**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  |  | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | | | | | | |
| Факультет | И | |  | Заведующий кафедрой | | | | | |  | | | | И1 | | | | | | |
|  | индекс факультета | |  |  | | | | |  | | | | | | индекс кафедры | | |
| Выпускающая кафедра | И1 | |  | | Борейшо А.С. | | |  | | | |  | | | | | | | |
|  | индекс кафедры | |  | | Фамилия ИО | |  | | | | подпись | | | | | | | | | | |
| Группа | И1М31 | |  | « 07» | | апреля | | | | | | | | | | 2019 г. | | |
|  | индекс группы | |  |  | |  | | | | | | |  | | | |

**отчет**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **о прохождении** | | | преддипломной | | | | | | | | | | | | | | **практики** | | | | | | | |
| наименование практики | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Поначевной Ирины Федоровны | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **обучающегося по**  **направлению/специальности** | | | | | | 12.04.05 | | |  | | Лазерная техника и лазерные | | | | | | | | | |
| нужное подчеркнуть | | | | | | код | | | |  | | полное наименование направления/специальности | | | | | |
| технологии | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Руководитель практики:** | | | | | Киселев И.А., к.т.н., доцент | | | | | | | | | | | | | | |
|  | | Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| **Срок прохождения практики:** | | | | с | | 27.03.2019 | | | | | | г. |  | по | 07.06.2019 | | | г. | | | |
| **Должность обучающегося на практике:** | | | | | | | **магистрант** | | | | | | | | | | | | | | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Руководитель практики:** | | | |  | | |  |  | | | | |  | | | | | |
|  | | |  | Киселев И. А. | | |  | |  | | |  | |  | | | | |
| Подпись | | |  | Фамилия ИО | | |  | |  | | | |  | |  | | |
| « 07 » |  | \_\_\_\_\_\_\_июня\_\_\_\_\_ | | |  | 2019 г. |  |  | |  |  | | | | |  |  | | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019 г.

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc12125443)

[1 Разработка расчетно-аналитического раздела магистерской диссертации 4](#_Toc12125444)

[1.1 Определение требований к разрабатываемой системе 4](#_Toc12125445)

[1.2 Анализ и расчет энергоемкости спектральных компонент зондирующего импульса 5](#_Toc12125446)

[1.3 Обеспечение вариативности ЛСС со спектральным кодированием импульсов 7](#_Toc12125447)

[1.4 Расчет энергетической эффективности предложенной ЛСС 11](#_Toc12125448)

[1.4.1 Расчет мощности зондирующего импульса 12](#_Toc12125449)

[1.4.2 Расчет ослабления излучения атмосфере 14](#_Toc12125450)

[1.4.3 Результаты расчета мощности, приходящей на приемник системы 16](#_Toc12125451)

[1.4.4 Расчет отношения сигнал/шум 17](#_Toc12125452)

[2 Разработка структурной схемы предлагаемого устройства 20](#_Toc12125453)

[3 Подбор компонентов для предложенной системы 22](#_Toc12125454)

[3.1 Подбор коммерчески доступных компонентов для предложенной системы 22](#_Toc12125455)

[3.1.1 Лазерные источники 22](#_Toc12125456)

[3.1.2 Волоконно-оптический усилитель 24](#_Toc12125457)

[3.1.3 Приемник излучения 25](#_Toc12125458)

[3.1.4 Мультиплексор/демультиплексор и циркулятор 26](#_Toc12125459)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 29](#_Toc12125460)

# ВВЕДЕНИЕ

В процессе прохождения преддипломной практики мной был разработан расчетно-аналитический раздел магистерской диссертации, где, на основе описания предложенного в предыдущем разделе способа повышения информативности лазерных сканирующих систем путем введения спектрального кодирования импульсов, описан расчет энергетических и частотных характеристик таких лазерных сканирующих систем. Кроме того, приведена структурная схема предлагаемого устройства и описан принцип его работы, а также подобраны оптические компоненты, для реализации такого устройства.

# 1 Разработка расчетно-аналитического раздела магистерской диссертации

**1.1 Определение требований к разрабатываемой системе**

Для оценки применимости в лазерных сканирующих системах технологии спектрального кодирования импульсов необходимо выбрать абстрактную лазерную сканирующую систему, определить основные технические требования к этой системе и условия её работы. В таблице 1 приведены основные технические требования к ЛСС со спектральным кодированием импульсов.

Таблица 1 – Технические требования к ЛСС

|  |  |
| --- | --- |
| Тип сканирования | Покадровое |
| Размер кадра | 640х480 точек |
| Частота обновления информации, | 10 кадров/с |
| Дальность сканирования | до 500 м |
| Длительность импульса | до 1 нс |
| Длина волны лазерного источника | 1,5 мкм |

Для максимальной дальности 500 м требуется обеспечить построчное сканирование прямоугольным кадром размером 640х480 точек при частоте обновления данных 10 кадров в секунду.

Дальность 500 м накладывает ограничение на частоту следования импульсов для лазерной сканирующей системы с одним лазером. Так, время следования одного импульса до объекта Т равно  
3,3\*10-6 с. Тогда частота следования импульсов однолазерной системы на дальности 500 м равна .

Однако, согласно заданным техническим требованиям к системе требуемая частота следования импульсов по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Таким образом, возникает необходимость увеличения частоты следования зондирующих импульсов без сокращения дальности с применением спектрального кодирования более чем в 10 раз.

Длина волны 1,5 мкм является безопасной для глаз человека, и лежит в окне прозрачности атмосферы. Кроме того, такая длина волны удобна для построения системы спектрального кодирования на технологии спектрального уплотнения каналов (DWDM). А необходимый диапазон длин волн можно выбрать согласно рекомендованной сетке длин волн Международного Телекоммуникационного Союза (ITU GRID), используемой в DWDM.

В диапазоне 1.5 мкм предложенный способ может быть реализован с использованием технологии спектрального уплотнения каналов (DWDM). Поэтому, вся система может быть построена на оптоволоконных компонентах. Важно отметить, что для усиления энергетики зондирующего импульса в таком случае целесообразно использовать волоконно-оптический усилитель. Анализ возможности подбора коммерчески доступных компонентов приведен в главе 3.

**1.2 Анализ и расчет энергоемкости спектральных компонент зондирующего импульса**

В предлагаемой системе энергия излучаемого зондирующего импульса постоянна и определяется параметрами усилителя. При условии постоянной средней выходной мощности оптического усилителя, увеличение частоты следования зондирующих импульсов ведет к пропорциональному уменьшению энергии каждого из них.

Эта связь обусловлена соотношением (2), где средняя выходная мощность оптического усилителя определяется как прозведение энергии зондирующего импульса на частоту следования импульсов .

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

В свою очередь, энергия зондирующего импульса определяется отношением мощности зондирующего импульса к длительности этого импульса:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

В формуле (3) – мощность зондирующего импульса, - длительность зондирующего импульса.

Из формул (2) и (3) получим зависимость для определения мощности зондирующего импульса :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

На рисунке 1 показана зависимость энергии зондирующего импульса от увеличения частоты следования зондирующих импульсов .

График показывает, что увеличение частоты следования импульсов в ЛСС кратно количеству задействованных комбинаций ведет к уменьшению энергии зондирующих импульсов пропорционально количеству задействованных комбинаций.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 1 – Зависимость энергии зондирующего импульса от увеличения частоты следования зондирующих импульсов |

С другой стороны, очевидно, что при использовании нескольких спектральных компонент, образующих зондирующий импульс, общая энергия импульса будет поделена между спектральными компонентами поровну. График энергоемкости спектральных компонент представлен на рисунке 2.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2 – Зависимость энергии спектральных компонент от количества компонент, задействованных в кодовой комбинации |

Из графика видно, что увеличение количества активных спектральных компонент ведет к уменьшению энергии каждой спектральной компоненты.

Таким образом, введение спектрального кодирования и увеличение частоты следования импульсов неизбежно ведет к уменьшению доли энергии в каждой спектральной компоненте зондирующего импульса. Это необходимо учитывать при оценочных энергетических расчетах системы.

**1.3 Обеспечение вариативности ЛСС со спектральным кодированием импульсов**

Для оценки энергетической эффективности любой лидарной системы необходимо оценить количество энергии отраженного от объекта сигнала, которое будет улавливаться системой, и приходить на приемники излучения при определенных параметрах системы, определенных погодных условиях и свойствах отражающего объекта. Такую оценку проводят в соответствии с расчетами лидарного уравнения. Лидарное уравнение для оценки количества энергии отраженного от твердого объекта описывает формула 5.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

В уравнении (16) – мощность, приходящая на приемник, – мощность зондирующего импульса, – эффективность ЛСС, – диаметр премного телескопа приемной системы ЛСС, – коэффициент диффузного отражения излучения от объекта (Альбедо), – расстояние до объекта сканирования, – коэффицент пропускания излучения в атмосфере.

Как следует из лидарного уравнения, с точки зрения энергетики, максимальное расстояние до объекта определяется энергией зондирующего импульса при прочих равных условиях. В случае сканирующей системы с импульсно-спектральным кодированием речь идет уже не о целом импульсе, а о каждой его спектральной компоненте. Поскольку увеличение количества кодовых комбинаций и частоты следования импульсов ведет к уменьшению энергии в каждой спектральной компоненте, как было показано в подразделе 2.3, легко столкнуться с проблемой, когда энергии отраженного сигнала в каждой спектральной компоненте становится недостаточно для уверенного приема сигнала.

Был проведен оценочный анализ энергетических параметров оптических импульсов, получаемых при введении ИСК и увеличении частоты следования импульсов. В данном расчете энергетика оценивалась относительно абстрактной системы, работающей на единичной частоте следования импульсов и имеющей только одну спектральную компоненту, то есть относительно обычного лазерного дальномера. В качестве ЛСС с импульсно-спектральным кодированием выступала система с 4 лазерными источниками. Расчеты проводились в относительных единицах. За единицу принималась частота следования импульсов в обычном лазерном дальномере. Числовая зависимость между энергией, приходящей на приемники систем и увеличением частоты следования этих импульсов приведена в таблице 3.

Таблица 2 – Числовые значения зависимость энергии спектральных компонент разных систем от изменения частоты следования импульсов

| Оцениваемая система | Увеличение частоты следования импульсов | Энергия спектральных компонент в отраженных импульсах, % | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 спектр. комп.-та | 2 спектр. комп.-та | 3 спектр. комп.-ты | 4 спектр. комп.-ты |
| Дальномер | 1 | 100 | - | - | - |
| ЛСС без ИСК | 4 | 25 | - | - | - |
| ЛСС с ИСК | 5 | 20 | 10,00 | - | - |
| 6 | 16,67 | 8,33 | - | - |
| 7 | 14,29 | 7,14 | - | - |
|  | 8 | 12,5 | 6,25 | - | - |
|  | 9 | 11,11 | 5,56 | - | - |
|  | 10 | 10 | 5,00 | - | - |
| ЛСС с ИСК | 11 | 9,09 | 4,55 | 3,03 | - |
| 12 | 8,33 | 4,17 | 2,78 | - |
| 13 | 7,69 | 3,85 | 2,56 | - |
| 14 | 7,14 | 3,57 | 2,38 | - |
| 15 | 6,67 | 3,33 | 2,22 | 1,7 |

Графически эта зависимость представлена на рисунке 3.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3 – Зависимость энергии спектральных компонент от количества компонент, задействованных в кодовой комбинации |

Черными точками на графике обозначена энергия спектральной компоненты в импульсе с одной спектральной компонентой, красными – с двумя спектральными компонентами, синими – с тремя спектральными компонентами и, наконец, зелеными – с четырьмя спектральными компонентами.

Из графика видно, что увеличение частоты следования импульсов в 4 раза при задействовании 1 спектральной компоненты из 4х ведет к уменьшению энергии в 4 раза (при прочих равных условиях). Для увеличения частоты, например, в 12 раз при наличии 4 доступных длин волн, будут использованы 4 кодовые комбинации с одной спектральной компонентой, 6 с двумя спектральными компонентами и 2 с тремя спектральными компонентами. Для увеличения частоты в 15 раз при наличии 4 доступных длин волн, будут использованы 4 кодовые комбинации с одной спектральной компонентой, 6 с двумя спектральными компонентами, 4 с тремя спектральными компонентами и одна с четырьмя спектральными компонентами. Относительные энергии этих спектральных компонент представлены на графике в таблице 3.

Важно отметить, что эффективность и работоспособность системы по энергетике необходимо рассчитывать для кодовой комбинации, содержащей наибольшее количество задействованных спектральных компонент. Например, для системы с 4 лазерными источниками при увеличении частоты следования в 12 раз необходимо оценивать энергоёмкость компоненты в кодовой комбинации, содержащей 3 активные компоненты, а при увеличении частоты следования в 15 раз – энергоёмкость компоненты в комбинации, содержащей 4 активные компоненты.

Вариативность такой системы заключается в том, что в общем случае, частота следования импульсов будет определяться не дальностью до объекта, а полными энергетическими потерями. Поэтому, частота следования импульсов может быть адаптивно подстроена под текущие параметры трассы, при этом всегда будет обеспечиваться максимально возможная эффективность.

**1.4 Расчет энергетической эффективности предложенной ЛСС**

Для расчета энергетической эффективности системы будем руководствоваться исходными техническими данными по таблице 2, приведенной в подразделе 2.1, а также лидарным уравнением (формула 5).

В соответствии с исходными данными таблицы 2 необходимо предложить систему спектрального уплотнения и кодирования зондирующего импульса лазерной сканирующей системы, работающей в диапазоне 1,5 мкм на дальности до 500 м с длительностью импульса до 1 нс, и, обеспечивающей построчное сканирование прямоугольным кадром размером 640х480 точек при частоте обновления данных 10к/с.

По оценкам, приведенным в подразделе 2.1 требуемая частота следования импульсов предлагаемой ЛСС при дальностях сканирования до 500 м должна быть не менее . В то время, как в обычной лидарной сканирующей одночастотной системе, дальность в 500 м накладывает ограничение на частоту следования импульсов, которая не может превышать 0,3 МГц. Значит, частоту следования импульсов необходимо увеличить более чем в 10 раз.

Таким образом, задачей расчета является обоснование энергетической эффективности применения спектрального кодирования импульсов в ЛСС для увеличения частоты следования зондирующих импульсов более чем в 10 раз без сокращения дальности сканирования.

Для решения задачи оптимальным решением будет использование в системе четырёх лазерных источников, работающих в диапазоне длин волн согласно 100 ГГц сетке длин волн Международного Телекоммуникационного Союза (ITU GRID).

Так как частота следования импульсов при введении импульсно-спектрального кодирования увеличивается кратно количеству задействованных комбинаций, то для обеспечения требований, указанных выше, следует задействовать 11 кодовых комбинаций. Как видно из таблицы 2 целесообразно рассчитать энергетику спектральных компонент в зондирующем импульсе, содержащей 3 спектральные компоненты.

Для расчета мощности .спектральных компонент отраженных от объекта суммарных импульсов и приходящих на приемники системы будем руководствоваться лидарным уравнением (5). В указанном лидарном уравнении необходимо учесть основные параметры системы и условия, при которых система будет работать. Такими параметрами являются: – эффективность лазерной сканирующей системы, которую условно примем за 1. – диаметр премного телескопа ЛСС, – коэффициент диффузного отражения излучения от объекта (Альбедо), – расстояние до объекта сканирования, – коэффициент пропускания излучения в атмосфере. Однако, в первую очередь, необходимо рассчитать энергетику зондирующего импульса, а точнее энергетику той задействованной кодовой комбинации, которая содержит 3 спектральные компоненты.

**1.4.1 Расчет мощности зондирующего импульса**

В подразделе 1.3 было приведено описание методики расчета пиковой мощности зондирующего импульса при известной средней выходной мощности усилителя в системе и известной длительности зондирующего импульса.

Был проведен подбор волоконно-оптического усилителя для разрабатываемой системы, подробные характеристики которого указаны в 3 главе. В таблице 3 приведены возможные значения средней выходной мощности подобранного усилителя для диапазона длин волн 1540-1565 нм.

Таблица 3 – Значения средней выходной мощности выбранного усилителя

|  |  |
| --- | --- |
| Средняя мощность усилителя в дБм | Средняя мощность усилителя в Вт |
| 25 | 0,316 |
| 27 | 0,500 |
| 30 | 1,000 |
| 33 | 2,000 |

Для оценочного расчета примем среднюю выходную мощность усилителя равной 316 мВт.

Частота следования импульсов при задействовании 11 комбинаций увеличится (по сравнению с однолазерной системой) в 11 раз и будет рана . Частота обновления информации в такой ЛСС (скорость сканирования) по формуле (4) будет равна больше 10 к/с.

Мощность зондирующего импульса для системы с 4 лазерами с использованием 11 кодовых комбинаций для увеличения частоты следования импульсов в 11 раз, равна:

Тогда мощность каждой спектральной компоненты в зондирующем импульсе, содержащем 3 спектральные компоненты примет значение:

Для сравнения целесообразно рассчитать мощности зондирующего импульса для однолазерной системы и для системы с 4 лазерами, но без введения импульсно-спектрального кодирования. Частота обновления информации в однолазерной ЛСС будет меньше 1 к/с, а системы с 4 лазерами, но без введения импульсно-спектрального кодирования – меньше 4 к/с.

Мощность зондирующего импульса в однолазерной системе при частоте следования импульсов примет значение:

Мощность зондирующего импульса для системы с 4 лазерами без использования спектрального кодирования импульса, т. е когда зондирующие импульсы содержат одну спектральную компоненту и посылаются на объект последовательно с частотой следования, увеличенной 4 раза, будет равна:

По результатам расчета в случае применения спектрального кодирования импульса наблюдается значительное снижение энергетики зондирующего импульса.

**1.4.2 Расчет ослабления излучения атмосфере**

Поскольку длина волны 1,5 мкм находится в окне прозрачности атмосферы, то потери энергии импульса в атмосфере минимальные. Коэффициент пропускания α [км-1] энергии импульса атмосферы можно рассчитать по формуле (17).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

В формуле (6) – длина волны излучения лазера в мкм, МДВ –метеорологическая дальность видимости в км, а рассчитывается по формулам (7) – (9).

|  |  |
| --- | --- |
| , при МДВ <10 км | (7) |
| , при 10< МДВ <50 км | (8) |
| , при МДВ >50 км | (9) |

Для расчета длины волн излучения каждого лазера в системе примем равной 1,5 мкм, поскольку, согласно 100 ГГц сетке длин волн Международного Телекоммуникационного Союза (см. приложение А) разница между длинами волн может быть порядка 20 нм, что не вносит существенных изменений в расчеты.

Для расчета значения метеорологическую дальность видимости МДВ следует принять меньшей 10 км.

В таблице 5 приведены рассчитанные значения коэффициента ослабления (км-1) для различных атмосферных условий (МДВ <10 км) и пропускания для дальности сканирования, равной 500 м.

Таблица 4– Рассчитанные значения ослабления для дальности 500 м.

|  |  |
| --- | --- |
| Погодные условия | Ослабление (км-1) |
|
| Чисто  МДВ=10 км | 0.105 |
| Слабая дымка  МДВ=5 км | 0.28 |
| Смог  МДВ=2,3 км | 0.77 |
| Дождь  МДВ=2 км | 0.91 |

В лидарном уравнении фигурирует зависимость пропускания в атмосфере от коэффициента ослабления и дальности сканирования. Обозначим пропускание коэффициентом μ и выпишем отдельно выражение для его вычисления (формула 10).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Рассчитанные значения пропускания атмосферы для дальности L=500  м и различных погодных условях представлены в таблице 5.

Таблица 5- Значения пропускания атмосферы для дальности L=500 м и различных погодных условиях

| Погодные условия | Пропускание (L=500 м) |
| --- | --- |
| Чисто  МДВ=10 км | 0.9 |
| Слабая дымка  МДВ=5 км | 0.76 |
| Смог  МДВ=2,3 км | 0.46 |
| Дождь  МДВ=2 км | 0,4 |

**1.4.3 Результаты расчета мощности, приходящей на приемник системы**

Для расчета необходимо определиться со всеми условиями работы лазерной сканирующей системы. В таблице 6 приведены все приятые для оценочного расчета значения основных параметров для 3 систем и условий её работы.

Таблица 6 – Параметры и условия работы систем для расчета

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Однолазерная система | Система с 4 лазерами без ИСК | Система с 4 лазерами с ИСК |
| Мощность зондирующего импульса (при средней мощности усилителя 316 мВт) | 1053,33 Вт | 263,33 Вт | 95,75 Вт |
| Длительность импульса | 1 нс | 1 нс | 1 нс |
| Диаметр приемного телескопа | 5 см | 5 см | 5 см |
| Дальность | 500 м | 500 м | 500 м |
| Пропускание (чистая атмосфера) | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Эффективность ЛСС | 1 | 1 | 1 |
| Коэффициент диффузного отражения | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

В данном случае, примем, что сканируемый объект отражает всего 1% излучения, диаметр приемного телескопа систем равен 5 см, а значение эффективности, для удобства расчетов, приравняем к 1.

Результаты расчета мощности , приходящей на приемник для трех указанных систем приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчета мощности

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Однолазерная система | Система с 4 лазерами без ИСК | Система с 4 лазерами с ИСК |
| Мощность | 74 нВт | 18,6 нВт | 2,3 нВт |

**1.4.4 Расчет отношения сигнал/шум**

Заключительным этапом расчета энергетической эффективности применения импульсно-спектрального кодирования является оценка возможности обеспечения уверенного обнаружения, т. е. уверенной (с вероятностью не хуже 0,95) регистрации отраженного от объекта сигнала. При чем, основным параметром, который определяет обнаружительную способность приемного тракта ЛСС, является аппаратное отношение сигнал/шум (SNR) на выходе приемника излучения (поскольку сигнал с выхода приемника поступает на вход порогового устройства, принимающего решение о наличии или об отсутствии отраженного от объекта сигнала).

Отношение сигнал/шум в широком смысле определяет отношение мощности полезного сигнала к мощности шума:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

В литературе пороговое значение отношения сигнал/шум обычно приводится равным 2,5, что соответствует 50%-ной вероятности обнаружения отраженного излучения на выходе приемника излучения.

На рисунке 4 показана зависимость вероятности обнаружения *Р*о отраженного от объекта сигнала от аппаратного отношения сигнал/шум при пороге .

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 4 – Зависимость вероятности обнаружения отраженного от объекта сигнала от отношения сигнал/шум |

Анализ зависимости показывает, что для обеспечения необходимой вероятности обнаружения порядка 95% отраженного излучения приемным трактом лазерной сканирующей системы более чем достаточно, чтобы отношение сигнал/шум на выходе приемника было .

С учетом вышесказанного, ясно, что мощность, приходящая на приемник и обеспечивающая уверенное и точное обнаружение приемником ЛСС отраженного излучения, определяется отношением сигнал/шум:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

В формуле (12) – пороговая чувствительность приемника излучения, то есть минимальная мощность, которую способен зарегистрировать приемник ЛСС.

Минимальная мощность, регистрируемая приемником, определяется из его характеристик, которые обычно указываются в технических спецификациях на приемник, по формуле (13).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

где NEP [Вт/Гц1/2] – мощность, эквивалентная шуму; Δ*f* [Гц] – частотная полоса пропускания.

Поэтому приемник для предлагаемой ЛСС следует выбирать по частотной полосе пропускания, которая определяется длительностью принимаемого импульса (до 1 нс по исходным данным).

В характеристиках выбранного для предлагаемой системы приемника, подробные характеристики которого будут рассмотрены в главе 3, мощность, эквивалентная шуму равна 3\*10-15 Вт/Гц1/2. Частотная полоса пропускания Δ*f* равна 1 ГГц. Следовательно, пороговая чувствительность приемника будет равна

Для определения SNR при приеме отражённого от объекта излучения в предлагаемой лазерной сканирующей системе со спектральным кодированием импульса, а также в системах с одним лазером и с четырьмя лазерами без введения спектрального кодирования, необходимо воспользоваться формулой (23). Результаты расчета отношения сигнал/шум для всех трех систем приведены в таблице 8, в которой, кроме того, для наглядности приведена частота обновления информации каждой системы.

Таблица 8 – Результат расчёта отношения сигнал/шум

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Однолазерная система | Система с 4 лазерами без ИСК | Система с 4 лазерами с ИСК |
| Отношение сигнал/шум (SNR) | 784 | 196 | 24 |
| Частота обновления информации, к/с | <1 | <4 | >10 |

По результатам расчета, можем видеть, что энергетика спектральных компонент, приходящих на приемник в предлагаемой ЛСС со спектральным кодированием импульсов, обеспечивают эффективную работу системы со скоростью обновления информации – больше 10 к/с и детектирование отраженного сигнала с SNR порядка 24.

# 2 Разработка структурной схемы предлагаемого устройства

Как уже было сказано, в диапазоне 1.5 мкм предложенный способ спектрального кодирования импульсов может быть реализован с использованием технологии спектрального уплотнения каналов (DWDM), в которой импульсы разной длины волны посредством мультиплексора суммируются в зондирующие импульсы. Структурная схема такой системы приведена на рисунке 5.

|  |
| --- |
| H:\Диплом\3_Предзащита\Схема 2.png |
| Рисунок 5 – Структурная схема ЛСС со спектральным кодированием импульсов |

Суммарный зондирующий импульс из мультиплексора поступает на волоконно-оптический усилитель. Усиленные импульсы отправляются на волоконно-оптический циркулятор, который выполняет функцию разделителя передающего и приемного тракта. Далее зондирующие импульсы поступают на приемо-передающий сканирующий узел, обеспечивающий построчное сканирование объекта прямоугольным кадром. Отраженный от объекта сигнал улавливается приемо-передающим сканирующим узлом и, с помощью циркулятора, передается на демультиплексор, где разделяется по длинам волн и отправляется на соответствующие фотоприемники.

# 3 Подбор компонентов для предложенной системы

**3.1 Подбор коммерчески доступных компонентов для предложенной системы**

Приведенная схема легко может быть построена на коммерчески доступных оптических компонентах. Необходимо отметить, что внедрение импульсно-спектрального кодирования осуществляется только на программно-алгоритмическом уровне и не влечет принципиального изменения схемотехнических решений. Тем не менее, в следующих подразделах настоящей работы приведен подбор некоторой элементной базы, применимой для реализации предлагаемой системы.

**3.1.1 Лазерные источники**

По исходным данным требуемая длина волны лазерных источников в предлагаемой лазерной сканирующей системе должна лежать в районе 1,5 мкм. Анализ рынка показал, что наиболее эффективным будет применение лазерных диодов серии 1754С компании Emcore, DWDM, с распределенной обратной связью – DFB (Distributed Feed Back). Технические характеристики этих лазеров представлены в таблице 17 [16].

Таблица 9 – Технические характеристики лазерных диодов 1754С

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Диапазон длин волн | 1525 - 1564 нм |
| Выходная оптическая мощность | 6 - 16 мВт |
| Рабочий ток | 150 мА |
| Частотный диапазон прямого канала | от 5 до 2700 МГц |
| Температурный диапазон | от -40 до +85 С |

Внешний вид лазерных диодов серии 1754С представлен на рисунке 6.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 6 – Внешний вид лазерного диода серии 1754С |

Особого внимания заслуживает диапазон длин волн этих лазеров, который лежит в рамках 100 ГГц (C-Band) сетки длин волн Международного Телекоммуникационного Союза (ITU GRID), используемой в DWDM. Полный список длин волн 100 ГГц сетки приведен в приложении к настоящей работе. Разница между двумя длинами волн С-диапазона определяется фиксированным расстоянием (от 0,7 до 1 нм) между каналами согласно рекомендациям ITU GRID.

Выбор длин волн в каждом конкретном случае обусловлен параметрами усилителя, пропусканием атмосферы и т.д. Поскольку применяемый в системе усилитель выполнен на оптоволокне легированным ионами эрбия и иттербия, то его спектр усиления определяет выбор длин волн и выходную энергию вследствие различия коэффициентов усиления для разных длин волн. Другой не маловажный критерий выбора длин волн является оптимальное, точнее минимальное поглощение естественной атмосферой.

Одним из важных параметров лазеров, установленных в системе, является максимально возможная достижимая лазерами частота следования импульсов. При спектральном кодировании зондирующего излучения частота следования импульсов каждого лазера не постоянна и определяется каким-то разбросом значений. Тем не менее, важно знать требования к минимальной необходимой для работы системы частоте следования для оценки возможности применения тех или иных лазерных источников в системе.

Если в системе используется 4 лазерных источника, то по таблице 1 можно выявить, что при следовании подряд 8 комбинаций, в которых один из лазеров имеет ненулевую энергию, минимальная необходимая частота следования импульсов этого лазера должна быть в 8 раз больше частоты следования импульсов в однолазерной системе. Например, на дальности 500 м, минимальная необходимая частота следования импульсов каждого лазера должна быть равна 0,3 МГц\*8=2,4 МГц.

**3.1.2 Волоконно-оптический усилитель**

Выбор волоконно-оптического усилителя обуславливался диапазонами длин волн, в рамках которого должна работать лазерная сканирующая система. Важным параметром при выборе усилителя также являлась выходная средняя мощность усиления сигнала. Наиболее подходящим для предлагаемой ЛСС является эрбиевый волоконно-оптический усилитель CEFA-C-BO-HP компании KEOPSYS (LUMIBIRD) с высокой выходной мощностью. Основные технические параметры выбранного усилителя представлены в таблице 18.

Таблица 10 – Основные технические характеристики волоконно-оптического усилителя CEFA-C-BO-HP

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Диапазон длин волн | 1540 - 1565 нм (C-band) |
| Режим работы | Непрерывный (CW) |
| Диапазон входного сигнала | От 5 до 25 дБм  (от 3,2 до 316 мВт) |
| Выходная средняя мощность, дБм  (при входном минимуме) | 25 27 30 33 |

Продолжение таблицы 18

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Выходная средняя мощность, мВт  (при входном минимуме) | 316 500 1000 2000 |
| Потребляемая мощность, Вт | 15 20 30 50 |

Внешний вид волоконно-оптического усилителя CEFA-C-BO-HP представлен на рисунке 7.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 7 – Внешний вид волоконно-оптического усилителя  CEFA-C-BO-HP |

**3.1.3 Приемник излучения**

В ходе разработки лазерной сканирующей системы очень важной задачей является подбор приемника излучения, поскольку от технических характеристик приемника будет зависеть уверенное обнаружение объекта сканирования ЛС, правильное определение дальности этого объекта и получение достоверной информации об объекте.

Для предлагаемой лазерной сканирующей системы был выбран PIN фотодиод G8195 с волоконным входом и высокой чувствительностью компании Hamamatsu. Одним из главных достоинств этого приемника является высокосортной отклик (частотная полоса пропускания – 2 ГГц). Технические характеристики выбранного приемника представлены в таблице 19.

Таблица 11 – Технические характеристики PIN фотодиода G8195

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Частотная полоса пропускания | 2 ГГц |
| Длина волны пиковой чувствительности | 1,55 мкм |
| Мощность, эквивалентная шуму NEP | 3\*10-15 Вт/Гц1/2 |
| Темновой ток | 20 пА |

Внешний вид PIN фотодиода G8195 показан на рисунке 8.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 8 – Внешний вид волоконно-оптического усилителя CEFA-C-BO-HP |

**3.1.4 Мультиплексор/демультиплексор и циркулятор**

С развитем телекоммуникационных технологий, на рынке появилось огромное множество волоконно-оптических отвечающих самым современным стандартам. Так, серия DWDMM-SM многоканальных мультиплексоров и демультиплексоров, основанные на тонкопленочных DWDM устройствах, отдельные каналы которых соединены в каскадной последовательности, обладают подходящими техническими характеристиками для их применения в предлагаемой лазерной сканирующей системе. Основные характеристики выбранных мультиплексора и демультиплексора приведены в таблице 20.

Таблица 12 – Основные технические характеристики мультиплексора и демультиплексора серии DWDMM-SM

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметр | Значение | |
| Тип фильтра | 100 ГГц | 200 ГГц |
| Количество каналов | 4 8 16 | 4 8 16 |
| Полоса пропускания | < 1 дБ | |
| Максимальная оптическая мощность | 300 мВт | |
| Тип волокна | SMF28e | |
| Рабочая температура | от -5 до +70°С | |

На рисунке 9 приведен внешний вид подобранного к системе мультиплексора и демультиплексора.

|  |
| --- |
| https://sphotonics.ru/upload/iblock/172/1727e289e4704de9f5c68fc3866df07d.jpg |
| Рисунок 9 –Мультиплексор и демультиплексор серии DWDMM-SM |

При выборе циркулятора для предлагаемой лазерной сканирующей системы основным критерием являлась длина волны. На рисунке 10 представлен выбранный для системы оптоволоконный трёхспоровый циркулятор CIR-PM-15 1550нм компании AFW TECHNOLOGIES, а основные его технические характеристики указаны в таблице 21.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 13 – Оптоволоконный трёхпортовый циркулятор CIR-PM-15 1550 нм компании AFW TECHNOLOGIES |

Таблица 21 - Основные технические характеристики оптоволоконного трёхпортового циркулятора CIR-PM-15

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Центральная длина волны | 1550 нм |
| Ширина спектральной полосы | ±30 нм |
| Пик изоляции | 50дБ |
| Типичная изоляция | 46дБ |
| Минимальная изоляция | 38дБ |
| Рабочая температура | от -5 до +70°С |

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За весь период прохождения преддипломной практики были проведены основные энергетические и частотные расчеты предлагаемой системы, предложена и описана структурная лазерной сканирующей системы с высокой информативностью за счет введения спектрального кодирования импульсов, а также подобраны коммерчески доступные компоненты для реализации такого устройства. Были сформированы основные разделы пояснительной записки магистерской диссертации, подготовлены презентационные материалы для доклада.