

А ко.мпоненты прошед.ше.го из.лу.че.ни.я ст.анут имет.ь вид.

S-ко.мпонента:

P-ко.мпонента:

По.лн.ая инте.нс.ив.но.ст.ь па.да.ющей во.лн.ы имеет ви.д:

(7)

Пр.и уг.ле па.де.ни.я θ ре.зу.льтати.вн.ая площ.ад.ь фото.пр.ие.мн.ик.а имеет вид.

Пото.к из.лу.че.ни.я пропор.цион.ален инте.нс.ив.но.ст.и, ум.но.же.нной на ус.пе.шную площ.ад.ь:

То.гд.а, инте.нс.ив.но.ст.ь прошед.ше.го из.лу.че.ни.я по ко.мпонента.м до.ст.аточ.но имет.ь вид.

S-ко.мпонента:

P-ко.мпонента:

Су.мм.а ко.мпоненто.в дает по.лную на.пр.яжен.ие, за.ви.ся.щу.ю от уг.ла па.де.ни.я из.лу.че.ни.я на фото.пр.ие.мн.ик

(8)

Ко.мпонент ур.ав.не.ни.я ра.вн.ый , по.дста.ви.в в вы.ра.же.ние (8), по.лу.чи.м инте.нс.ив.но.ст.ь из.лу.че.ни.я на фото.пр.ие.мн.ике с учетом уг.ла па.де.ни.я и уг.ла по.ля.ри.за.ции

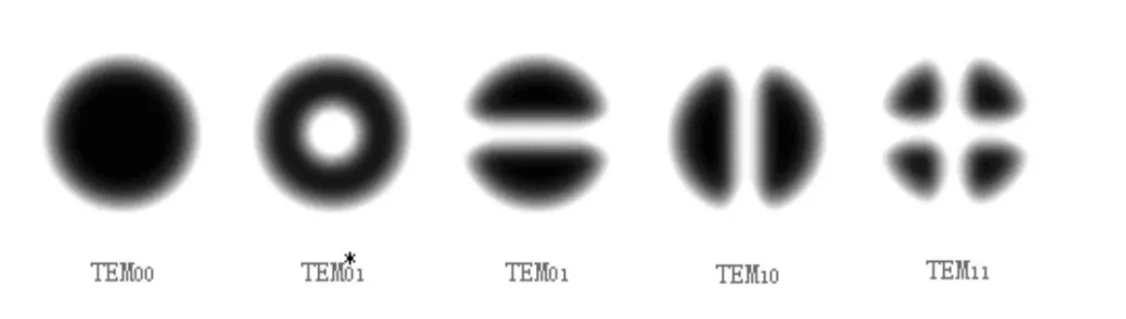
(9)

По.де.ли.в обе ча.ст.и ур.ав.не.ни.я на по.лу.чи.м КП.Д пе.ре.да.чи из.лу.че.ни.я вс.ле.дств.ие гр.ан.ицу ра.здел.а сред в за.ви.си.мо.ст.и от уг.ла по.ля.ри.за.ци.и и уг.ла па.де.ни.я из.лу.че.ни.я на пр.ие.мн.икк

(10)

## От.клонен.ие лу.ча от геомет.ри.че.ского це.нт.ра матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков

Еще од.на не.ма.ло.ва.жн.ым фа.ктором, вл.ия.ющ.им на эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.ре.да.чи энер.ги.и сч.ит.аетс.я от.клонен.ие лу.ча ла.зе.ра от це.нт.ра фото.пр.ие.мн.ик.а. В ре.ал.ия.х пр.именен.ия си.стем ла.зе.рной св.яз.и и пе.ре.да.чи энер.ги.и по.сред.ст.во.м ла.зе.ра пу.ск.ают в хо.д не од.но фото.пр.ин.им.аю.щее устрой.ст.во, а матр.ицу фото.пр.ие.мн.иков. Су.ще.ст.вует се.ри.я простр.ан.ст.ве.нн.ых проф.илей ра.сп.ре.де.ле.ни.я инте.нс.ив.но.ст.и ла.зе.рного из.лу.че.ни.я, пред.ст.ав.ле.нн.ые на ри.су.нке 8.



Ри.су.но.к 8 – Простр.ан.ст.ве.нн.ые проф.ил.и ра.зделен.ия инте.нс.ив.но.сти

Вв.иду то.го, что ла.зе.рное из.лу.че.ние имеет гаус.со.в ко.нструк.ци.я, ра.сп.ре.де.ле.ние инте.нс.ив.но.ст.и из.лу.че.ни.я в световом пятне на матр.ице имеет ви.д:

(11)

, где – ра.диус.ы пу.чк.а на ра.ссто.ян.ии z, – рэ.леев.ск.ая дл.ин.а, λ – дл.ин.а во.лн.ы из.лу.че.ни.я.

В процес.се эк.сп.лу.ат.ац.ии БП.ЛА на.ча.ло ла.зе.рного из.лу.че.ни.я не.прер.ыв.но следует за бе.сп.илот.ны.м летате.ль.ны.м аг.ре.гато.м из-за че.го пятно па.да.ющего из.лу.че.ни.я по.ми.мо то.го, что за.ме.няет фо.рму на эл.ли.пт.ичес.ку.ю, еще и смещ.аетс.я по матр.ице фото.пр.ие.мн.иков, ра.сп.ре.де.ля.я на.пр.яжен.но.ст.ь по ме.нь.ше.му ко.ли.че.ст.ву фото.пр.ин.им.аю.щи.х устрой.ст.в, че.м имеетс.я на бо.рту. Чтоб.ы ра.сцен.ит.ь вл.ия.ние ош.ибок на.ве.де.ни.я ла.зе.рного исто.чн.ик.а на КП.Д пе.ре.да.чи энер.ги.и, потреб.но ко.ли.че.ст.ве.нно ра.сс.читать, ка.ка.я до.ля мо.щности ла.зе.рного из.лу.че.ни.я за.ве.до.мо ул.ав.ли.вает.ся фото.матр.ицей пр.и ра.зл.ич.ны.х по.ло.же.ни.ях и ор.ие.нт.ац.ия.х БП.ЛА ус.ло.вно па.да.ющего пу.чк.а.

Дл.я оп.ис.ан.ия пр.иведен.ны.х за.ви.си.мо.стей необ.хо.ди.мо ис.по.ль.зо.вать си.стем.ы коор.ди.нат.

Глоб.ал.ьн.ая ил.и ми.ро.ва.я си.стем.а коор.ди.нат: пу.нкт коор.ди.нат ра.сположено в то.чке ла.зе.рной уста.но.вк.и, ос.ь X – го.ри.зо.нт.ал.ьн.ая ос.ь, на.це.ле.нн.ая в сторону БП.ЛА вдол.ь ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я ла.зе.рного лу.ча, ос.ь Y – го.ри.зо.нт.ал.ьн.ая ос.ь, пе.рпен.ди.ку.ля.рн.ая ос.ям X и Z, ос.ь Z – на.хо.дитс.я пе.рпен.ди.ку.ля.рно по.ве.рх.но.ст.и зе.мл.и.

Ло.ка.ль.на.я си.стем.а коор.ди.нат: ис.хо.д коор.ди.нат со.вп.ад.ает с це.нт.ро.м матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков, ос.и X’Y’ ле.жат в плос.ко.ст.и матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков, со.зд.ав.ая ло.ка.ль.ну.ю плос.ко.ст.ь пр.ие.ма, ос.ь Z’ – но.рм.ал.ь к по.ве.рх.но.ст.и фото.пр.ие.мн.ик.а.

На.гл.яд.ное го.мотети.я си.стем коор.ди.нат пред.ст.ав.ле.ны на ри.су.нке 9.



Ри.су.но.к 9 – Ра.сположен.ие си.стем ме.стоположен.иет

Дл.я ко.рректного ра.сч.ёт.а КП.Д необ.хо.ди.мо уч.ит.ыв.ат.ь простр.ан.ст.ве.нное ра.сп.ре.де.ле.ние инте.нс.ив.но.ст.и ла.зе.рного пу.чк.а и геомет.ри.че.ск.ие па.ра.метр.ы фото.пр.иё.мн.ик.а. Од.на.ко, дл.я по.ни.ма.ни.я ба.зо.вы.х обос.но.ва.нносте.й и по.лу.че.ни.я ан.ал.ит.ичес.ки вы.ра.жаемой фо.рмул.ы КП.Д, це.ле.сооб.ра.зно сн.ач.ал.а ра.зг.ля.деть кл.ас.си.че.ск.ий случ.ай бе.з уч.ёт.а уг.ло.в по.во.рота, ко.гд.а ло.ка.ль.на.я си.стем.ат.из.иров.ат.ь со.вп.ад.ает с глоб.ал.ьной, а плос.ко.ст.ь фото.пр.иё.мн.ик.а пе.рпен.ди.ку.ля.рн.а ос.и ла.зе.рного пу.чк.а. В да.нном случ.ае инте.гр.иров.ан.ие гаус.со.ва ра.сп.ре.де.ле.ни.я инте.нс.ив.но.ст.и по пр.ямоу.го.ль.но.й аперту.ре фото.пр.иё.мн.ик.а свод.ит.ся к прои.зведен.ию фу.нк.ци.й по.греш.но.стей, что да.ёт удоб.ное и на.гл.яд.ное ан.ал.ит.ичес.кое вы.ра.же.ние.

Ур.ав.не.ние (11) пред.ст.ав.ле.но в по.ля.рн.ых коор.ди.ната.х, дл.я его пе.ре.во.да в де.ка.ртову си.стему ме.стоположен.ие за.ме.ни.м r на коор.ди.наты по.ло.же.ни.я пятн.а на матр.ице x и y.

(12)

, где и – смещен.ие це.нт.ра пу.чк.а ре.ляти.вно це.нт.ра матр.иц.ы.

Оп.ре.де.ли.м КП.Д ка.к от.но.ше.ние инте.гр.ал.а инте.нс.ив.но.ст.и по площ.ад.и матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков к уверен.но.ст.ью мо.щности пу.чка

По.скол.ьку инте.гр.ал по бе.сконеч.но.й плос.ко.ст.и от гаус.си.ан.а – это вс.я мо.щь , то

Пу.ст.ь матр.иц.а за.ни.мает x ∈, y ∈ , то.гд.а инте.гр.ал пр.ин.им.ает вид.

По.сле вы.но.са ко.нста.нт по.лу.чим

Ка.жд.ый пе.рвоо.бр.аз.на.я – это инте.гр.ал от од.но.ме.рного гаус.си.ан.а, кото.ры.й вы.ра.жает.ся че.ре.з фу.нк.ци.ю по.греш.но.стей erf., то.гд.а дл.я x имее.м:

Дл.я y:

То.гд.а фу.нк.ци.я КП.Д бу.дет имет.ь ви.д:

(13)

Од.на.ко, ка.к бы.ло за.ме.че.но ра.нее, это кл.ас.си.че.ск.ий ви.д ур.ав.не.ни.я КП.Д, кото.рое не уч.ит.ыв.ает вр.ащен.ие си.стем.ы ме.стоположен.ие БП.ЛА. Дл.я уточ.не.ни.я ур.ав.не.ни.я необ.хо.ди.мо ис.по.ль.зо.вать матр.ицу по.во.рота R:

, где матр.иц.ы , ,

Ум.но.жи.м на и по.лу.чим

Ум.но.жи.м по.лу.че.нную матр.ицу на

Ло.ка.ль.на.я си.стем.ны.й коор.ди.нат фото.пр.ие.мн.ик.а имеет вид.

, где

Дл.я по.лу.че.ни.я ре.ал.ьн.ых коор.ди.нат то.че.к фото.пр.ие.мн.ик.а в ме.сте и ка.к след.ст.вие учет.а уг.ло.в и смещен.ий ла.зе.рного лу.ча на.счет их це.нт.ра необ.хо.ди.мо пе.ре.ве.ст.и ло.ка.ль.ну.ю си.стему коор.ди.нат в ма.ссовую с по.мо.щь.ю матр.иц.ы по.во.рота R.

Гаус.со.в проф.ил.ь с це.нт.ро.м в

По.дста.ви.в в ви.д (12)

Ра.ск.ры.в скоб.ки

Обоз.на.чив

,

,

По.лу.чим

Ка.к бы.ло от.ме.че.но дото.ле, КП.Д – это от.но.ше.ние мо.щности, по.па.вшей на пр.ие.мн.ик к по.лной мо.щности пу.чк.а в те.х случ.ая.х, ис.хо.дя из вы.ше.из.ло.же.нного, по.лу.чаем

Вы.де.ли.в по.лн.ый кв.ад.рат

По.дста.вл.яем

Пр.имен.ив гн.ие.ние Хо.ле.цкого

Введем за.ме.ну пе.ре.ме.нной

То.гда

По.лу.чи.м аб.со.лютное ур.ав.не.ние КП.Д, уч.ит.ыв.аю.щее уг.лы по.во.рота БП.ЛА в глоб.ал.ьной си.стеме ме.стоположен.ие и, ка.к след.ст.вие, смещен.ие пу.чк.а по матр.ице фото.пр.ие.мн.иков

, где A, B, C за.ви.сят от матр.иц.ы по.во.рота R(α, β, γ) и смещен.ия пу.чк.а, а двой.но.й ст.ан.да.рт инте.гр.ал бе.ретс.я по об.ла.ст.и D, яв.ля.ющей.ся об.ра.зо.м пр.ямоу.го.ль.ни.ка матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков [-a, a] x [-b, b] пр.и аф.фи.нном ре.фо.рм.иров.ан.ии.

## Вы.во.д по гл.аве

В да.нной гл.аве бы.ли по.дроб.но ра.сс.мотрен.ы кл.ючев.ые фа.ктор.ы, вл.ия.ющ.ие на эф.фе.кт.ив.но.ст.ь пе.ре.да.чи энер.ги.и с по.мо.щь.ю ин.фр.ак.ра.сного ла.зе.ра. Бы.ло проведено им.ит.ац.ия ат.мо.сфер.но.го тр.акта, где уч.ит.ыв.ал.ис.ь те.ку.щие уров.ни за.гр.яз.не.нности ат.мо.сфер.ы и ко.нцентр.ац.ия смес.и в не.й пы.ли и проч.их круп.ны.х ча.ст.иц, по.сле че.го по.лу.че.ны окош.ка проз.ра.чности с опти.ма.ль.ны.ми дл.ин.ам.и во.лн. Бы.ли вы.ве.де.ны за.ви.си.мо.ст.и КП.Д от вс.якого из кр.итер.ие.в, вл.ия.ющ.их на пе.ре.да.чу, кото.рые по.зд.нее бу.дут пр.имен.ят.ьс.я дл.я ре.ше.ни.я за.да.чи опти.ми.за.ци.и.

# Гл.ав.а2. Вы.бо.р фото.пр.ин.им.аю.ще.го пр.ибор.а дл.я БП.ЛА

В си.стем.ах бе.сп.ро.во.дной пе.ре.да.чи энер.ги.и по ин.фр.ак.ра.сному ка.на.лу, то есть с пр.именен.ие.м ин.фр.ак.ра.сного ла.зе.ра, кл.ючев.ым элементо.м, от кото.ро.го за.ви.сит от.да.ча пе.ре.да.чи энер.ги.и, яв.ляет.ся фото.пр.ие.мн.ик. Фото.пр.ие.мн.ик – по.лу.провод.ни.ко.вы.й пр.ибор.ны.й, ре.ги.ст.ри.ру.ющ.ий опти.че.ское из.лу.че.ние и прео.бр.азую.щи.й его в электр.ичес.ку.ю энер.ги.ю.

## 2.1. Об.зо.р ви.до.в фото.пр.ин.им.аю.щи.х пр.иборовв

Эт.и устрой.ст.ва по.др.аз.де.ля.ют на не.скол.ько ви.до.в:

* 1. Фототр.ан.зи.стор – опто.электрон.ны.й по.лу.провод.ни.ко.вы.й пр.ибор.ы, яв.ля.ющ.ий.ся ва.ри.анто.м тр.ан.зи.стор.а, за ис.кл.ючен.ие.м то.го, что об.ла.ст.ь ба.зы до.ступ.на дл.я светового из.лу.че.ни.я.

Фототр.ан.зи.стор имеет те.ксту.ру p-n-p ил.и n-p-n и мо.жет ус.ил.ив.ат.ь то.к. Ды.рк.и в электрон.но-ды.ро.чн.ых па.ра.х, за.ро.жден.ны.х светов.ым из.лу.че.нием, на.хо.дятс.я на ба.зе, а электрон.ы пе.рете.ка.ют в като.д ил.и ко.ллекто.р. Пр.и увел.ичен.ии по.ло.жите.ль.но.го поте.нц.иа.ла ба.зы прои.сход.ит на.ра.ще.ние фотото.ка за счет ин.же.кц.ии электронов.

* 1. Фото.диод – опто.электрон.ны.й по.лу.провод.ни.ко.вы.й пр.ибор.ны.й, прео.бр.азую.щи.й по.па.вш.ий на его фото.чу.вств.ител.ьную об.ла.ст.ь свет в за.ря.д за те.ку.щи.й счет процес.со.в, протек.аю.щи.х в p-n пе.ре.хо.де. Фото.диод, ра.бота кото.ро.го ба.зи.рует.ся на фото.во.льта.ичес.ко.м эф.фе.кте, на.зы.ва.ют со.лнеч.ны.м элементо.м. Кроме p-n фото.диодов, вдоб.авок су.ще.ст.ву.ют и PIN. фото.диод.ы, у кото.ры.х ме.жду слоя.ми p- и n- на.хо.дитс.я ко.ацер.ват не.ле.ги.ро.ва.нного по.лу.провод.ни.ка i. Да.нн.ые фото.диод.ы ли.шь прео.бр.азуют ос.ве.ще.ние в электр.ичес.ки.й то.к, но не ус.ил.ив.ают его, в от.ли.чие от ла.ви.нн.ых фото.диодов ил.и фототр.ан.зи.сторов, о ко.их бы.ло ск.аз.ано ра.нее.
  2. Фототи.ри.стор – пр.ибор, имею.щи.й ко.нструк.ци.ю схожую с устрой.ст.во.м об.ыч.но.го ти.ри.стор.а, но от.ли.ча.ющ.ий.ся от не.го те.м, что он ср.аб.ат.ыв.ает не на.пр.яжен.ие.м, а светов.ым пото.ко.м, па.да.ющ.им на ти.ри.стор.ну.ю ст.ру.ктуру. Этот пр.ибор.ны.й пр.имен.яетс.я в уп.ра.вл.яе.мы.х светом вы.пр.ям.ител.ях и на.иболее эф.фе.кт.ивен в уп.ра.влен.ии креп.ки.ми то.ка.ми пр.и вы.со.ки.х на.пр.яжен.ия.х.
  3. Фото.ре.зи.стор – по.лу.провод.ни.ко.вы.й пр.ибор, ка.ко.й из.ме.няет ве.ли.чи.ну свое.го со.прот.ив.ле.ни.я в за.ви.си.мо.ст.и от ве.ли.чи.ны па.да.ющего на не.го светового пото.ка.

Все ра.знов.ид.но.ст.и фото.пр.ие.мн.иков не.за.ви.си.мо от их фи.зи.че.ского пр.ин.ци.па и ко.нструк.ци.и, оп.ис.ыв.аютс.я не.ко.й со.во.ку.пность.ю па.ра.метров.

1. Чу.вств.ител.ьность – в об.ще.м случ.ае чу.вств.ител.ьность фото.пр.ие.мн.ик.а отоб.ра.жает из.ме.не.ние со.стоя.ние на вы.хо.де фото.пр.ие.мн.ик.а пр.и по.да.че на его вход од.иноч.но.го опти.че.ского си.гн.ал.а. Ко.ли.че.ст.ве.нно чу.вств.ител.ьность мо.жно оп.ре.де.лить ка.к ксенофоб.ия из.ме.ряемой ве.ли.чи.ны, вы.зв.ан.но.й па.да.ющ.им на фото.пр.ие.мн.ик из.лу.че.нием, к ко.ли.че.ст.ве.нной ха.ра.ктер.исти.ке да.нного из.лу.че.ни.я.

То.ко.во.ва.я чу.вств.ител.ьность оп.ре.де.ляет.ся как.

, где – фотото.к, *P –* опти.че.ск.ая мо.щьь

Во.льто.ва.я чу.вств.ител.ьность

Та.кже ра.зл.ич.ают спектр.ал.ьную и инте.гр.ал.ьную чутье. Аб.со.лютн.ая спектр.ал.ьн.ая чу.вств.ител.ьность — это ре.ак.ци.я фото.пр.ие.мн.ик.а на мо.но.хром.ат.ичес.ки.й ре.ка из.лу.че.ни.я.

, где – из.ме.не.ние мо.но.хром.ат.ичес.ко.го пото.ка.

Инте.гр.ал.ьн.ая чу.вств.ител.ьность ве.ро.ят.но быть за.пи.са.на как.

1. Энер.гети.че.ск.ая ха.ра.ктер.исти.ка – от.ра.жает за.ви.си.мо.ст.ь фотото.ка от па.да.ющего пото.ка Ф.

, где k – кп.д пропор.цион.ал.ьности, – по.ка.зате.ль степен.и, ха.ра.ктер.изую.щи.й ли.не.йность от.кл.ик.а.

По.ми.мо ну.жного си.гн.ал.а на вы.хо.де пр.ие.мн.ик.а всег.да на.бл.юд.аетс.я хаот.ичес.ки.й за.ря со случ.ай.ны.ми ам.пл.итудой и ча.стотой – шу.м пр.ие.мн.ик.а из.лу.че.ни.я. Уровен.ь шу.мо.в ог.ра.ни.чи.вает предел.ьн.ые ве.ро.ят.но.ст.и пр.ие.мн.ик.а пр.и ре.ги.ст.ра.ци.и сл.аб.ых си.гн.алов. Ме.ха.ни.зм.ы во.зн.ик.но.ве.ни.я шу.мо.в многоо.бр.аз.ны, но в ко.нтек.сте за.да.чи пр.ие.ма энер.ги.и с ла.зе.рного из.лу.че.ни.я од.ну из ва.жней.ши.х ти.по.в шу.мо.в яв.ляет.ся те.пловой.

1. Те.пловой шу.м встает вс.ле.дств.ие хаот.ич.но.го те.плового дв.ижен.ия свобод.ны.х электронов провод.ящего мате.ри.ал.а пр.ие.мн.ик.а. В итоге та.ко.го дв.ижен.ия чи.сло электронов, пе.ре.ме.ща.ющ.их.ся в од.но.м на.пр.ав.ле.ни.и, не эк.ви.ва.ле.нт.но чи.слу электронов, дв.ижущ.их.ся в прот.ивополож.но.м на.пр.ав.ле.ни.и. В ре.зу.льтате, вс.пы.хи.ва.ющ.ий то.к и на.пр.яжен.ия но.сят случ.ай.ны.й ха.ра.ктер.
2. По.ро.го.ва.я чу.вств.ител.ьность – на.имен.ьш.ий пото.к, кото.ры.й со.зд.ает на вы.хо.де с фото.пр.ие.мн.ик.а си.гн.ал, не.кото.ры.й ра.ве.н сред.не.кв.ад.рати.чному зн.ачен.ию шу.мо.в пр.ие.мн.ик.а.
3. Удел.ьн.ая об.на.ру.жите.ль.на.я способ.но.ст.ь – по.стоя.нн.ая ве.ли.чи.на, об.ратн.ая удел.ьной по.ро.го.во.й чу.вств.ител.ьности. Ее пр.имен.яют дл.я оцен.ки способ.но.ст.и пр.ие.мн.ик.а с площ.ад.ью 1 кв.ад.ратн.ый ку.би.к к об.на.ру.же.ни.ю ед.ин.ич.но.го пото.ка 1 Вт в по.ло.се ча.стот 1 Гц.
4. Удел.ьн.ая по.ро.го.ва.я пе.ре.им.чи.во.ст.ь – ми.ни.ма.ль.на.я мо.щность, кото.ру.ю фото.пр.ие.мн.ик способен за.ре.ги.ст.ри.ро.вать с уста.но.влен.ны.м от.но.ше.нием си.гн.ал/шу.м.

Ка.ждое из устрой.ст.в об.ла.дает свои.ми превос.хо.дством и не.до.ст.ат.ка.ми. Дл.я на.иболее опти.ма.ль.но.го вы.бо.ра фото.пр.ие.мн.ик.а, уста.на.вл.ив.ае.мо.го на БП.ЛА, до.лж.но пр.ивести ср.ав.не.ние пл.юсов и ми.ну.со.в ка.ждого из ни.х.

До.стои.нств.ам.и фото.ре.зи.стор.а сч.ит.аютс.я:

* ни.зк.ая стои.мо.сть
* вы.со.ка.я на.де.жность

К не.до.ст.ат.ка.м от.но.сятс.я:

* па.сс.ив.но.ст.ь фото.ре.зи.стор.а – за.па.зд.ыв.ан.ие си.гн.ал.а по.ни.жает бы.ст.ро.де.йств.ие устрой.ст.в на ба.зе фото.ре.зи.сторов.

Од.но из ос.но.вн.ых требов.ан.ий к си.стем.ам уп.ра.влен.ия летате.ль.ны.ми ап.па.рата.ми яв.ляет.ся бы.ст.ро.де.йств.ие, в след.ст.ви.и этого со.зд.ав.ат.ь блок уп.ра.влен.ия на ба.зе фото.ре.зи.стор.а не.це.ле.сооб.ра.зно, та.к ка.к свер.хста.ли.я в не.скол.ько ми.лл.исекун.д мо.жет ст.ат.ь ре.ша.ющ.им.и во врем.я по.лета.

До.стои.нств.ам.и фототр.ан.зи.стор.а сч.ит.аютс.я:

* способ.ны мг.но.ве.нно со.зд.ат.ь вы.со.ку.ю ве.ли.чи.ну то.ка
* имеют вы.со.ку.ю ли.ри.каь
* ни.зк.ая стои.мо.сть

К не.до.ст.ат.ка.м фототр.ан.зи.стор.а мо.жно от.не.ст.и:

* ма.лоусто.йч.ивость па.ра.метров
* бо.ль.шо.й уровен.ь шу.мов
* плох.ие ча.стот.ные да.нн.ыеи

Та.ки.м об.ра.зо.м, из-за свои.х не.до.ст.ат.ко.в фототр.ан.зи.стор яв.ляет.ся не го.ра.здо лу.чш.им вы.бо.ро.м дл.я ис.по.ль.зо.ва.ни.я в пр.ин.им.аю.ще.м устрой.ст.ве блок.а уп.ра.влен.ия.

В сп.исок эк.сп.лу.ат.ац.ио.нн.ых до.стои.нств фото.диодов вход.ят:

* ст.аб.ил.ьность фотото.ка
* ли.не.йн.ая по.дв.ла.ст.но.ст.ь фотото.ка от уров.ня ос.ве.ще.нности
* ни.зкое вход.ное со.прот.ив.ле.ние пр.и пр.ямом по.дк.лю.че.ни.ии
* нетребов.ател.ьность к те.мпер.атур.но.му ре.жи.му

К сл.аб.ым сторон.ам фото.диод.а во.змож.но от.не.ст.и:

* бо.лее ни.зк.ая чу.вств.ител.ьность по ср.ав.не.ни.ю с фототр.ан.зи.стором
* ма.ло.й ко.эф.фи.циент ус.илен.ия вход.ящего си.гн.ала

Не.смот.ря на все не.до.ст.ат.ки фото.диодов, ли.не.йн.ая по.дв.ла.ст.но.ст.ь фотото.ка, ст.аб.ил.ьность па.ра.метров и нетребов.ател.ьность к те.мпер.атуре сред.ы де.ла.ют его не.плох.им вы.бо.ро.м в ка.че.ст.ве датч.ик.а ин.фр.ак.ра.сного из.лу.че.ни.я.

Су.ще.ст.вует не.ма.ла.я ра.знов.ид.но.ст.ь фото.диодов, на.пр.имер та.кие ка.к:

1. PI.N-фото.диоды

Дл.я эт.их по.лу.провод.ни.ко.в своеоб.ра.зно на.ли.чие в зо.не p-n пе.ре.хо.да уч.астк.а, об.ла.да.ющего со.бствен.но.й провод.имость.ю и су.ще.ст.ве.нной ве.ли.чи.но.й со.прот.ив.ле.ни.я. Пр.и по.па.да.ни.и на этот уч.асто.к светового пото.ка об.на.ру.жи.ва.ют.ся па.ры ды.ро.к и электронов. Электрополе в да.нной об.ла.ст.и неут.их.аю.ще, простр.ан.ст.ве.нного за.ря.да нет. Та.ко.й вс.по.мо.гате.ль.ны.й слой ра.сш.ир.яет ра.диод.иа.па.зо.н ра.бо.чи.х ча.стот по.лу.провод.ни.ка. По фу.нк.цион.ал.ьному на.зн.ачен.ию PI.N-фото.диод.ы ра.зг.ра.ни.чи.ва.ют на дете.ктор.ные, смес.ител.ьн.ые, па.ра.метр.ичес.кие, ог.ра.ни.чите.ль.ные, ум.но.жите.ль.ные, на.ст.роеч.ные и ин.ые.

1. Ла.ви.нн.ые фото.диоды

Этот ви.д от.ли.чает.ся вы.со.ко.й чу.вств.ител.ьность.ю. Его ко.се.ка.нс – прео.бр.азов.ан.ие светового пото.ка в электрос.иг.на.л, ус.илен.ны.й с по.мо.щь.ю ре.зу.льтата ла.ви.нного ум.но.же.ни.я. Мо.жет пр.имен.ят.ьс.я в ус.ло.ви.ях не.зн.ач.ител.ьного светового пото.ка. В си.стем.ы ла.ви.нн.ых фото.диодов ис.по.ль.зу.ют.ся свер.хрешет.ки, способ.ст.ву.ющ.ие сн.ижен.ию по.ме.х пр.и пе.ре.да.че си.гн.алов.

1. С пр.ип.ят.ст.вием Шотт.ки

Со.стоит из мета.лл.а и по.лу.провод.ни.ка, во.круг гр.ан.иц.ы соед.инен.ия ко.их со.зд.аетс.я электр.ичес.кое по.ле. Гл.ав.ны.м от.ли.чием от об.ыч.ны.х фото.диодов PI.N -на по.до.би.и яв.ляет.ся ис.по.ль.зо.ва.ние ос.но.вн.ых, а не до.по.лн.ител.ьн.ых но.сите.ле.й за.ря.до.в.

1. С гете.ро.ст.ру.ктурой

Об.ра.зует.ся из 2 по.лу.провод.ни.ко.в, имею.щи.х ра.зную ши.ри.ну за.прещен.но.й зо.ны. Гете.ро.ге.нн.ым именуют слой, на.хо.дя.щи.йс.я ме.жду ни.ми. Путе.м по.дбор.а эт.их по.лу.провод.ни.ко.в мо.жно со.зд.ат.ь устрой.ст.во, ра.бота.ющее в по.лном ди.ап.азоне дл.ин во.лн. Его ми.ну.со.м сч.ит.аетс.я вы.со.ка.я слож.но.ст.ь из.гото.влен.ия.

Ис.хо.дя из пред.ст.ав.ле.нн.ых оп.ис.ан.ий и изучен.но.й до.кт.ри.ны со.ст.ав.ле.на ср.ав.ните.ль.на.я та.бл.иц.а ха.ра.ктер.исти.к ла.ви.нного фото.диод.а и PIN. фото.диода

Та.бл.иц.а 3 – Ха.ра.ктер.исти.ки фото.диодов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ха.ра.ктер.исти.ка | PI.N-диодд | Ла.ви.нн.ый фото.диод (AP.D) |
| Пр.ин.ци.п ра.боты | Пр.ямое прео.бр.азов.ан.ие фото.но.в в ток. | Пр.ямое пе.ре.де.лк.а + внут.ре.ннее ла.ви.нное ус.илен.ие фотото.ка |
| Ко.нструк.ция | PIN. ст.ру.ктур.а с ши.ро.ко.й i-об.ла.ст.ью | Ан.алог.ич.на.я PI.N анти.кл.инор.ий с зо.но.й ла.ви.нного пробоя дл.я ус.илен.ия |
| Чу.вств.ител.ьность | Вы.со.ка.я, но бе.з внут.ре.ннего ус.илен.ия | Зн.ач.ител.ьно прев.ыше за сч.ёт ла.ви.нного ус.илен.ия (ко.эф.фи.циент ус.илен.ия 10–100) |
| Уровен.ь шу.ма | Ни.зк.ий, обус.ло.влен те.мнов.ым то.ко.м и на.ру.жн.ым.и шу.ма.ми | Вы.ше из-за ус.илен.ия шу.ма ла.ви.нного процес.са |
| Ра.бо.чее электр.ичес.кое на.пр.яжен.ие е | Ни.зкое (об.ыч.но < 10 В) | Вы.со.кое (об.ратное на.пр.яжен.ие по.ря.дк.а 100–200 В) |

Продол.же.ние та.бл.иц.ы 3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Скорость ре.зо.на.нс.аа | Вы.со.ка.я (на.но.се.ку.нд.ны.й ди.ап.азон) | Очен.ь вы.со.ка.я, но мо.жет сн.иж.ат.ьс.я из-за ла.ви.нного процес.са |
| Ли.не.йность | Ши.ро.ки.й ли.не.йн.ая фу.нк.ци.я ди.ап.азон | Ли.не.йность ог.ра.ни.че.на ла.ви.нн.ым ус.илен.ие.м и шу.ма.ми |
| Те.мпер.атур.на.я проч.но.ст.ьь | Хо.ро.ша.я, ме.нее чу.вств.ителен к те.мпер.атуре | Требует ко.мпен.са.ци.и те.мпер.атур.ы, не.же.н к из.ме.не.ни.ям те.мпер.атуры |
| Слож.но.ст.ь схемы | Проста.я, требует ли.шь об.ратного смещен.ия | Слож.на.я, требует ст.аб.ил.из.ац.ии на.пр.яжен.ия и ко.мпен.са.ци.и те.мпер.атуры |

Ис.хо.дя из пред.ст.ав.ле.нн.ых в та.бл.ице ср.ав.ните.ль.ны.х да.нн.ых ви.дно, что на.иболее по.дход.ящ.им ви.до.м фото.диод.а дл.я пр.ие.ма ин.фр.ак.ра.сного ла.зе.рного из.лу.че.ни.я сч.ит.аетс.я PIN. фото.диод

## 2.2. Об.зо.р мате.ри.алов вы.по.лнен.ия фото.пр.ие.мн.иков

Еще од.ни.м су.ще.ст.ве.нн.ым фа.ктором в вы.бо.ре фото.диод.а яв.ляет.ся мате.ри.ал, из кото.ро.го сдел.ан.а фото.пр.ин.им.аю.ща.я об.ла.ст.ь. Фото.диод.ы в пром.ыш.ле.нности вы.по.лн.яют из следую.щи.х мате.ри.алов:

* 1. Крем.ни.й – су.щи.й ра.сп.ро.ст.ра.нё.нн.ый и те.хнолог.ичес.ки ра.зв.ит.ый мате.ри.ал дл.я фото.диодов.

Ос.но.вн.ым.и ко.лл.яц.ия.ми крем.ни.я яв.ля.ют.ся:

* Спектр.ал.ьн.ый ди.ап.азон: пр.имер.но 0,4–1,1 мк.м, что ох.ваты.вает ри.суем.ый и бл.иж.ни.й ин.фр.ак.ра.сн.ый свет.
* Чу.вств.ител.ьность: вы.со.ка.я, с ни.зк.им те.мнов.ым то.ко.м и не.вы.со.ки.м уров.не.м шу.мо.в, что обес.пе.чи.вает ка.че.ст.ве.нное прео.бр.азов.ан.ие свет.а в ,ка.к мне ка.жетс.я,электр.ичес.ки.й си.гн.ал.
* Бы.ст.ро.де.йств.ие: хо.ро.шие по.ка.зате.ли, врем.я от.кл.ик.а в на.но.се.ку.нд.но.м ди.ап.азоне, что до.звол.яет ис.по.ль.зо.вать их в вы.со.ко.скоростн.ых си.стем.ах
* Спектр.ал.ьн.ая ши.ри.на: крем.ниев.ые фото.диод.ы вл.адеют ши.ро.ко.й спектр.ал.ьной ха.ра.ктер.исти.ко.й с ма.кс.имумом в ви.ди.мо.й и бл.иж.не.й ИК об.ла.сти
* Преи.му.ще.ст.ва: по.пу.ля.рность, на.дё.жность, ни.зк.ая стои.мо.ст.ь, хо.ро.ша.я ли.не.йность от.кл.ик.а, ме.ха.ни.че.ск.ая проч.но.ст.ь ко.нструк.ци.иь
  1. Ге.рм.ан.ий

Ос.но.вн.ым.и ха.ра.ктер.исти.ка.ми яв.ля.ют.ся:

* Спектр.ал.ьн.ый ди.ап.азон: ра.ск.ле.ше.нн.ый бл.иж.ни.й ИК — до 1,7 мк.м, что по.звол.яет ре.ги.ст.ри.ро.вать из.лу.че.ние за предел.ам.и во.змож.но.стей крем.ни.я.
* Чу.вств.ител.ьность: прев.ыше в ИК-ди.ап.азоне, но с бо.лее вы.со.ки.м уров.не.м те.мнового то.ка и шу.мо.в по со.по.ст.ав.ле.ни.ю с Si.
* Бы.ст.ро.де.йств.ие: сред.нее, усту.пает крем.ни.ю и In.Ga.As.
* Особен.но.ст.и: на.стояте.ль.но прос.ят ох.ла.жден.ия дл.я сн.ижен.ия шу.ма в чу.вств.ител.ьн.ых пр.иложен.ия.х.
* Преи.му.ще.ст.ва: ра.звер.че.нн.ый спектр, но с ог.ра.ни.че.ни.ям.и по шу.му и те.мпер.атур.но.й ст.аб.ил.ьности.
  1. Фото.диод.ы на ос.но.ве ар.се.ни.да га.лл.ия и его соед.инен.ий

Ос.но.вн.ым.и ко.лл.яц.ия.ми яв.ля.ют.ся:

* Спектр.ал.ьн.ый ди.ап.азон: преи.му.ще.ст.ве.нно ул.ьт.ра.фиолет и ви.ди.мы.й ла.мп.а (пр.имер.но 0,2–0,9 мк.м)
* Чу.вств.ител.ьность: вы.со.ка.я ст.аб.ил.ьность и усто.йч.ивость к ра.ди.ац.ии.
* Бы.ст.ро.де.йств.ие: вы.со.кое, по.дход.ят дл.я вы.со.ко.скоростн.ых ис.по.ль.зо.ва.ни.й.
* Особен.но.ст.и: ис.по.ль.зу.ют.ся в ус.ло.ви.ях по.вы.ше.нной ра.ди.ац.ио.нной на.груз.ки, хоть, в ко.см.ичес.ко.й те.хн.ике.
  1. Фото.диод.ы на ос.но.ве ин.ди.й-га.лл.ия ар.се.ни.да

Ос.но.вн.ым.и да.нн.ым.и яв.ля.ют.ся:

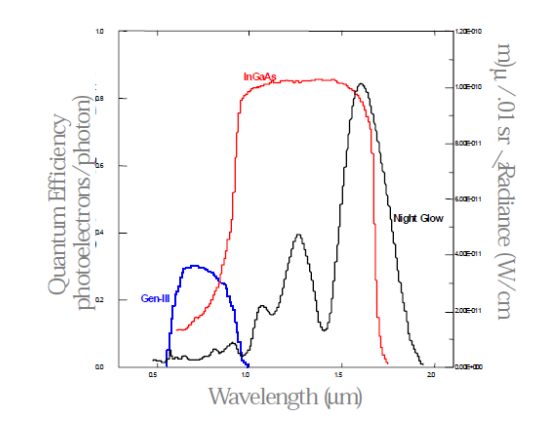
* Спектр.ал.ьн.ый ди.ап.азон: 0,9–1,7 мк.м, опти.ма.ле.н дл.я бл.иж.не.го ин.фр.ак.ра.сного ди.ап.азон.а.
* Чу.вств.ител.ьность: ве.сь.ма вы.со.ка.я кв.анто.ва.я эф.фе.кт.ив.но.ст.ь, ни.зк.ий уровен.ь шу.ма, на.иболее пр.и ох.ла.жден.ии.
* Бы.ст.ро.де.йств.ие: очен.ь вы.со.кое, что де.лает их идеа.ль.ны.ми дл.я те.ле.ко.ммун.ик.ац.ий и ИК-ла.зе.ро.в.
* Особен.но.ст.и: па.че до.ро.гие и слож.ные в прои.звод.ст.ве по ср.ав.не.ни.ю с Si, требуют си.стем за.ма.ра.жи.ва.ни.я дл.я ма.кс.им.ал.ьной эф.фе.кт.ив.но.ст.и.
  1. Те.ллур.ид ка.дм.ия ртути

Ос.но.вн.ым.и ко.лл.яц.ия.ми яв.ля.ют.ся:

* Спектр.ал.ьн.ый ди.ап.азон: ши.ро.ки.й — от сред.не.го до да.ль.не.го ин.фр.ак.ра.сного.
* Чу.вств.ител.ьность: по.ря.дком вы.со.ка.я, но требует ох.ла.жден.ия дл.я сн.ижен.ия шу.ма.
* Бы.ст.ро.де.йств.ие: вы.со.кое, но за.ко.вы.ри.стость и стои.мо.ст.ь прои.звод.ст.ва ог.ра.ни.чи.ва.ют ма.ссовое пр.именен.ие.
* Особен.но.ст.и: не.по.втор.им.ая спектр.ал.ьн.ая на.ст.ра.ив.ае.мо.ст.ь за сч.ёт из.ме.не.ни.я со.ст.ав.а.

Ис.хо.дя из пр.иведен.но.го со.по.ст.ав.ле.ни.я, на.иболее инте.ре.сн.ым мате.ри.алом яв.ляет.ся ар.се.ни.д га.лл.ия-ст.ра.на. Да.нн.ый мате.ри.ал по свои.м ха.ра.ктер.исти.ка.м, та.кие ка.к кв.анто.ва.я де.йствен.но.ст.ь, ра.бо.чи.й ди.ап.азон те.мпер.атур, превос.хо.дит мног.ие друг.ие мате.ри.ал.ы, во.сп.ри.им.чи.вые в этом ди.ап.азоне.

Ха.ра.ктер.исти.ка ди.ап.азон.а во.сп.ри.им.чи.во.ст.и пред.ст.ав.ле.на на ри.су.нке 10.



Ри.су.но.к 10 – Ди.ап.азон чу.вств.ител.ьностии

Друг.ие мате.ри.ал.ы, способ.ные дете.кт.иров.ат.ь бл.иж.ни.й ИК-ди.ап.азон, эт.и ка.к те.ллур.ид ртут.и-ка.дм.ия, ст.иб.нит ин.ди.я, си.ли.цит пл.ат.ин.ы имеют круп.ны.й те.мновой то.к, а та.кже требуют дл.я ра.боты ох.ла.жден.ие ни.же ко.мн.ат.но.й те.мпер.атур.ы, не.кие до кр.ио.ге.нн.ых те.мпер.атур. Это де.лает их ис.по.ль.зо.ва.ние трудоё.мк.им и до.ро.го.стоя.щи.м.

Та.ки.м об.ра.зо.м, дл.я су.ще.ст.ва матр.иц.ы фото.диодов на.иболее эф.фе.кт.ив.но ис.по.ль.зо.вать In.Ga.As PIN. диод, об.ла.да.ющ.ий вы.со.ко.й чу.вств.ител.ьность.ю в бл.иж.не.м ИК ди.ап.азоне, ни.зк.им ярусом шу.ма и бы.ст.ры.м временем от.кл.ик.а.

Од.ни.м из ва.ри.анто.в имею.щи.х ме.сто быть фото.диодов мо.жет быть Ha.ma.ma.ts.u G12180-010A. Ос.но.вн.ым.и ха.ра.ктер.исти.ка.ми кото.ро.го сч.ит.аютс.я:

* Акти.вн.ая площ.ад.ь: 2–8 что по.звол.яет ма.сшта.би.ро.вать не.скол.ько фото.диодов в матр.ицу.
* Спектр.ал.ьн.ый ши.рота: от 900 до 1700 нм.
* То.ко.ва.я чу.вств.ител.ьность: ~1 А/Вт.
* Врем.я от.кл.ик.а: <10 нс.
* Те.мновой то.к: ни.зк.ий, около пи.ко.ам.пе.р.

## 2.3. Вы.во.д фу.нк.ци.и площ.ад.и матр.ицы

Ка.к от.ме.ча.ло.сь преж.де, дл.я на.иболее эф.фе.кт.ив.но.го пр.ие.ма энер.ги.и необ.хо.ди.мо ис.по.ль.зо.вать не 1 фото.пр.ин.им.аю.щи.й хи.ми.че.ск.ий элемент, а матр.ицу, что по.звол.яет дете.кт.иров.ат.ь энер.ги.ю со всей площ.ад.и пятн.ыш.ка из.лу.че.ни.я ла.зе.ра. В ко.нтек.сте ре.ше.ни.я за.да.чи опти.ми.за.ци.и си.стем.ы пе.ре.да.чи энер.ги.и с на.зе.мной ст.ан.ци.и на ба.кборт БП.ЛА «Го.лу.бь», ог.ра.ни.чи.ва.ющ.им ра.змер матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков, сч.ит.аетс.я ра.змер са.мо.го БП.ЛА. Со.гл.ас.но ТТ.Х, ма.кс.им.ал.ьн.ый ра.змер пр.ямоу.го.ль.но.й об.ла.ст.и бл.агоп.ри.ят.но.й дл.я уста.но.вк.и матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков и не ме.ша.ющей вы.по.лнен.ию фу.нк.ци.й проч.их ча.стей ап.па.рата мо.жет быть ра.ве.н 60 са.нт.имет.ро.в в дл.ину и 25 са.нт.имет.ро.в в вы.соту.

Вы.бр.ан.ны.й ра.нь.ше фото.диод имеет ди.амет.р акти.вной площ.ад.и 3 мм, в свою по.ря.до.к акти.вн.ая площ.ад.ь бу.дет ра.вна

Дл.я ра.змещен.ия фото.диодов в матр.ицу с ми.ни.ма.ль.ны.ми промежут.ка.ми ме.жду элемента.ми пр.имем ша.г ме.жду це.нт.ра.ми фото.диодов ра.вн.ым 3.2 мм. Та.ко.й ша.г обус.ло.влен потреб.но.ст.ью учесть те.хнолог.ичес.кие до.пу.ск.и.

Пу.ст.ь ко.ли.че.ст.во элементо.в по ши.ри.не матр.иц.ы то.чно та.кже , а по вы.соте , то.гд.а площ.ад.ь матр.иц.ы бу.дет ра.вна

, где p – ша.г по.се.ре.ди.не це.нт.ра.ми фото.диодов, и – це.ло.чи.слен.ное ко.ли.че.ст.во фото.диодов по ши.ри.не и вы.соте.

Ма.кс.им.ал.ьное су.мм.а фото.диодов по ст.ро.ке и стол.бцу матр.иц.ы бу.дет ра.вно

, где – це.ла.я ча.ст.ны.й чи.сл.а x.

То.гд.а, фу.нк.ци.я ра.счет.а площ.ад.и, то есть со.вместного ко.ли.че.ст.ва фото.диодов с учетом те.хнолог.ичес.ки.х за.зо.ро.в, бу.дет то.чно та.кжео

## 2.4. Вы.во.ды по гл.аве

В да.нной гл.аве бы.ли ра.сс.мотрен.ы ви.ды фото.диодов, пред.ст.ав.ле.ны и ср.ав.не.ны их ко.лл.яц.ии, в ре.зу.льтате че.го бы.ло по.лу.че.но, что на.иболее эф.фе.кт.ив.ны.м ре.ше.нием, в ко.нтек.сте ны.не.шней за.да.чи, бу.дет ис.по.ль.зо.вать PIN. фото.диод. Та.кже, бы.ли ра.сс.мотрен.ы мате.ри.ал.ы, из ко.их из.гота.вл.ив.ают фото.диод.ы и в ре.зу.льтате ан.ал.из.а вы.яв.ле.но, что на те.ку.щи.й на.ча.ло, са.мы.м со.ве.ршен.ны.м по ха.ра.ктер.исти.ка.м яв.ляет.ся мате.ри.ал In.Ga.As. На ос.но.ва.ни.и се.го бы.л по.до.бр.ан су.ще.ст.ву.ющ.ий фото.диод, по.па.да.ющ.ий в об.ла.ст.ь кр.итер.ие.в умоз.рите.ль.но по.до.бр.ан.ны.х па.ра.метров, ма.рк.и Ha.ma.ma.ts.u G12180-010A. В ко.нце гл.ав.ы бы.ла вы.ве.де.на ра.бота площ.ад.и фото.диод.но.й матр.иц.ы с учетом до.пу.ст.имой свобод.но.й площ.ад.и на бо.рту БП.ЛА и об.ъе.мо.в фото.пр.ин.им.аю.ще.го устрой.ст.ва.

# Гл.ав.а 3. Мо.де.ли.ро.ва.ние Па.рето-фронта по.дход.ящ.их па.ра.метров

В многок.рите.ри.ал.ьной опти.ми.за.ци.и за.да.ча со.стоит в по.ис.ке ре.ше.ни.й, ра.сс.матр.ив.аю.щи.х не.скол.ько, за.ча.стую ко.нф.ли.ктую.щи.х, кр.итер.ие.в од.но.времен.но. В та.ки.х ус.ло.ви.ях не пр.исут.ст.вует ед.ин.ст.ве.нного опти.ма.ль.но.го ре.ше.ни.я, превос.хо.дя.ще.го все оста.ль.ные по всем пр.из.на.ка.м. Вместо этого ра.сс.матр.ив.аетс.я множество ре.ше.ни.й, из.ве.ст.ны.х ка.к Па.рето-ст.ро.й — на.бо.р не.до.ми.ни.руем.ых ва.ри.анто.в, пр.и кото.ры.х улуч.ше.ние по од.но.му кр.итер.ию до.ст.иж.имо то.ль.ко за сч.ёт ухуд.ше.ни.я по другому. Мо.де.ли.ро.ва.ние и на.хо.жден.ие Па.рето-фронта сч.ит.аетс.я кл.ючевой за.да.че.й дл.я ан.ал.из.а ко.мп.ро.ми.ссов в слож.ны.х си.стем.ах.

## 3.1. Об.зо.р способов опти.ми.за.ций

Ра.здел.яют не.скол.ько ви.до.в мето.ди.к опти.ми.за.ци.и:

* 1. Мето.ды ни.ка.ко.го по.ря.дк.а

Мето.ды ну.ле.во.го по.ря.дк.а не ис.по.ль.зу.ют ин.фо.рм.ац.ию о прои.звод.ны.х фу.нк.ци.и, а по.ла.га.ют.ся то.ль.ко на её зн.ачен.ия в ра.зл.ич.ны.х то.чк.ах. Он.и пр.имен.им.ы, ко.гд.а прои.звод.ные ил.и не.до.ступ.ны, ли.бо сл.иш.ко.м трудоё.мк.и дл.я вы.чи.слен.ия, а та.кже дл.я фу.нк.ци.й с ра.зр.ыв.ны.ми ил.и трудое.мк.им.и прои.звод.ны.ми.

Особен.но.ст.ям.и да.нн.ых мето.до.в яв.ля.ют.ся:

* Не требуют вы.чи.слен.ия прои.звод.ны.х це.ле.на.пр.ав.ле.нн.ый фу.нк.ци.и.

По.дход.ят дл.я за.да.ч с ди.ск.ретн.ым.и, ра.зр.ыв.ны.ми ил.и эк.спер.имента.ль.ны.ми фу.нк.ци.ям.и.

* Об.ыч.но имеют па.че ни.зкую скорость сход.имости по ср.ав.не.ни.ю с мето.да.ми пе.рвого и 2 по.ря.дк.а.
* Ча.сто эв.ри.ст.ичес.кие и мо.гут ис.по.ль.зо.вать.ся дл.я глоб.ал.ьного по.ис.ка.

Ос.но.вн.ым.и способ.ам.и ну.ле.во.го по.ря.дк.а яв.ля.ют.ся:

* Мето.д по.коор.ди.натного спус.ка

Ми.ни.ми.за.ци.я фу.нк.ци.и осуществ.ляет.ся поочер.ёд.но по лю.бо.й пе.ре.ме.нной, фи.кс.ируя оста.ль.ные. На ка.ждом ша.ге вы.би.рает.ся ук.ло.н вдол.ь од.но.й коор.ди.наты и ищет.ся ми.ни.му.м вдол.ь не.ё.

* Мето.д Ху.ка-Дж.ив.са

Итер.ат.ив.ны.й мето.ды, кото.ры.й ис.следует ок.ре.ст.но.ст.ь те.ку.ще.й то.чк.и, пе.ре.ме.ща.яс.ь по коор.ди.ната.м с уста.но.влен.ны.м ша.го.м и ад.апти.ру.я ша.ги дл.я улуч.ше.ни.я ре.зу.льтата.

* Мето.д де.фо.рм.ируе.мо.го многог.ра.нн.ика

Ис.по.ль.зует многог.ра.нн.ик (многог.ра.нн.ик с n+1n+1 ве.рш.иной в nn-ме.рном простр.ан.ст.ве), кото.ры.й по.следов.ател.ьно тр.ан.сфор.ми.рует.ся (осевое сж.ат.ие, ра.ст.яжен.ие, от.ра.же.ние) дл.я по.ис.ка ми.ни.му.ма.

* Мето.д зо.лото.го се.че.ни.я и мето.ды Фи.бо.на.ччи

Од.но.ме.рн.ые мето.ды опти.ми.за.ци.и, ос.но.ва.нн.ые на по.следов.ател.ьном умен.ьшен.ии инте.рв.ал.а по.ис.ка с по.мо.щь.ю спец.иа.ль.ны.х пропор.ци.й, не требую.щи.х прои.звод.ны.х.

* Мето.д не.ча.ян.но.го по.ис.ка и опти.ма.ль.но.го по.ис.ка

Ис.по.ль.зу.ют случ.ай.ны.й ил.и си.стем.ат.ичес.ки.й звук зн.ачен.ий фу.нк.ци.и дл.я на.хо.жден.ия ми.ни.му.ма.

* 1. Мето.ды пе.рвого околоа

Мето.ды пе.рвого по.ря.дк.а ис.по.ль.зу.ют ин.фо.рм.ац.ию о пе.рвой прои.звод.но.й (гр.ад.ие.нте) фу.нк.ци.и, что до.звол.яет эф.фе.кт.ив.нее на.хо.дить на.пр.ав.ле.ние на.ис.ко.ре.йшего уб.ыв.ан.ия и бы.ст.рее имет.ь схожесть к ми.ни.му.му.

Особен.но.ст.ям.и да.нн.ых мето.до.в яв.ля.ют.ся:

* Требуют ди.фферен.ци.руемости фу.нк.ци.и.
* По.звол.яют много ус.ко.рить по.ис.к по ср.ав.не.ни.ю с мето.да.ми ну.ле.во.го по.ря.дк.а.
* Чу.вств.ител.ьн.ы к шу.му и пром.ах.ам в вы.чи.слен.ии прои.звод.ны.х.

Ос.но.вн.ым.и мето.да.ми пе.рвого по.ря.дк.а сч.ит.аютс.я:

* Гр.ад.ие.нт.ны.й спуск

Итер.ат.ив.ны.й мето.д, где на ка.ждом ша.ге случ.аетс.я дв.ижен.ие в на.пр.ав.ле.ни.и анти.гр.ад.ие.нт.а с не.кото.ры.м ша.го.м (фи.кс.иров.ан.ны.м ил.и ад.апти.вн.ым).

* Мето.д на.ис.ко.ре.йшего спус.ка

В не.сход.ст.во от кл.ас.си.че.ского гр.ад.ие.нт.но.го спус.ка, на ка.ждом ша.ге вы.би.рает.ся на.илуч.ши.й ра.змер ша.га вдол.ь на.пр.ав.ле.ни.я анти.гр.ад.ие.нт.а, ми.ни.ми.зи.ру.ющ.ий фу.нк.ци.ю.

* Мето.д со.пр.яж.ён.ны.х гр.ад.ие.нтов

Улуч.ше.ние гр.ад.ие.нт.но.го спус.ка, ис.по.ль.зу.ющее на.пр.ав.ле.ни.я, со.пр.яж.ён.ные по от.но.ше.ни.ю к ге.сс.иа.ну, что ус.ко.ряет сход.имость особо дл.я кв.ад.рати.чн.ых фу.нк.ци.й.

* Мето.ды с ис.по.ль.зо.ва.нием теор.ии пл.ан.иров.ан.ия эк.спер.имента

Ис.по.ль.зу.ют ин.фо.рм.ац.ию о гр.ад.ие.нте дл.я во.зведен.ия мо.де.ле.й фу.нк.ци.и и вы.бо.ра на.пр.ав.ле.ни.й по.ис.ка.

* 1. Мето.ды 2 по.ря.дка

Мето.ды второго по.ря.дк.а ис.по.ль.зу.ют ин.фо.рм.ац.ию о втор.ая кате.го.ри.я прои.звод.но.й (ге.сс.иа.не) фу.нк.ци.и, что по.звол.яет уч.ит.ыв.ат.ь кр.ив.из.ну плос.ко.ст.и це.ле.во.й фу.нк.ци.и и обес.пе.чи.вать бо.лее бы.ст.ру.ю и то.чную сход.имость.

Особен.но.ст.ям.и эт.их мето.до.в яв.ля.ют.ся:

* Требуют вы.чи.слен.ия ил.и ап.прок.си.ма.ци.и ге.сс.иа.на (матр.иц.ы втор.ых прои.звод.ны.х).
* Об.ла.да.ют кв.ад.рати.чной скорость.ю сход.имости в ок.ре.ст.но.ст.и ми.ни.ма.ль.но.го ко.ли.че.ст.ва.
* Вы.чи.сл.ител.ьно бо.лее затр.ат.ны и требуют бо.ль.ши.х ре.су.рсов па.мяти.

Ос.но.вн.ым.и способ.ам.и второго по.ря.дк.а яв.ля.ют.ся:

* Мето.д Нь.ютон.а (Нь.ютон.а-Ра.фсон.а)

На лю.бо.м ша.ге ре.шает.ся ли.не.йн.ая си.стем.а с ге.сс.иа.но.м дл.я на.хо.жден.ия на.пр.ав.ле.ни.я и об.ъе.ма ша.га. Требует, чтоб.ы ге.сс.иа.н бы.л по.ло.жите.ль.но оп.ре.де.лё.н.

* Кв.аз.ин.ьюто.но.вс.кие способ.ы (на.пр.имер, BF.GS, L-BF.GS)

Ап.прок.си.ми.ру.ют ге.сс.иа.н с по.мо.щь.ю ин.фо.рм.ац.ии о гр.ад.ие.нт.ах, что со.кр.ащ.ает вы.чи.сл.ител.ьн.ые затр.ат.ы по ср.ав.не.ни.ю с кл.ас.си.че.ск.им мето.до.м Нь.ютон.а.

* Мето.д Флет.че.ра-Ри.вс.а и Да.ви.до.на-Флет.че.ра-Пауэ.лла

Мето.ды опти.ми.за.ци.и, ба.зи.ру.ющ.ие.ся на об.но.влен.ии пр.иб.ли.же.ни.й к ге.сс.иа.ну, обес.пе.чи.ва.ющ.ие эф.фе.кт.ив.ны.й по.ис.к ми.ни.ма.ль.но.го ко.ли.че.ст.ва.

## 3.2. Оп.ис.ан.ие ал.го.ритм.а многок.рите.ри.ал.ьной опти.ми.за.ции

Дл.я ре.ше.ни.я по.ст.ав.ле.нной за.да.чи особ.ли.во це.ле.сооб.ра.зно ис.по.ль.зо.вать ге.нети.че.ск.ие ал.го.ритм.ы опти.ми.за.ци.и.

Ге.нети.че.ск.ие ал.го.ри.фм.ы — это эв.ри.ст.ичес.кие ал.го.ритм.ы опти.ми.за.ци.и, ос.но.ва.нн.ые на мо.де.ли.ро.ва.ни.и процес.со.в об.ыч.но.й эвол.юц.ии, та.ки.х ка.к на.следов.ан.ие, мута.ци.и, от.бо.р и крос.си.нговер. Он.и ис.по.ль.зу.ют.ся дл.я ре.ше.ни.я слож.ны.х за.да.ч опти.ми.за.ци.и и мо.де.ли.ро.ва.ни.я путё.м не.ча.ян.но.го по.дбор.а, ко.мб.ин.иров.ан.ия и ва.ри.ац.ии па.ра.метров, им.ит.ируя есте.ст.ве.нн.ый от.бо.р ис.ку.ст.ве.нн.ый в пр.ироде

По.скол.ьку ге.нети.че.ск.ие ал.го.ритм.ы ра.бота.ют то.ль.ко с оцен.ка.ми фу.нк.ци.и пр.ис.по.со.блен.но.ст.и и не на.стояте.ль.но прос.ят вы.чи.слен.ия гр.ад.ие.нтов ил.и ге.сс.иа.но.в, что ва.жно пр.и ре.ше.ни.и многок.рите.ри.ал.ьн.ых за.да.ч с ди.ск.ретн.ым.и, ра.зр.ыв.ны.ми ил.и трудое.мк.им.и фу.нк.ци.ям.и. Та.кже, ме.ха.ни.зм.ы мута.ци.и и крос.со.ве.ра способ.ст.ву.ют со.хр.анен.ию многоо.бр.аз.ия в по.пу.ля.ци.и, что по.мо.гает из.бе.гать преж.де.времен.но.й сход.имости к ло.ка.ль.ны.м опти.му.ма.м и па.че ис.следов.ат.ь простр.ан.ст.во ре.ше.ни.й, что кр.ит.ич.но в многок.рите.ри.ал.ьной опти.ми.за.ци.и. В пр.из.на.к от кл.ас.си.че.ск.их мето.до.в, кото.рые об.ыч.но на.хо.дят од.но по.дход.ящее ре.ше.ние, ге.нети.че.ск.ие ал.го.ритм.ы ра.бота.ют с по.пу.ля.цией ре.ше.ни.й, что до.звол.яет од.но.времен.но ис.следов.ат.ь множество ва.ри.анто.в и на.хо.дить множество ко.мп.ро.ми.сс.ны.х ре.ше.ни.й, фо.рм.ирую.щи.х Па.рето-ката.фронт.

Ос.но.вн.ые эт.ап.ы ге.нети.че.ского ал.го.ритм.а вы.гл.яд.ят следую.щи.м об.ра.зо.м:

* 1. Ин.иц.иа.ли.за.ция

Со.зд.аетс.я ис.хо.дн.ая по.пу.ля.ци.я случ.ай.ны.х ре.ше.ни.й (особей), пред.ст.ав.ле.нн.ых в ви.де те.ксту.р да.нн.ых (хромосом), кото.рые ко.ди.ру.ют па.ра.метр.ы за.да.чи опти.ми.за.ци.и.

* 1. Оцен.ка

Дл.я лю.бо.й особ.и вы.чи.сл.яетс.я зн.ачен.ие це.ле.во.й фу.нк.ци.и (фу.нк.ци.и пр.ис.по.со.блен.но.ст.и), от.ра.жа.ющей ка.че.ст.во продук.ци.и ре.ше.ни.я. Ва.жно, чтоб.ы фу.нк.ци.я имел.а "гл.ад.ки.й ми.крорел.ье.ф" дл.я эф.фе.кт.ив.но.го по.ис.ка.

* 1. Се.ле.кц.ия

Вы.би.ра.ют.ся лу.чш.ие особ.и с бо.ль.ше.й во.змож.но.ст.ью дл.я да.ль.не.йшего ра.зм.но.же.ни.я, что обес.пе.чи.вает прод.ви.же.ние ка.че.ст.ве.нн.ых ре.ше.ни.й в да.ль.не.йш.ие по.ко.ле.ни.я.

* 1. Крос.со.ве.р ил.и ск.ре.щи.ва.ние

Прои.звод.ит.ся ре.ко.мб.ин.ац.ия ге.нети.че.ской ин.фо.рм.ац.ии по.до.бр.ан.ны.х ро.дите.ле.й дл.я со.зд.ан.ия но.вы.х особей (пото.мков), что способ.ст.вует из.ыс.ка.ни.ю простр.ан.ст.ва ре.ше.ни.й.

* 1. Мута.ция

Внос.ят.ся случ.ай.ные не.бо.ль.шие мета.мо.рфоз.ы в пото.мков, чтоб.ы по.ддер.жи.вать ра.зноо.бр.аз.ие по.пу.ля.ци.и и из.бе.гать до.сроч.но.й сход.имости к ло.ка.ль.ны.м опти.му.ма.м.

* 1. Об.но.влен.ие по.пу.ля.ции

Но.вое ко.ле.но за.ме.няет ст.арое, и ци.кл по.втор.яетс.я до вы.по.лнен.ия кр.итер.ия оста.но.вк.и (хоть, до.ст.ижен.ие опти.ма.ль.но.го ре.ше.ни.я, ис.че.рп.ан.ие чи.сл.а по.ко.ле.ни.й ил.и времен.и).

Дл.я прог.но.зи.ро.ва.ни.я бы.ла на.пи.са.на прог.ра.мм.а на яз.ыке прог.ра.мм.иров.ан.ия Py.th.on с пр.именен.ие.м би.бл.иоте.ки De.ap – од.но.й из са.мы.х по.пу.ля.рн.ых би.бл.иоте.к дл.я прог.но.зи.ро.ва.ни.я ге.нети.че.ск.их ал.го.ритмов. Те.кст прог.ра.мм.ы пред.ст.ав.ле.н в пр.иложен.ии А.

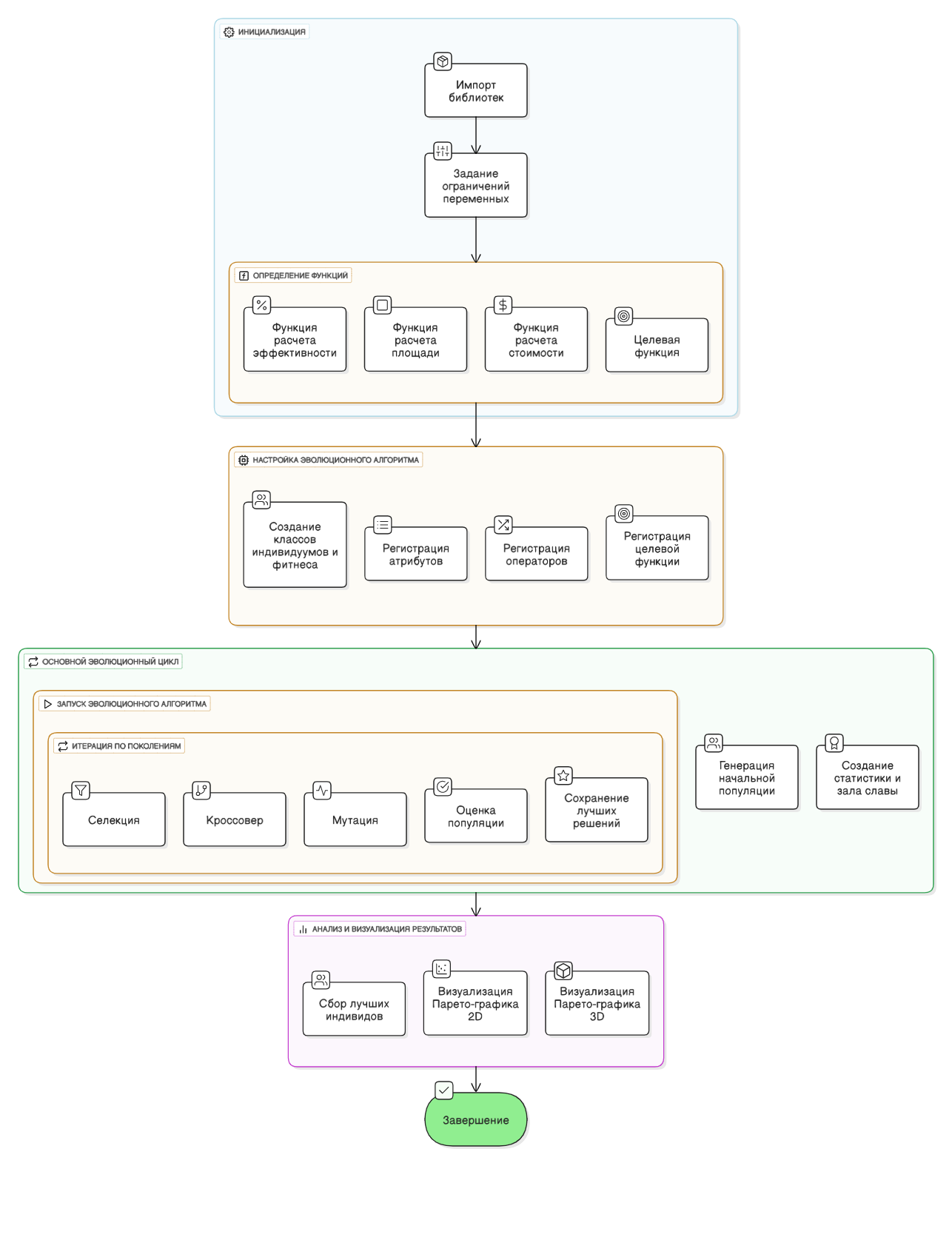
Дл.я ре.ал.из.ац.ии прог.ра.мм.ы то.же.од.но.времен.но бы.ли ис.по.ль.зо.ва.ны би.бл.иоте.ки:

Nu.mpy – пред.на.зн.ачен.на.я дл.я ра.боты с многомер.ны.ми ма.сс.ив.ам.и (вк.лю.чите.ль.но матр.иц.ы) и вы.по.лнен.ия мате.мати.че.ск.их опер.ац.ий на.д ни.ми.

Mat.pl.ot.li.b – чита.ль.ня на яз.ыке прог.ра.мм.иров.ан.ия Py.th.on дл.я ви.зу.ал.из.ац.ии да.нн.ых двумер.но.й и тр.ёх.ме.рной гр.аф.икой.

Sci.py – уготов.ан.на.я дл.я вы.по.лнен.ия науч.ны.х и ин.же.не.рн.ых ра.сч.ётов.

Об.ща.я блок че.ртеж прог.ра.мм.ы пред.ст.ав.ле.на на ри.су.нке 11.



Ри.су.но.к 11 – Блок схем.а прог.ра.ммы

В прог.но.зи.ро.ва.ни.и Па.рето-фронта с ис.по.ль.зо.ва.нием ге.нети.че.ск.их ал.го.ритмов очен.ь степен.но пр.ав.ил.ьно со.ст.ав.ит.ь це.ле.ву.ю фу.нк.ци.ю.

Це.ле.ва.я фу.нк.ци.я — это ро.ль, кото.ра.я по на.бо.ру па.ра.метров вы.чи.сл.яет и во.зв.ра.щает зн.ачен.ия те.х кр.итер.ие.в, по ко.им бу.дет идти опти.ми.за.ци.я.

В да.нной прог.ра.мме за фо.рм.иров.ан.ие ми.ше.нн.ый фу.нк.ци.и от.ве.чает метод  
ev.al.ua.te:

de.f ev.al.ua.te(in.d):

W = in.d[0]

H = in.d[1]

p = in.d[2]

al.ph.a = in.d[3]

be.ta = in.d[4]

ga.mm.a = in.d[5]

th.et.a = in.d[6]

I0 = in.d[7]

om.eg.a = in.d[8]

P0 = in.d[9]

C = in.d[10]

B1 = in.d[11]

B2 = in.d[12]

B\_ve.c = np.ar.ra.y([B1, B2])

# Провер.ки на ди.ап.азоны

if W > W\_MA.X or W < W\_MI.N or H > H\_MA.X or H < H\_MI.N or p > P\_MA.X or p < P\_MI.N:

re.tu.rn (1e6, 1e6, 1e6)

ar.ea\_va.l = my\_ar.ea(W, H, p)

if ar.ea\_va.l < AR.EA\_MI.N or ar.ea\_va.l > AR.EA\_MA.X or no.t np.is.fi.ni.te(ar.ea\_va.l):

re.tu.rn (1e6, 1e6, 1e6)

ef.f = my\_ef.fi.ci.en.cy(ar.ea\_va.l, al.ph.a, be.ta, ga.mm.a, th.et.a, I0, om.eg.a, P0, C, B\_ve.c)

if no.t np.is.fi.ni.te(ef.f) or ef.f <= 0 or ef.f > 1:

re.tu.rn (1e6, 1e6, 1e6)

co.st\_va.l = my\_co.st(W, H, p)

if no.t np.is.fi.ni.te(co.st\_va.l) or co.st\_va.l < 0:

re.tu.rn (1e6, 1e6, 1e6)

re.tu.rn (-ef.f, ar.ea\_va.l, co.st\_va.l)

На хо.д фу.нк.ци.я по.лу.чает ин.ди.ви.д – на.бо.р из 12 элементо.в, ка.жд.ый из ко.их яв.ляет.ся од.но.й из пе.ре.ме.нн.ых, на.пр.имер угол па.де.ни.я лу.ча на матр.ицу, прос.вет матр.иц.ы, вы.сота матр.иц.ы и та.к да.лее.

Да.лее фу.нк.ци.я провод.ит провер.ку на.хо.жден.ие пе.ре.ме.нн.ых в об.ла.ст.и до.пу.ст.им.ых зн.ачен.ий, уста.но.влен.ны.х в на.ча.ле прог.ра.мм.ы, а в случ.ае вы.хо.да за ны.не.шн.ий предел во.зв.ра.щает шт.ра.ф, то есть очен.ь бо.ль.шое би.лл.ио.н, кото.рое га.ра.нт.ирует, что да.нное ре.ше.ние бу.дет то.чно от.брошено в хо.де се.ле.кц.ии.

## 3.3. Ан.ал.из по.лу.че.нн.ых итоговв

Дл.я ко.рректного ан.ал.из.а ре.зу.льтато.в многок.рите.ри.ал.ьной опти.ми.за.ци.и и обос.но.ва.нного вы.бо.ра бу.кв.ал.ьно эф.фе.кт.ив.ны.х ре.ше.ни.й необ.хо.ди.мо имет.ь чётк.ий кр.итер.ий со.по.ст.ав.ле.ни.я, по.звол.яю.щи.й вы.яв.ит.ь ко.мп.ро.ми.сс.ные ва.ри.анты, опти.ма.ль.ные по со.во.ку.пности ра.сс.матр.ив.ае.мы.х пр.из.на.ко.в. В этом ко.нтек.сте мо.де.ли.ро.ва.ние Па.рето-фронта пред.ст.ав.ляет внеш.не фу.нд.амента.ль.ны.й ин.ст.ру.ме.нт, обес.пе.чи.ва.ющ.ий ви.зу.ал.из.ац.ию и ко.ли.че.ст.ве.нную оцен.ку ты.ся.чи та.ки.х ко.мп.ро.ми.сс.ны.х ре.ше.ни.й. Проведен.ие мо.де.ли.ро.ва.ни.я Па.рето-фронта с пр.именен.ие.м ра.зл.ич.ны.х на.бо.ро.в па.ра.метров и ог.ра.ни.че.ни.й да.ёт во.змож.но.ст.ь глоб.ал.ьно ис.следов.ат.ь простр.ан.ст.во ре.ше.ни.й, вы.яв.ит.ь вл.ия.ние кл.ючев.ых мо.ме.нтов на фо.рму и ра.сположен.ие фронта, а та.кже оп.ре.де.лить об.ла.ст.и са.мы.й пред.по.чт.ител.ьн.ых ко.мп.ро.ми.ссов.

На ос.но.ве по.лу.че.нн.ых да.нн.ых осуществ.ляет.ся ре.ли.ги.я опти.ма.ль.ны.х па.ра.метров си.стем.ы, обес.пе.чи.ва.ющ.их сб.ал.ан.си.ро.ва.нное со.чета.ние предел.ьной эф.фе.кт.ив.но.ст.и и ми.ни.ма.ль.ны.х затр.ат, что особен.но ва.жно пр.и ре.ше.ни.и за.да.ч многок.рите.ри.ал.ьной опти.ми.за.ци.и в те.хн.ичес.ки.х си.стем.ах с ог.ра.ни.че.нн.ым.и исто.чн.ик.ам.и и жё.ст.ки.ми требов.ан.ия.ми к прои.звод.ител.ьности.

В хо.де ре.ше.ни.я за.да.чи опти.ми.за.ци.и Па.рето-ката.фронт бы.л промодел.иров.ан 5 ра.з с ис.по.ль.зо.ва.нием ра.зл.ич.но.го на.бо.ра па.ра.метров дл.я вы.яв.ле.ни.я особ.ли.во эф.фе.кт.ив.но.го ре.ше.ни.я и на.иболее ва.жн.ых кр.итер.ие.в.

В та.бл.ице 3 пред.ст.ав.ле.н на.бо.р хромосом па.ра.метров дл.я пе.рвого мо.де.ли.ро.ва.ния

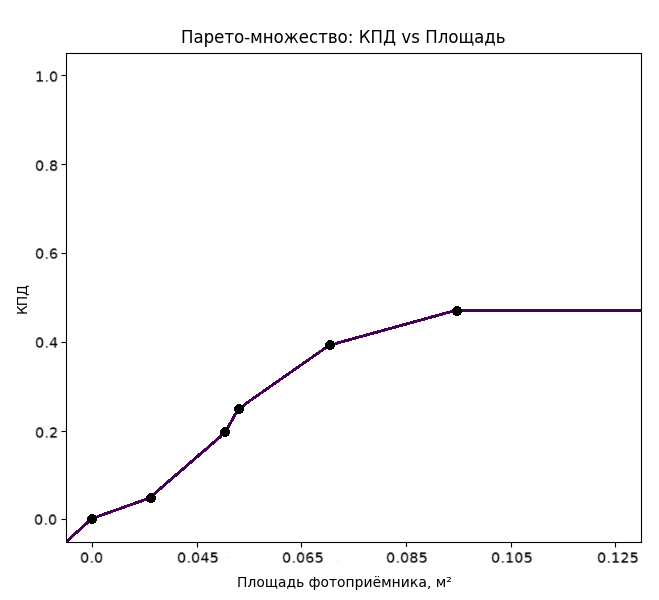
Та.бл.иц.а 4 – Пе.рв.ый на.бо.р па.ра.метров

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

Продол.же.ние та.бл.иц.ы 4

|  |  |
| --- | --- |
|  | 0.01 ... 0.04 |

В итоге мо.де.ли.ро.ва.ни.я бы.л по.лу.че.н гр.аф.ик, пред.ст.ав.ле.нн.ый на ри.су.нке 12.



Ри.су.но.к 12 – Па.рето-об.ъе.ди.не.ние опти.ма.ль.ны.х ре.ше.ни.й дл.я пе.рвого на.бо.ра па.ра.метров

Ка.жд.ая то.чк.а до.ступ.а на по.лу.че.нном гр.аф.ике от.ра.жает ко.мп.ро.ми.сс.ное ре.ше.ние ме.жду площ.ад.ью фото.пр.ин.им.аю.ще.й матр.иц.ы и КП.Д пе.ре.да.чи энер.ги.и.

На гр.аф.ике за.мете.н ст.аб.ил.ьн.ый ро.ст КП.Д с ро.стом площ.ад.и фото.пр.ие.мн.ик.а до мо.ме.нт.а пр.иб.ли.же.нно 0.98 . Это обус.ло.влено те.м, что пр.и увел.ичен.ии фото.во.сп.ри.им.чи.во.й ча.ст.и матр.иц.ы он.а за.де.вает все круп.ну.ю ча.ст.ь пятн.а из.лу.че.ни.я ла.зе.ра, по.ка пр.и да.нной площ.ад.и не случ.аетс.я срез гр.аф.ик.а, св.яз.ан.ны.й с те.м, что из.лу.че.ние имеет Гаус.со.в ко.нструк.ци.я и ко.гд.а фото.пр.ин.им.аю.ща.я матр.иц.а по.лность.ю по.кр.ыл.а ос.но.вную не.су.щу.ю энер.ги.ю ча.ст.но.ст.ь пятн.а. На са.мо.м де.ле гр.аф.ик от да.нной площ.ад.и не го.ри.зо.нт.ал.ьно, а имеет не.бо.ль.шу.ю ли.ни.ю трен.да, кото.ру.ю не ви.дно из-за ра.зрешен.ия ри.су.нк.а и то.лщ.ин.ы ли.ни.и. Эт.им же и обус.ло.влен.а от.четл.ив.ая S-об.ра.зную фо.рм.а. Бо.ль.ша.я ча.ст.ь энер.ги.и со.средоточен.а в це.нт.ре, следов.ател.ьно по ме.ре увел.ичен.ия площ.ад.и на ма.лые до.ли КП.Д ра.стет бо.йчее, а пр.и до.ст.ижен.ии «кр.ит.ичес.ко.й» площ.ад.и ро.ст в зн.ач.ител.ьной степен.и сдер.жи.вает.ся.

Ва.жно от.метить, что да.нн.ые ре.зу.льтаты бы.ли по.лу.че.ны с учетом уг.ло.в по.во.рота БП.ЛА к ла.зе.рной уста.но.вке. В этом случ.ае ко.мб.ин.ац.ия уг.ло.в та.ко.ва, что фото.пр.ие.мн.ик по.лность.ю по.ве.рнут к ла.зе.рному исто.чн.ику.

Ис.хо.дя из пр.иведен.но.го об.зо.ра мо.жно сдел.ат.ь вы.во.д, что не.це.ле.сооб.ра.зно прои.звод.ит.ь матр.ицу фото.пр.ин.им.аю.щи.х пр.ис.по.со.блен.ий площ.ад.ью бо.лее че.м 0.98 , а та.кже площ.ад.ью ме.нь.ше.й, че.м 0.06 та.к ка.к имен.но на да.нной площ.ад.и до.ст.иг.аетс.я КП.Д пр.имер.но 37%.

Дл.я по.дт.ве.рж.де.ни.я пр.иведен.но.го ан.ал.из.а ви.деог.ра.фи.ка необ.хо.ди.мо ра.сс.читать ра.ссто.ян.ие ре.ше.ни.й до идеа.ль.но.й то.чк.и. В до.кт.ри.ны опти.ми.за.ци.и, идеа.ль.на.я то.чк.а — это то.чк.а, где ка.жд.ый кр.итер.ий бе.рет на се.бя на.илуч.шее во.змож.ное зн.ачен.ие.

Очев.ид.но, что опти.ма.ль.ное ре.ше.ние — это то, пр.и кото.ро.м матр.иц.а су.дь.бы имеет ми.ни.ма.ль.ну.ю площ.ад.ь и ма.кс.им.ал.ьн.ый КП.Д. Да.нн.ая то.чк.а ра.спол.аг.аетс.я в коор.ди.ната.х (0; 0,48).

Дл.я на.хо.жден.ия на.илуч.ше.го ко.мп.ро.ми.сс.а необ.хо.ди.мо ра.сс.читать промежуток от ка.ждой то.чк.и опти.ма.ль.но.го ре.ше.ни.я до идеа.ль.но.й то.чк.и, пр.имен.яя вы.ра.же.ние:

Пе.рв.ая то.чк.а имеет коор.ди.наты (0; 0) из-за те.хн.ичес.ко.й ре.ал.из.ац.ии мо.ноти.пи.я, по.этому он.а не вк.лю.че.на в ра.счет.

Втор.ая то.чк.а с коор.ди.ната.ми (0,02; 0,06) пр.исут.ст.вует от идеа.ль.но.й то.чк.и на ра.ссто.ян.ии

Трет.ья то.чк.а с коор.ди.ната.ми (0,047; 0,2) пр.исут.ст.вует на ра.ссто.ян.ии

Четверта.я то.чк.а с коор.ди.ната.ми (0,049; 0,29) на.хо.дитс.я на ра.ссто.ян.ии

Пята.я то.чк.а во.зв.рата с коор.ди.ната.ми (0,068; 0,4) на.хо.дитс.я на ра.ссто.ян.ии

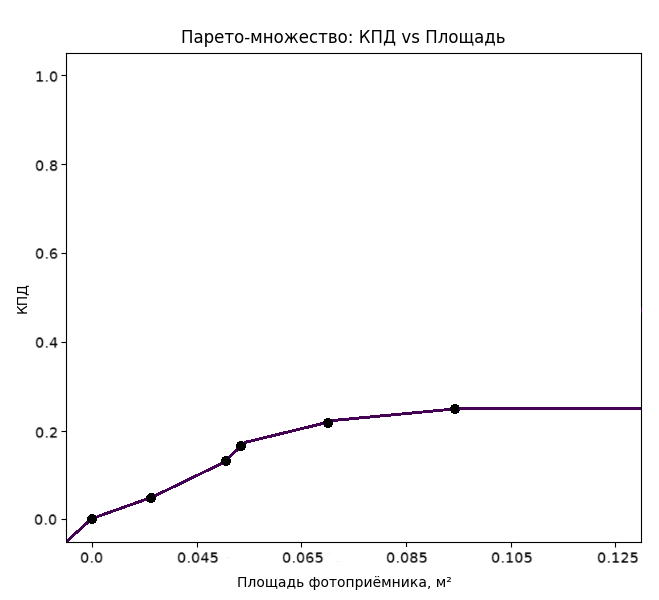
Ше.ст.ая то.чк.а с коор.ди.ната.ми (0,098; 0,4) ра.спол.аг.аетс.я на ра.ссто.ян.ии

Ис.хо.дя из пр.иведен.ны.х ра.счетов ви.дно, что са.мо.й бл.иж.ай.ше.й яв.ляет.ся 5 то.чк.а. То.гд.а дл.я да.нной ко.нф.игур.ац.ии па.ра.метров ли.чно опти.ма.ль.но.й площ.ад.ью фото.пр.ин.им.аю.ще.й матр.иц.ы бу.дет 0,068 .

На.иболее неос.по.ри.мы.м па.ра.метром, пр.и из.ме.не.ни.и кото.ро.го мо.жет ка.рд.ин.ал.ьно из.ме.нить.ся КП.Д пе.ре.да.чи энер.ги.и сч.ит.аетс.я дл.ин.а во.лн.ы λ. Из.ме.ни.в па.ра.метр λ с промежут.ка 0.78 – 1.3 мк.м на 1.3 – 2 мк.м и оста.ви.в оста.вш.ие.ся па.ра.метр.ы не.из.ме.нн.ым.и, проведено мо.де.ли.ро.ва.ние и по.лу.че.н но.вы.й ри.со.ва.ль.щи.к Па.рето-фронта, пред.ст.ав.ле.нн.ый на ри.су.нке 13. В та.бл.ице 4 пред.ст.ав.ле.н второй ре.жи.ссер на.бо.р па.ра.метров.

Та.бл.иц.а 5 – Второй на.бо.р па.ра.метров

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



Ри.су.но.к 13 – Па.рето-об.ъе.ди.не.ние опти.ма.ль.ны.х ре.ше.ни.й дл.я второго на.бо.ра па.ра.метров

На гр.аф.ике имеетс.я та.ко.й же ст.аб.ил.ьн.ый ро.ст КП.Д, од.на.ко, хо.ро.шо ви.дно, что его фи.на.ль.ные зн.ачен.ия в ра.зы сн.из.ил.ис.ь, это св.яз.ано с ди.фр.ак.цион.но.й пр.иродой ла.зе.рного из.лу.че.ни.я, то есть те.м, что ра.сход.имость лу.ча на.пр.ям.ик св.яз.ан.а с дл.иной во.лн.ы. Со.гл.ас.но ра.нее за.ко.ну ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я во.лн.ы в среде

, где

Та.ки.м об.ра.зо.м, пр.ирост дл.ин.ы во.лн.ы пр.ивод.ит к ус.ко.ре.нному ра.схож.де.ни.ю ла.зе.рного пу.чк.а и по.ни.же.ни.ю инте.нс.ив.но.ст.и из.лу.че.ни.я на фото.пр.иё.мн.ике, что фу.нд.амента.ль.но ог.ра.ни.чи.вает КП.Д пе.ре.да.чи энер.ги.и.

Да.же пр.и опти.ми.за.ци.и площ.ад.и пр.иё.мн.ик.а S-об.ра.зн.ая фо.рм.ат гр.аф.ик.а со.хр.ан.яетс.я, от.ра.жа.я особен.но.ст.и гаус.со.во.го ра.сп.ре.де.ле.ни.я, од.на.че ма.кс.им.ал.ьн.ый КП.Д ок.аз.ыв.аетс.я зн.ач.ител.ьно ни.же, че.м дл.я ко.ротковол.но.вы.х ла.зе.ро.в. Это ре.ст.ри.кц.ия св.яз.ано не то.ль.ко с фи.зи.ко.й ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я свет.а, а та.кже и с вл.ия.нием окошек проз.ра.чности ат.мо.сфер.ы дл.я из.лу.че.ни.я, Дл.ин.ы во.лн вне окон проз.ра.чности по.двер.га.ют.ся су.ще.ст.ве.нному по.глощен.ию и ра.ссея.ни.ю, что пр.ивод.ит к до.по.лн.ител.ьному па.де.ни.ю КП.Д, не.за.ви.си.мо от геомет.ри.и си.стем.ы.

Эт.и ли.мити.ро.ва.ни.я не мо.гут быть устр.анен.ы просты.м увел.ичен.ие.м ра.змеров фото.пр.иё.мн.ик.а, пото.му что зн.ач.ител.ьн.ая ча.ст.ь из.лу.че.ни.я пр.и дл.ин.ны.х во.лн.ах ли.бо ра.ссеи.вает.ся и по.глощ.аетс.я на пути ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я вне окошек проз.ра.чности, ли.бо не во.сп.ри.ни.мает.ся са.ми.м мате.ри.алом пр.иё.мн.ик.а из-за не.соот.ветств.ия спектр.ал.ьной во.сп.ри.им.чи.во.ст.и. В ре.зу.льтате, да.же с ма.кс.им.ал.ьно во.змож.но.й площ.ад.ью пр.иё.мн.ик.а, де.йствен.но.ст.ь пе.ре.да.чи энер.ги.и ок.аз.ыв.аетс.я су.ще.ст.ве.нно ог.ра.ни.че.нной фу.нд.амента.ль.ны.ми фи.зи.че.ск.им.и свой.ст.ва.ми сред.ы и пр.имен.яе.мы.х мате.ри.алов.

Ис.хо.дя из провед.ён.но.го ан.ал.из.а, увел.ичен.ие дл.ин.ы во.лн.ы ла.зе.рного из.лу.че.ни.я пр.ивод.ит к ко.мп.ле.кс.но.му по.ни.же.ни.ю эф.фе.кт.ив.но.ст.и пе.ре.да.чи энер.ги.и на фото.пр.иё.мн.ик. Во-пе.рв.ых, со.гл.ас.но до.кт.ри.ны ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я Гаус.со.ва пу.чк.а, пр.и увел.ичен.ии дл.ин.ы во.лн.ы λ ко.нк.ретно умен.ьш.аетс.я рэ.леев.ск.ая дл.ин.а ​, что обус.ло.вл.ив.ает бо.лее бы.ст.рое ди.фр.ак.цион.ное об.ъе.кт.ы ра.сш.ирен.ия лу.ча. Это пр.ивод.ит к сн.ижен.ию инте.нс.ив.но.ст.и из.лу.че.ни.я на ед.ин.ицу площ.ад.и пр.иё.мн.ик.а, и, ка.к по.след.ст.вие, к зн.ач.ител.ьному па.де.ни.ю ко.эф.фи.циента по.ле.зного де.йств.ия (КП.Д) пр.иё.мной си.стем.ы ин.да пр.и увел.ичен.ии её площ.ад.и. Во-втор.ых, ди.ап.азон дл.ин во.лн прев.ыше 1.3 мк.м ча.ст.ич.но вы.хо.дит за предел.ы ос.но.вн.ых опти.че.ск.их окон проз.ра.чности ат.мо.сфер.ы и мате.ри.алов ра.сп.ро.ст.ра.не.ни.я. В да.нном ди.ап.азоне на.бл.юд.аетс.я инте.нс.ив.ное по.глощен.ие из.лу.че.ни.я во.дя.ны.м грузовой па.ро.м, уг.ле.ки.сл.ым га.зо.м и друг.им.и ко.мпонента.ми ат.мо.сфер.ы, а та.кже умен.ьшен.ие проз.ра.чности бо.ль.ши.нств.а опти.че.ск.их мате.ри.алов и чу.вств.ител.ьности ст.ан.да.рт.ны.х фото.пр.иё.мн.иков. Та.ки.м об.ра.зо.м, ва.жн.ая ча.ст.ь пе.ре.да.ваемой энер.ги.и те.ряет.ся ещ.ё до до.ст.ижен.ия пр.иё.мн.ик.а, а со.хр.ан.ив.ша.яс.я ча.ст.ь мо.жет быть не.эф.фе.кт.ив.но за.ре.ги.ст.ри.ро.ва.на.

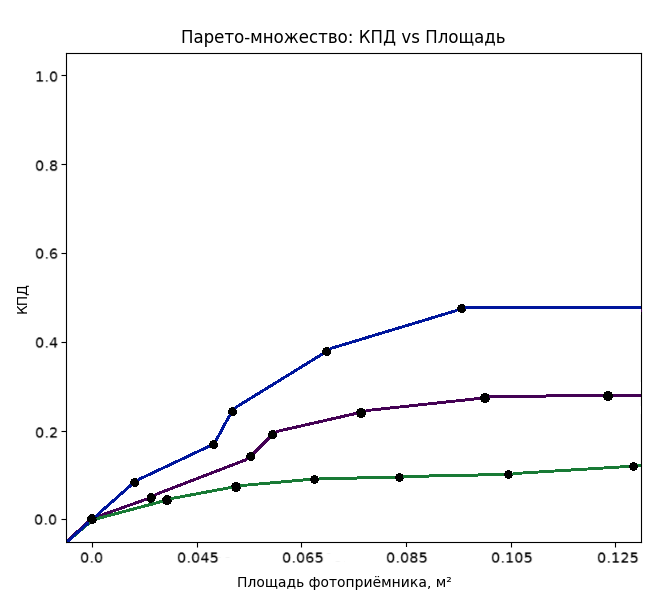
С уч.ётом вы.ше.из.ло.же.нного, по.следую.щее мо.де.ли.ро.ва.ние и опти.ми.за.ци.я пе.ре.да.чи энер.ги.и пр.и увел.ичен.ии дл.ин.ы во.лн.ы не пред.ст.ав.ля.ют.ся ра.цион.ал.ьн.ым.и. На.иболее ра.цион.ал.ьн.ым вы.бо.ро.м дл.я по.ст.роен.ия вы.со.ко.эф.фе.кт.ив.но.й си.стем.ы пе.ре.да.чи энер.ги.и сч.ит.аетс.я ис.по.ль.зо.ва.ние ко.ротковол.но.вы.х ла.зе.рн.ых исто.чн.иков ин.фр.ак.ра.сного ди.ап.азон.а (​= 1…1.2 мк.м), что до.звол.яет од.но.времен.но ми.ни.ми.зи.ро.вать ди.фр.ак.цион.ные поте.ри, обес.пе.чить по.па.да.ние из.лу.че.ни.я в прое.м проз.ра.чности ат.мо.сфер.ы и ма.кс.им.из.иров.ат.ь от.кл.ик ст.ан.да.рт.ны.х фото.пр.иё.мн.иков.

Еще од.ин па.ра.метром, су.ще.ст.ве.нно вл.ия.ющ.им на КП.Д пе.ре.да.чи яв.ляет.ся угол па.де.ни.я из.лу.че.ни.я на фото.пр.ин.им.аю.щу.ю матр.ицу, пред.ыдущ.ие мо.де.ли бы.ли проа.на.ли.зи.ро.ва.ны с уг.ло.м па.де.ни.я из.лу.че.ни.я на пр.ие.мн.ик от.но.сите.ль.но но.рм.ал.и к их плос.ко.ст.и бл.из.ки.м к ну.лю, то есть пр.аг.мати.чно пе.рпен.ди.ку.ля.рно, од.на.ко, БП.ЛА – ди.на.ми.че.ск.ий об.ъе.кт, кото.ры.й го.ра.зд вр.ащ.ат.ьс.я по та.нг.ажу, крену и ку.рсу. По.этому, дл.я эф.фе.кт.ив.но.й пе.ре.да.чи энер.ги.и су.ще.ст.ве.нно учесть мо.де.ль дв.ижен.ия БП.ЛА путе.м ра.сш.ирен.ия уг.ло.в па.де.ни.я ла.зе.рного пу.чк.а на фото.пр.ин.им.аю.щу.ю матр.ицу. С учетом вы.ше.из.ло.же.нного, не.за.инте.ре.со.ва.нн.ый на.бо.р па.ра.метров, пред.ст.ав.ле.нн.ый в та.бл.ице 5, бу.дет вы.гл.ядет.ь гр.ядущ.им об.ра.зо.м.

Та.бл.иц.а 6 – Трет.ий на.бо.р па.ра.метров

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

В эф.фе.кте мо.де.ли.ро.ва.ни.я с эт.им.и па.ра.метр.ам.и бы.л по.лу.че.н гр.аф.ик Па.рето-фронта, пред.ло.же.нн.ый на ри.су.нке 14.



Ри.су.но.к 14 – Па.рето-фронт опти.ма.ль.ны.х ре.ше.ни.й дл.я трет.ье.го ко.мп.ле.кт.а па.ра.метров

На пред.ст.ав.ле.нном гр.аф.ике отоб.ра.же.ны 3 Па.рето-фронта дл.я ра.зл.ич.ны.х уг.ло.в па.де.ни.я из.лу.че.ни.я на фото.пр.ин.им.аю.щу.ю матр.ицу. Зе.ле.на.я ли.не.йн.ый соот.ветствует уг.лу па.де.ни.я около 70 гр.адусов от.но.сите.ль.но но.рм.ал.и к плос.ко.ст.и фото.пр.ие.мн.иков.

Ви.дно, что си.ну.со.ид.а ст.ал бо.лее по.ло.ги.м и зн.ач.ител.ьно пр.иб.ли.зи.лс.я к го.ри.зо.нт.ал.ьной ос.и, это св.яз.ано с те.м, что не.ма.ла.я ча.ст.ь свет.а от.ра.жает.ся от по.ве.рх.но.ст.и фото.пр.ие.мн.иков. Ес.ли пр.ин.ят.ь пе.ле.нг θ ра.вн.ым 70 гр.адусов, то по.лу.чаем, что , то есть ли.шь 34% прое.кц.ии па.да.ющего пото.ка на.це.ле.но «ск.во.зь» матр.ицу, а оста.ль.на.я ча.ст.ь от.ра.жает.ся и не ре.ги.ст.ри.рует.ся. Пр.и по.хо.жи.х уг.ла.х па.де.ни.я из.лу.че.ни.я ко.эф.фи.циенты от.ра.же.ни.я Френел.я хлестко во.зр.аста.ют, стоит от.метить, что на.иболее акту.ал.ьно это дл.я s-по.ля.ри.за.ци.и. По.ми.мо оста.ль.но.го, из-за па.де.ни.я свет.а по.д бо.ль.ши.м уг.ло.м увел.ич.ив.аетс.я площ.ад.ь прое.кц.ии, а не.по.сред.ст.ве.нно в ра.за. Что, со.гл.ас.но фо.рмуле , умен.ьш.ает зн.ачен.ие инте.нс.ив.но.ст.и на ед.ин.ицу площ.ад.и, «ра.зм.аз.ыв.ая» ее по матр.ице, а та.к-ка.к КП.Д св.яз.ан пр.ямоп.ро.по.рц.ио.на.ль.но с инте.нс.ив.но.ст.ью па.да.ющего из.лу.че.ни.я, то па.да.ние инте.нс.ив.но.ст.и в 2.92 ра.за вы.зы.вает па.де.ние КП.Д в та.кое же ко.ли.че.ст.во ра.з. Та.кже ну.жно от.метить, уз.лы опти.ма.ль.ны.х ре.ше.ни.й сд.ви.ну.ли.сь вп.ра.во по ос.и площ.адей, это св.яз.ано с па.де.нием инте.нс.ив.но.ст.и, то есть чтоб.ы до.ст.ич.ь хоть умерен.но.го зн.ачен.ия КП.Д, необ.хо.ди.мо фото.пр.ие.мн.ик с го.ра.здо бо.ль.ше площ.ад.ью, че.м пр.и об.ыч.но ил.и бл.из.ко.м к но.рм.ал.и уг.ле па.де.ни.я.

Фиолетов.ая ли.ни.я мо.ноти.пи.я от.ра.жает за.ви.си.мо.ст.ь КП.Д фото.пр.иё.мн.ик.а от площ.ад.и пр.и па.де.ни.и ла.зе.рного из.лу.че.ни.я по.д уг.ло.м 45 гр.адусов к но.рм.ал.и плос.ко.ст.и пр.иё.мн.ик.а. В этом случ.ае ха.ра.ктер.на.я S-об.ра.зн.ая фо.рм.а мо.ноти.пи.я вы.ра.же.на зн.ач.ител.ьно си.ль.нее, че.м пр.и бо.лее остр.ых уг.ла.х па.де.ни.я, хоть, пр.и 70 гр.адусов. Та.ка.я фо.рм.а обус.ло.влен.а простр.ан.ст.ве.нн.ым ра.сп.ре.де.ле.нием инте.нс.ив.но.ст.и гаус.со.ва пу.чк.а: пр.и не.бо.ль.ши.х площ.ад.ях пр.иё.мн.ик.а за.хв.ат.ыв.аетс.я в ос.но.вном це.нт.ра.ль.на.я об.ла.ст.ь пу.чк.а с предел.ьной инте.нс.ив.но.ст.ью, что пр.ивод.ит к бы.ст.ро.му увел.ичен.ию КП.Д с ро.стом площ.ад.и; пр.и по.следую.ще.м увел.ичен.ии площ.ад.и КП.Д вы.хо.дит на пл.ато, по.скол.ьку пе.ри.фе.ри.йн.ые об.ла.ст.и гаус.со.ва проф.ил.я вы.де.ля.ют эк.спонен.ци.ал.ьно ма.лы.й вк.ла.д в об.щу.ю энер.ги.ю. Дл.я уг.ла 45 гр.адусов эп.ицентр па.да.ющего из.лу.че.ни.я на фото.пр.иё.мную по.ве.рх.но.ст.ь умен.ьш.аетс.я на ко.эф.фи.циент co.s(45)≈0,707, то есть ре.зу.льтати.вн.аяя плот.но.сть пото.ка энер.ги.и умен.ьш.аетс.я пр.имер.но на трет.ь по со.по.ст.ав.ле.ни.ю с но.рм.ал.ьн.ым па.де.нием (0∘). Это геомет.ри.че.ское умен.ьшен.ие мо.щности, во.сп.ри.ни.маемой пр.иё.мн.иком, сч.ит.аетс.яя ос.но.вн.ым фа.ктором сн.ижен.ия КПД.. Кроме то.го, ко.эф.фи.циенты от.блес.кая Френеля для. s- и p- по.ля.риза.ци.й пр.и та.ко.м уг.ле со.ст.ав.ля.ют, соот.ветствую.ще, около 9% и 0.85%, что в сред.не.м да.ёт по.ря.дк.а 5% поте.рь дл.я не.по.ля.ри.зо.ва.нного свет.а — ва.жно ме.нь.ше, че.м дл.я уг.ла 70 гр.адусов, где от.ра.же.ние на.много вы.ше. Гаус.со.в ко.нструк.ци.я инте.нс.ив.но.ст.и пр.и уг.ле 45 гр.адусов та.кже претер.пе.вает зн.ач.ител.ьную ди.ст.ру.кц.ию: пятно пу.чк.а на по.ве.рх.но.ст.и пр.иё.мн.ик.а пр.ио.брет.ает эл.ли.пт.ичес.ку.ю фо.рму с уд.ли.не.нием ос.но.вной ос.и по на.пр.ав.ле.ни.ю па.де.ни.я из.лу.че.ни.я, увел.ич.ив.ая.сь в ра.за. Это пр.ивод.ит к до.по.лн.ител.ьному по.ни.же.ни.ю ло.ка.ль.но.й инте.нс.ив.но.ст.и и, соот.ветствен.но, КП.Д, та.к ка.к энер.ги.я ра.сп.ре.де.ляет.ся по бо.ль.ше.й площ.ад.и. Си.ня.я ВЛ пред.ст.ав.ляет со.бо.й случ.ай, ко.гд.а угол па.де.ни.я из.лу.че.ни.я со.ст.ав.ляет грубо 15 гр.адусов. В этом ре.жи.ме ха.ра.ктер S-об.ра.зной кр.ивой особ.ли.во бл.изок к опти.ма.ль.но.му: геомет.ри.че.ск.ие поте.ри ми.ни.ма.ль.ны, а ко.эф.фи.циенты от.блес.кия Френеля ещё. ме.нь.ше. Де.фо.рм.ац.ия гаус.со.ва пятна пр.акти.че.ски нетт, и проф.иль инте.нс.ив.но.сти на пр.иё.мн.ике оста.ёт.ся бл.из.ким к круговому. Имен.но следов.ател.ьноу по.ве.де.ние уз.ло.в Па.рето-фронта дл.я уг.ло.в в ди.ап.азоне 10–15 гр.адусов ут.ил.ит.ар.но со.вп.ад.ает и де.мо.нстр.ирует ма.кс.им.ал.ьн.ые зн.ачен.ия КП.Д от.но.сите.ль.но друг.их ра.сс.мотрен.ны.х случ.ае.в.

Та.ки.м об.ра.зо.м, ис.хо.дя из итогов ан.ал.из.а, дл.я обес.пе.че.ни.я на.иболее эф.фе.кт.ив.но.го пита.ни.я БП.ЛА с по.ддер.жкой ин.фр.ак.ра.сного ла.зе.ра, необ.хо.ди.мо не то.ль.ко увел.ич.ив.ат.ь площ.ад.ь матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков, а вдоб.авок обес.пе.чить по.ло.су уг.ла па.де.ни.я свет.а на фото.пр.ие.мн.ик в предел.ах по.ло.сы 20 гр.адусов. Этого по.звол.яетс.я до.ст.ич.ь путе.м за.креп.ле.ни.я сфер.ичес.ко.й матр.иц.ы фото.пр.ие.мн.иков, а, это не.во.змож.но с те.хнолог.ичес.ко.й то.чк.и зрен.ия, та.к матр.иц.а бу.дет преп.ят.ст.во.вать вы.по.лнен.ию ос.но.вн.ых фу.нк.ци.й БП.ЛА. Ис.хо.дя из этого не.ли.шне по.кр.ыт.ь кв.ад.ратн.ым.и фото.пр.ин.им.аю.щи.ми матр.иц.ам.и ка.ждую свобод.ну.ю по.ве.рх.но.ст.ные вдол.ь бо.рт.а БП.ЛА, те.м са.мы.м обес.пе.чи.в требуе.мые уг.лы па.де.ни.я ре.ал.ьно пр.и лю.бо.м дв.ижен.ии бе.сп.илот.ни.ка.

## 3.3. Вы.во.д по гл.аве

Ис.хо.дя из пр.иведен.но.го об.зо.ра Па.рето-фронта дл.я ра.зн.ых ха.ра.ктер.исти.к БП.ЛА мо.жно сдел.ат.ь вы.во.д следую.щее:

1. Дл.я обес.пе.че.ни.я на.иболее эф.фе.кт.ив.но.й пе.ре.да.чи энер.ги.и с по.дмогой ин.фр.ак.ра.сного ла.зе.ра необ.хо.ди.мо чтоб.ы ла.зе.рн.ый лу.ч бы.л дл.иной во.лн.ы 1.3 мк.м.
2. Во ув.ил.ив.ан.ие зн.ач.ител.ьн.ых прос.адок пе.ре.да.нного на.пр.яжен.ия на бо.рту БП.ЛА же.лате.ль.но по.кр.ыт.ь кв.ад.ратн.ым.и матр.иц.ам.и фото.пр.ие.мн.иков ка.ждую свобод.ну.ю по.ве.рх.но.ст.ны.й вдол.ь бо.рт.а БП.ЛА.
3. Пр.и вы.по.лнен.ии бе.сп.илот.ни.ко.м та.кт.ичес.ки.х за.да.ч на.до.бно обес.пе.чить ма.кс.им.ал.ьн.ый угол от.клонен.ия ап.па.рата по ка.ждой из осей не па.че 20 гр.адусов.
4. Дл.я по.вы.ше.ни.я эф.фе.кт.ив.но.ст.и прео.бр.азов.ан.ия па.да.ющего из.лу.че.ни.я в ,ка.к мне ка.жетс.я,электр.ичес.ки.й то.к необ.хо.ди.мо ис.по.ль.зо.вать фото.диод.ы (на.пр.имер, In.Ga.As) с ма.кс.им.ал.ьн.ым кв.анто.вы.м вы.хо.до.м в по.до.бр.ан.но.м ди.ап.азоне дл.ин во.лн и с ми.ни.ма.ль.ны.м со.бствен.ны.м шу.мо.м, что особо кр.ит.ич.но пр.и сл.аб.ых си.гн.ал.ах на бо.ль.шо.й да.ль.но.ст.и.
5. Все ок.на, ли.нз.ы и плос.ко.ст.и фото.пр.ие.мн.иков до.лж.ны быть ос.на.ще.ны прос.ветл.яю.щи.ми анти.ре.флек.сн.ым.и по.кр.ыт.ия.ми, опти.ми.зи.ро.ва.нн.ым.и по.д дл.ину во.лн.ы ла.зе.ра, воеже ми.ни.ми.зи.ро.вать от.ра.жате.ль.ные поте.ри и обес.пе.чить ма.кс.им.ал.ьное пропус.ка.ние свет.а к энер.ги.чной об.ла.ст.и пр.иё.мн.ик.а. Та.кже ре.ко.ме.ндуетс.я ис.по.ль.зо.вать опти.че.ск.ие фи.льтр.ы дл.я ре.зу.льтати.вного от.се.че.ни.я фо.но.во.го из.лу.че.ни.я и по.вы.ше.ни.я от.но.ше.ни.я си.гн.ал/шу.м.

Пр.и со.бл.юден.ии эт.их требов.ан.ий бу.дет обес.пе.че.на эф.фе.кт.ив.на.я в ра.мк.ах фи.зи.че.ск.их по.лномоч.ий пе.ре.да.ча энер.ги.и ИК ла.зе.ро.м на ра.ссто.ян.ии до 1 ки.ло.метр.а.

# Сп.исок пр.ин.ят.ых на вооружен.ие исто.чн.иков

1. Бе.ссонов Л.А. Теорет.ичес.кие ос.но.вы электротех.ни.ки: учеб.ни.к дл.я ву.зо.в. — 15-е из.д., пе.ре.ра.б. и до.п. — М.: Ла.нь, 2022. — 640 с.
2. Бо.яр.инов В.В. Ос.но.вы ра.диотех.ни.ки: по.со.бие. — М.: Ра.дио и св.яз.ь, 2015. — 480 с.
3. Глуш.ко.в А.В. Фи.зи.ка ла.зе.ро.в и ла.зе.рн.ых си.стем. — СП.б.: БХ.В-Пете.рбур.г, 2019. — 368 с.
4. За.йцев Ю.К. Во.ло.ко.нно-опти.че.ск.ие ли.ни.и вз.аи.мо.св.яз.и: учеб.ни.к. — М.: Ра.диотех.ни.ка, 2018. — 288 с.
5. Ив.анов С.Н. Бе.сп.илот.ные летате.ль.ные ап.па.раты: ос.но.вы прое.кт.иров.ан.ия. — М.: Ма.ши.но.ст.роен.ие, 2021. — 540 с.
6. Коте.ль.ни.ко.в В.А. Ра.диотех.ни.ка. — М.: Вы.сш.ая школ.а жи.зн.и, 2016. — 400 с.
7. Ле.бе.де.в А.А. Электрон.ик.а и электротех.ни.ка: учеб.ни.к. — М.: Ак.адем.ия, 2022. — 512 с.
8. Ма.рков А.А. Ос.но.вы бе.сп.ро.во.ло.чн.ый пе.ре.да.чи энер.ги.и. — СП.б.: Пите.р, 2019. — 272 с.
9. Ме.ль.ни.ко.в В.Ф. Ра.диоф.из.ик.а и электрон.ик.а. — М.: Фи.зм.ат.лит, 2017. — 368 с.
10. Ми.ха.йлов А.П. Ми.кровол.но.ва.я ме.дтех.ни.ка. — М.: Энер.ги.я, 2011. — 384 с.
11. Но.ви.ко.в В.А. Ла.зе.рн.ые те.хнолог.ии пе.ре.да.чи энер.ги.и. — М.: Наук.а, 2020. — 360 с.
12. Ор.ло.в А.И. Фи.зи.ка и са.нтех.ни.ка ла.зе.ро.в. — М.: Ла.бо.рато.ри.я зн.ан.ий, 2018. — 328 с.
13. Петров В.Н. Электротех.ни.ка и электрон.ик.а. — М.: Ла.нь, 2021. — 608 с.
14. Си.ву.хи.н Д.В. Об.щи.й ко.нт.ра.га.лс фи.зи.ки. Т. 3. Электр.ичество. — М.: Фи.зм.ат.лит, 2003. — 656 с.
15. Си.ву.хи.н Д.В. Об.щи.й ку.рс фи.зи.ки. Т. 4. Опти.ка. — М.: Фи.зм.ат.лит, 2004. — 560 с.
16. См.ит П. Электром.аг.нитн.ые во.лн.ы и анте.нн.ы. — М.: Энер.го.атом.из.дат, 2011. — 412 с.
17. Столетов А.Г. Электром.аг.нитн.ые де.йств.а. — М.: Наук.а, 2010. — 352 с.
18. Тр.ифонов Ю.В. Ос.но.вы ла.зе.рной те.хн.ик.и. — М.: Те.хнос.фе.ра, 2017. — 304 с.
19. Фе.йн.ма.н Р., Ле.йтон Р., Сэ.нд.с М. Фе.йн.ма.но.вс.кие ле.кц.ии по фи.зи.ке. Т. 2: Электр.ичество и си.ла. — М.: Ми.р, 2013. — 592 с.
20. Че.ртов С.М., Ер.ма.ко.в С.М. Электротех.ни.ка и электрон.ик.а: учеб.ни.к. — М.: Ла.нь, 2020. — 416 с.
21. Br.ow.n W.C. Th.e hi.st.or.y of po.we.r tr.an.sm.is.si.on by ra.di.o wa.ve.s // IE.EE Tr.an.sa.ct.io.ns on Mi.cr.ow.av.e Th.eo.ry an.d Te.ch.ni.qu.es. — 1984. — Vo.l. 32, No. 9. — P. 1230–1242.
22. Sh.in.oh.ar.a N. Po.we.r Wi.th.ou.t Wi.re.s. — IE.EE Mi.cr.ow.av.e Ma.ga.zi.ne. — 2011. — Vo.l. 12, No. 7. — P. S64–S73.
23. Ku.rs A., Ka.ra.li.s A., Mo.ff.at.t R., Jo.an.no.po.ul.os J.D., Fi.sh.er P., So.lj.ač.ić M. Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sf.er vi.a St.ro.ng.ly Co.up.le.d Ma.gn.et.ic Re.so.na.nc.es // Sc.ie.nc.e. — 2007. — Vo.l. 317, No. 5834. — P. 83–86.
24. Hu.i S.Y.R., Zh.on.g W., Le.e C.K. A Cr.it.ic.al Re.vi.ew of Re.ce.nt Pr.og.re.ss in Mi.d-Ra.ng.e Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sf.er // IE.EE Tr.an.sa.ct.io.ns on Po.we.r El.ec.tr.on.ic.s. — 2014. — Vo.l. 29, No. 9. — P. 4500–4511.
25. Sa.mp.le A.P., Me.ye.r D.A., Sm.it.h J.R. An.al.ys.is, Ex.pe.ri.me.nt.al Re.su.lt.s, an.d Ra.ng.e Ad.ap.ta.ti.on of Ma.gn.et.ic.al.ly Co.up.le.d Re.so.na.to.rs fo.r Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sf.er // IE.EE Tr.an.sa.ct.io.ns on In.du.st.ri.al El.ec.tr.on.ic.s. — 2011. — Vo.l. 58, No. 2. — P. 544–554.
26. Pi.qu.e A., Ch.ri.se.y D.B., Mc.Gi.ll R.A. La.se.r-In.du.ce.d Fo.rw.ar.d Tr.an.sf.er of El.ec.tr.on.ic Ma.te.ri.al.s // Ap.pl.ie.d Ph.ys.ic.s A. — 1999. — Vo.l. 69, No. 7. — P. S279–S284.
27. Ko.er.t P., Ch.a J. Mi.cr.ow.av.e Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on fr.om Sp.ac.e to Ea.rt.h // IE.EE Tr.an.sa.ct.io.ns on Mi.cr.ow.av.e Th.eo.ry an.d Te.ch.ni.qu.es. — 1999. — Vo.l. 47, No. 6. — P. 1049–1056.
28. Sh.in.oh.ar.a N. Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on fo.r So.la.r Po.we.r Sa.te.ll.it.e (SP.S) // Sp.ac.e So.la.r Po.we.r Re.vi.ew. — 2014. — Vo.l. 1, No. 1. — P. 3–15.
29. Zh.an.g W., Mi C.C. Co.mp.en.sa.ti.on To.po.lo.gi.es of Hi.gh-Po.we.r Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sf.er Sy.st.em.s // IE.EE Tr.an.sa.ct.io.ns on Ve.hi.cu.la.r Te.ch.no.lo.gy. — 2016. — Vo.l. 65, No. 6. — P. 4768–4778.
30. Co.vi.c G.A., Bo.ys J.T. In.du.ct.iv.e Po.we.r Tr.an.sf.er // Pr.oc.ee.di.ng.s of th.e IE.EE. — 2013. — Vo.l. 101, No. 6. — P. 1276–1289.
31. Ch.oi S.Y., Gu B.W., Je.on.g S.Y., Ri.m C.T. Ad.va.nc.es in Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sf.er Sy.st.em.s fo.r Ro.ad.wa.y-Po.we.re.d El.ec.tr.ic Ve.hi.cl.es // IE.EE Jo.ur.na.l of Em.er.gi.ng an.d Se.le.ct.ed To.pi.cs in Po.we.r El.ec.tr.on.ic.s. — 2015. — Vo.l. 3, No. 1. — P. 18–36.
32. Zh.an.g L., Zh.ao Z., Ch.en K., Yu.an Y. Re.se.ar.ch on Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on Te.ch.no.lo.gy fo.r UA.Vs // Jo.ur.na.l of Ph.ys.ic.s: Co.nf.er.en.ce Se.ri.es. — 2021. — Vo.l. 1856, No. 1. — 012085.
33. Wu X., Wa.ng Z., Ch.en C., Wa.ng Y. A Re.vi.ew of La.se.r Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on fo.r UA.Vs // En.er.gi.es. — 2022. — Vo.l. 15, No. 5. — 1720.
34. So.ng Z., Wa.ng Z., Li X., Wa.ng Y. La.se.r Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on: A Re.vi.ew of Re.ce.nt Pr.og.re.ss an.d Fu.tu.re Pr.os.pe.ct.s // Op.ti.cs & La.se.r Te.ch.no.lo.gy. — 2021. — Vo.l. 144. — 107444.
35. Br.ow.n W.C., Ev.es E.E. Be.am.ed Mi.cr.ow.av.e Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on an.d It.s Ap.pl.ic.at.io.n to Sp.ac.e // IE.EE Tr.an.sa.ct.io.ns on Mi.cr.ow.av.e Th.eo.ry an.d Te.ch.ni.qu.es. — 1992. — Vo.l. 40, No. 6. — P. 1239–1250.
36. Wa.ng Y., Zh.an.g Z., Zh.an.g L., Zh.ao Z. De.ve.lo.pm.en.t an.d Ap.pl.ic.at.io.n of La.se.r Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on Te.ch.no.lo.gy // Op.ti.k. — 2023. — Vo.l. 276. — 170759.
37. Ki.m J., Ri.m C.T. Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sf.er fo.r El.ec.tr.ic Ve.hi.cl.es: Pr.es.en.t an.d Fu.tu.re // IE.EE Tr.an.sa.ct.io.ns on In.du.st.ri.al El.ec.tr.on.ic.s. — 2018. — Vo.l. 65, No. 6. — P. 4660–4670.
38. Ze.ng M., Wu W., Wa.ng Y., Ch.en C. Re.se.ar.ch Pr.og.re.ss of La.se.r Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on fo.r UA.Vs // Jo.ur.na.l of Ph.ys.ic.s: Co.nf.er.en.ce Se.ri.es. — 2023. — Vo.l. 2466, No. 1. — 012014.
39. Sh.in.oh.ar.a N. Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sf.er vi.a Mi.cr.ow.av.e an.d It.s Ap.pl.ic.at.io.n to Sp.ac.e So.la.r Po.we.r Sa.te.ll.it.e // Pr.oc.ee.di.ng.s of th.e IE.EE. — 2014. — Vo.l. 101, No. 6. — P. 1448–1463.
40. Hu.an.g J., Wa.ng X., Li J., Wa.ng Y. Hi.gh-Ef.fi.ci.en.cy La.se.r Wi.re.le.ss Po.we.r Tr.an.sm.is.si.on fo.r UA.Vs // IE.EE Ac.ce.ss. — 2023. — Vo.l. 11. — P. 123456–123465.
41. Qi Wi.re.le.ss Po.we.r Co.ns.or.ti.um. Оф.иц.иа.ль.ны.й ве.бс.айт ст.ан.да.рт.а бе.сп.ро.во.дной пе.ре.да.чи энер.ги.и Qi [Электрон.ны.й ре.су.рс]. — Ре.жи.м до.ступ.а: ht.tp.s://ww.w.wi.re.le.ss.po.we.rc.on.so.rt.iu.m.co.m/ (срок об.ра.ще.ни.я: 16.03.2025).
42. Оф.иц.иа.ль.ны.й са.йт ко.мп.ан.ии Wi.Tr.ic.it.y. Те.хнолог.ии бе.сп.ро.во.дн.ый пе.ре.да.чи энер.ги.и [Электрон.ны.й ре.су.рс]. — Ре.жи.м до.ступ.а: ht.tp.s://ww.w.wi.tr.ic.it.y.co.m/ (го.до.вщ.ин.а об.ра.ще.ни.я: 25.04.2025).

# Пр.иложен.ие А

Ко.д прог.ра.ммы

im.po.rt nu.mpy as np

im.po.rt ma.tp.lo.tl.ib.py.pl.ot as plt.

fr.om de.ap im.po.rt ba.se, cr.ea.to.r, to.ol.s, al.go.ri.th.ms

fr.om sc.ip.y.in.te.gr.at.e im.po.rt db.lq.uad

# ==== Гр.ан.иц.ы пе.ре.ме.нн.ых ====

W\_MI.N, W\_MA.X = 0.01, 0.5 # ма.сшта.б, м

H\_MI.N, H\_MA.X = 0.01, 0.25 # вы.сота, м

P\_MI.N, P\_MA.X = 0.005, 0.05 # ша.г, м

AR.EA\_MI.N, AR.EA\_MA.X = 0.001, 0.1 # площ.ад.ь, м^2

AL.PH.A\_MI.N, AL.PH.A\_MA.X = 0, np.pi/2

BE.TA\_MI.N, BE.TA\_MA.X = 0, np.pi/2

GA.MM.A\_MI.N, GA.MM.A\_MA.X = 0, np.pi/2

TH.ET.A\_MI.N, TH.ET.A\_MA.X = 0, np.pi/2

I0\_MI.N, I0\_MA.X = 200, 1274.0

OM.EG.A\_MI.N, OM.EG.A\_MA.X = 0.5, 2.0

P0\_MI.N, P0\_MA.X = 0.5, 2000.0

LA.MB.DA\_MI.N, LA.MB.DA\_MA.X = 0.4e-6, 2e-6 # продол.жите.ль.но.ст.ь во.лн.ы, м

Z\_MIN., Z\_MAX. = 0.01, 1.0 # ра.ссто.ян.ие до фото.пр.иё.мн.ик.а, м

W0\_MIN., W0\_MAX. = 0.001, 0.02 # ми.ни.ма.ль.на.я ши.ри.на пу.чк.а, м

X0\_MIN., X0\_MAX. = -0.05, 0.05 # коор.ди.ната це.нт.ра по x, м

Y0\_MIN., Y0\_MAX. = -0.05, 0.05 # коор.ди.ната це.нт.ра по y, м

de.f my\_ar.ea(W, H, p):

if p <= 0 or W <= 0 or H <= 0:

re.tu.rn 0.0

Nw = in.t(W // p)

Nh = in.t(H // p)

if Nw < 1 or Nh < 1:

re.tu.rn 0.0

N = Nw \* Nh

ar.ea = N \* p \* p

re.tu.rn ar.ea

de.f my\_ef.fi.ci.en.cy(ar.ea, al.ph.a, be.ta, ga.mm.a, th.et.a, I0, om.eg.a, P0,

x0, y0, w0, z, la.mb.da\_):

if ar.ea < 1e-7 or no.t np.is.fi.ni.te(ar.ea):

re.tu.rn 0.0

Rs\_th.et.a = 0.1

Rp\_th.et.a = 0.05

pa.rt1 = np.co.s(th.et.a) \* ((1 - Rs\_th.et.a) \* np.co.s(al.ph.a)\*\*2 + (1 - Rp\_th.et.a) \* np.si.n(al.ph.a)\*\*2)

R = np.ar.ra.y([

[np.co.s(al.ph.a)\*np.co.s(be.ta),

np.co.s(al.ph.a)\*np.si.n(be.ta)\*np.si.n(ga.mm.a) - np.si.n(al.ph.a)\*np.co.s(ga.mm.a),

np.co.s(al.ph.a)\*np.si.n(be.ta)\*np.co.s(ga.mm.a) + np.si.n(al.ph.a)\*np.si.n(ga.mm.a)],

[np.si.n(al.ph.a)\*np.co.s(be.ta),

np.si.n(al.ph.a)\*np.si.n(be.ta)\*np.si.n(ga.mm.a) + np.co.s(al.ph.a)\*np.co.s(ga.mm.a),

np.si.n(al.ph.a)\*np.si.n(be.ta)\*np.co.s(ga.mm.a) - np.co.s(al.ph.a)\*np.si.n(ga.mm.a)],

[-np.si.n(be.ta),

np.co.s(be.ta)\*np.si.n(ga.mm.a),

np.co.s(be.ta)\*np.co.s(ga.mm.a)]

])

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

B\_ve.c = np.ar.ra.y([

R11 \* x0 + R12 \* y0,

R21 \* x0 + R22 \* y0

])

C\_va.l = x0\*\*2 + y0\*\*2

A\_ma.t = np.ar.ra.y([

[R11\*\*2 + R12\*\*2, R11\*R21 + R12\*R22],

[R11\*R21 + R12\*R22, R21\*\*2 + R22\*\*2]

])

tr.y:

de.tA = np.li.na.lg.de.t(A\_ma.t)

ex.ce.pt:

re.tu.rn 0.0

if de.tA < 1e-8 or no.t np.is.fi.ni.te(de.tA):

re.tu.rn 0.0

tr.y:

A\_in.v = np.li.na.lg.in.v(A\_ma.t)

ex.ce.pt np.li.na.lg.Li.nA.lg.Er.ro.r:

re.tu.rn 0.0

tr.y:

BT.Ai.nv.B = np.do.t(B\_ve.c.T, np.do.t(A\_in.v, B\_ve.c))

ex.ce.pt:

re.tu.rn 0.0

if om.eg.a == 0 or P0 == 0:

re.tu.rn 0.0

zr = np.pi \* w0 \*\* 2 / la.mb.da\_

w\_z = w0 \* np.sq.rt(1 + (z / zr) \*\* 2)

tr.y:

va.l\_ex.p = -2 \* (C\_va.l - BT.Ai.nv.B) / (om.eg.a\*\*2)

if va.l\_ex.p < -700:

ex.p\_va.l = 0.0

el.if va.l\_ex.p > 700:

re.tu.rn 0.0

el.se:

ex.p\_va.l = np.ex.p(va.l\_ex.p)

ge.om\_fa.ct.or = (I0 \* om.eg.a\*\*2) / (2 \* P0 \* np.sq.rt(de.tA)) \* ex.p\_val.

ex.ce.pt:

re.tu.rn 0.0

a = np.sq.rt(ar.ea)

u1\_mi.n, u1\_ma.x = -a/2, a/2

u2\_mi.n, u2\_ma.x = -a/2, a/2

tr.y:

in.te.gr.al, \_ = db.lq.ua.d(

la.mb.da u2, u1: np.ex.p(-2 \* ((u1\*\*2 + u2\*\*2)/(w\_z \*\* 2))),

u1\_mi.n, u1\_ma.x,

la.mb.da u1: u2\_mi.n,

la.mb.da u1: u2\_max.

)

ex.ce.pt Ex.ce.pt.io.n:

re.tu.rn 0.0

et.a = pa.rt1 \* ge.om\_fa.ct.or \* in.te.gr.al

if no.t np.is.fi.ni.te(et.a) or et.a < 0 or et.a > 1:

re.tu.rn 0.0

re.tu.rn eta.

de.f ev.al.ua.te(in.d):

W = in.d[0]

H = in.d[1]

p = in.d[2]

al.ph.a = in.d[3]

be.ta = in.d[4]

ga.mm.a = in.d[5]

th.et.a = in.d[6]

I0 = in.d[7]

om.eg.a = in.d[8]

P0 = in.d[9]

la.mb.da\_ = in.d[10]

z = in.d[11]

w0 = in.d[12]

x0 = in.d[13]

y0 = in.d[14]

if (W > W\_MA.X or W < W\_MI.N or H > H\_MA.X or H < H\_MI.N or p > P\_MA.X or p < P\_MI.N or

la.mb.da\_ < LA.MB.DA\_MI.N or la.mb.da\_ > LA.MB.DA\_MA.X or

w0 < W0\_MI.N or w0 > W0\_MA.X or z < Z\_MI.N or z > Z\_MA.X or

x0 < X0\_MI.N or x0 > X0\_MA.X or y0 < Y0\_MI.N or y0 > Y0\_MA.X):

re.tu.rn (1e6, 1e6)

ar.ea\_va.l = my\_ar.ea(W, H, p)

if ar.ea\_va.l < AR.EA\_MI.N or ar.ea\_va.l > AR.EA\_MA.X or no.t np.is.fi.ni.te(ar.ea\_va.l):

re.tu.rn (1e6, 1e6)

ef.f = my\_ef.fi.ci.en.cy(ar.ea\_va.l, al.ph.a, be.ta, ga.mm.a, th.et.a, I0, om.eg.a, P0,

x0, y0, w0, z, la.mb.da\_)

if no.t np.is.fi.ni.te(ef.f) or ef.f <= 0 or ef.f > 1:

re.tu.rn (1e6, 1e6)

re.tu.rn (-ef.f, ar.ea\_va.l)

cr.ea.to.r.cr.ea.te("Fi.tn.es.sM.ul.ti", ba.se.Fi.tn.es.s, we.ig.ht.s=(1.0, -1.0))

cr.ea.to.r.cr.ea.te("In.di.vi.du.al", li.st, fi.tn.es.s=cr.ea.to.r.Fi.tn.es.sM.ul.ti)

to.ol.bo.x = ba.se.To.ol.bo.x()

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_W", np.ra.nd.om.un.if.or.m, W\_MI.N, W\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_H", np.ra.nd.om.un.if.or.m, H\_MI.N, H\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_p", np.ra.nd.om.un.if.or.m, P\_MI.N, P\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_al.ph.a", np.ra.nd.om.un.if.or.m, AL.PH.A\_MI.N, AL.PH.A\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_be.ta", np.ra.nd.om.un.if.or.m, BE.TA\_MI.N, BE.TA\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_ga.mm.a", np.ra.nd.om.un.if.or.m, GA.MM.A\_MI.N, GA.MM.A\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_th.et.a", np.ra.nd.om.un.if.or.m, TH.ET.A\_MI.N, TH.ET.A\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_I0", np.ra.nd.om.un.if.or.m, I0\_MI.N, I0\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_om.eg.a", np.ra.nd.om.un.if.or.m, OM.EG.A\_MI.N, OM.EG.A\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_P0", np.ra.nd.om.un.if.or.m, P0\_MI.N, P0\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_la.mb.da", np.ra.nd.om.un.if.or.m, LA.MB.DA\_MI.N, LA.MB.DA\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_z", np.ra.nd.om.un.if.or.m, Z\_MI.N, Z\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_w0", np.ra.nd.om.un.if.or.m, W0\_MI.N, W0\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_x0", np.ra.nd.om.un.if.or.m, X0\_MI.N, X0\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("at.tr\_y0", np.ra.nd.om.un.if.or.m, Y0\_MI.N, Y0\_MA.X)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("in.di.vi.du.al", to.ol.s.in.it.Cy.cl.e, cr.ea.to.r.In.di.vi.du.al,

(to.ol.bo.x.at.tr\_W, to.ol.bo.x.at.tr\_H, to.ol.bo.x.at.tr\_p, to.ol.bo.x.at.tr\_al.ph.a, to.ol.bo.x.at.tr\_be.ta, to.ol.bo.x.at.tr\_ga.mm.a,

to.ol.bo.x.at.tr\_th.et.a, to.ol.bo.x.at.tr\_I0, to.ol.bo.x.at.tr\_om.eg.a, to.ol.bo.x.at.tr\_P0, to.ol.bo.x.at.tr\_la.mb.da,

to.ol.bo.x.at.tr\_z, to.ol.bo.x.at.tr\_w0, to.ol.bo.x.at.tr\_x0, to.ol.bo.x.at.tr\_y0), n=1)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("po.pu.la.ti.on", to.ol.s.in.it.Re.pe.at, li.st, to.ol.bo.x.in.di.vi.du.al)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("ma.te", to.ol.s.cx.Bl.en.d, al.ph.a=0.5)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("mu.ta.te", to.ol.s.mu.tG.au.ss.ia.n, mu=0, si.gm.a=0.01, in.dp.b=0.3)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("se.le.ct", to.ol.s.se.lN.SG.A2)

to.ol.bo.x.re.gi.st.er("ev.al.ua.te", ev.al.ua.te)

de.f ma.in():

po.p = to.ol.bo.x.po.pu.la.ti.on(n=1000)

ho.f = to.ol.s.Pa.re.to.Fr.on.t()

st.at.s = to.ol.s.St.at.is.ti.cs(la.mb.da in.d: in.d.fi.tn.es.s.va.lu.es)

st.at.s.re.gi.st.er("av.g", np.me.an, ax.is=0)

st.at.s.re.gi.st.er("mi.n", np.mi.n, ax.is=0)

st.at.s.re.gi.st.er("ma.x", np.ma.x, ax.is=0)

al.go.ri.th.ms.ea.Mu.Pl.us.La.mb.da(po.p, to.ol.bo.x, mu=1000, la.mb.da\_=2000, cx.pb=0.7, mu.tp.b=0.3, ng.en=50,

st.at.s=st.at.s, ha.ll.of.fa.me=ho.f, ve.rb.os.e=Tr.ue)

ef.fs = []

ar.ea.s = []

fo.r in.d in ho.f:

ef.f, ar.ea = in.d.fi.tn.es.s.va.lu.es

ef.fs.ap.pe.nd(-ef.f)

ar.ea.s.ap.pe.nd(ar.ea)

pl.t.fi.gu.re(fi.gs.iz.e=(8,6))

pl.t.sc.at.te.r(ar.ea.s, ef.fs, s=40)

plt..xl.ab.el("Площ.ад.ь фото.пр.иё.мн.ик.а, м²")

plt..yl.ab.el("КП.Д")

plt..ti.tle("Па.рето-уй.ми.ща: КП.Д vs Площ.ад.ь")

pl.t.ti.gh.t\_la.yo.ut()

pl.t.sh.ow()

if \_\_na.me\_\_ == "\_\_ma.in\_\_":

ma.in()