

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра оптико-электронных систем и дистанционного зондирования (ОЭС и ДЗ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 И.В. Самохвалов

« 07 » 06 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛИДАРНОЙ СИСТЕМЫ

по основной образовательной программе подготовки магистров
направление подготовки 12.04.02 – Опотехника

Бабушкин Павел Александрович

Руководитель ВКР

канд. физ.-мат. наук, с.н.с. ИОА

СО РАН

 В.К. Ошлаков

подпись

« 02 » 06 2017г.

Автор работы

студент группы № 714

 П.А. Бабушкин

подпись

Томск – 2017

АННОТАЦИЯ

В магистерской работе проводилось исследование влияния эффектов самовоздействия проявляющихся при распространении фемтосекундного лазерного излучения в атмосфере. Исследование имеет выраженную практическую направленность на эксплуатацию фемтосекундной лидарной системы в задачах дистанционного зондирования.

Диссертация состоит из введения, трех глав, списка использованных источников из 35 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 62 страницы, в том числе из них 24 рисунка, 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 САМОВОЗДЕЙСТВИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	7
1.1 Самофокусировка и филаментация	8
1.2 Генерация излучения конической эмиссии суперконтинуума	12
2 УРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛИДАРА ..	14
3 ДИСТАНЦИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛИДАРОМ	23
3.1 Конструкция «обычного» лидара	23
3.2 Конструкция фемтосекундного лидара.....	27
3.3 Схема проведения дистанционного зондирования фемтосекундным лидаром.....	31
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛИДАРОМ.....	35
4.1 Решение уравнения лазерного зондирования для «обычного» лидара.....	35
4.2 Решение уравнения лазерного зондирования для фемтосекундного лидара	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	40
ПРИЛОЖЕНИЕ А Отчет о проведении патентно-информационных исследований	43

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих миллионов лет Земля служит средой обитания человека. В отличие от животного, лишь приспосабливающегося к окружающей среде в процессе биологической эволюции, человек сознательно и активно изменяет ее для удовлетворения своих потребностей [1].

Во взаимоотношениях между человеком и природой произошел качественный скачок в результате резкого увеличения численности населения, интенсивной индустриализации и урбанизации нашей планеты [2]. Антропогенное влияние на окружающую среду очевидно. Изменения, которые вносит человек в результате индустриализации, не всегда позитивны. Отходы добычи ископаемых природных ресурсов, таких как нефть, уголь, радиоактивные элементы, и их переработка становятся одним из основных источников загрязнения окружающей среды. Дым, пепел промышленных предприятий, тепловых электростанций, пыль от автотранспорта вредны для жизни и здоровья человека, отрицательно влияют на животный и растительный мир.

Актуальность проблемы контроля состояния окружающей среды и применение лазеров в экологии отражена в «Плане фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года» [3].

Решение этой проблемы возможно контактными и бесконтактными способами. Изучение атмосферы контактным способом весьма затруднительно, потому что отбор проб и дальнейший их анализ требует значительных временных затрат, поэтому дистанционным (бесконтактным) методам диагностики и контроля отдается предпочтение, вследствие оперативности получения информации.

Методики лазерного дистанционного зондирования занимают главное место среди дистанционных методов мониторинга окружающей среды. Возможность определения выбранной характеристики воздушной среды на любом направлении лазерного луча и получения сведений о свойствах атмосферы на различных высотах с высоким пространственным разрешением стимулировали их дальнейшее развитие. Лидар – лазерный локатор – позволяет проводить дистанционный мониторинг и диагностику атмосферы.

В настоящее время в России и за рубежом активно развиваются методы зондирования окружающей среды фемтосекундными лидарными системами [4]. Привлекательность зондирования короткими (длительностью десятки – сотни фемтосекунд) мощными (от десятых долей до единиц тераватт) импульсами связана с нелинейными эффектами (эффекты самовоздействия), возникающими при

распространении таких импульсов в атмосфере. Выполнение условия $P_{\text{изл.}} > P_{\text{кр.}}$, где $P_{\text{кр.}}$ – мощность, при превышении которой реализуются условия для изменения поперечных размеров пучка – самофокусировки импульса, приводит к реализации нелинейных эффектов, наблюдаемых визуально (для воздуха это значение в пределах $3 \div 4$ ГВт).

В поле сфокусированных фемтосекундных импульсов могут быть получены интенсивности $10^{17} \div 10^{18}$ Вт/см², при этом напряженности светового поля достигают здесь 10^{10} В/см. Воздействие высокой интенсивности светового поля на среде приводит к реализации условий образования плазмы вдоль распространения лазерного импульса и его взаимодействия со сгустком плазмы. В результате взаимодействия, визуально наблюдается светящаяся нить – филамент. Плазменный канал – филамент – является источником широкополосного излучения. Энергия импульса распределяется в диапазоне нескольких спектральных октав, для лазерной длины волны 800 нм распределение излучения зарегистрировано в спектре от 300 нм до 4500 нм [5]. В антистоксовой, по отношению к лазерной длине волны, части спектра (для титан-сапфирового лазера с длиной волны 800 нм это распределение в видимую область спектра) наблюдается генерация конической эмиссии суперконтинуума (СК). В этой части спектра реализуется распределение излучения с признаком: чем короче длина волны, тем больше угол при вершине конуса расходимости излучения. Таким образом, в атмосфере генерируется источник вторичного излучения, характеристики которого сопоставимы с уже известными, «обычными» лазерами.

Изменение исходных характеристик лазерного импульса (длительность, энергия, длина волны, начальное сечение) становятся причиной изменения характеристик вторичного источника излучения (начало филаментации, длина филамента), что создает проблемную ситуацию при описании взаимосвязи параметров источника вторичного излучения с параметрами лидарной системы.

Управление эффектами самовоздействия позволяет позиционировать источник СК – филамент – вдоль трассы, помещая его вблизи объекта исследования. Излучение СК дает возможность проводить зондирование в широком спектре длин волн [6,7], что позволяет отказаться от использования нескольких или перестраиваемых по частоте лазеров.

Лидары, использующие нелинейные эффекты, такие как самофокусировка, филаментация и генерация конической эмиссии суперконтинуума, для дистанционной диагностики атмосферы, принято называть лидарами «белого» света (ЛБС).

Целью работы является построение концептуальной модели связи параметров широкополосного источника излучения с параметрами фемтосекундной лидарной

системы и на основе этой модели разработать метод управления параметрами вторичного источника.

Для этого необходимо: проанализировать существующие модели и методы управления параметрами вторичного источника и выбрать из них приемлемый; на основе анализа построить концептуальную модель связи параметров источника СК и фемтосекундного лидара; выявить существенные факторы, влияющие на параметры вторичного источника; построить методику управления параметрами источника.

На защиту выносится следующее положение: «основным управляющим параметром, который определяет положение точки начала филаментации на атмосферной трассе, является поперечное сечение пучка. Изменение сечения пучка, при фиксированных значениях энергии, длительности и длине волны, позволяет сократить расстояние до начала самофокусировки в два и более раз.»

Основные результаты работы представлены в следующих материалах:

- Babushkin P.A., Burnashov A.V., Iglakova A.N. and others. Some results of the Propagation of the high-Power terawatt femtosecond laser radiation in different media // *Proc. SPIE 9810*, International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XII.
- Бабушкин П.А. Уточнение параметров лидарного уравнения при дистанционном зондировании в спектре суперконтинуума // тр. XII всероссийской конф. студенческих научно-исследовательских инкубаторов - Томск, 2015. - С. 137-139.
- Бабушкин П.А., Бурнашов А.В., Иглакова А.Н. и др. Определение характеристик распространения тераваттного фемтосекундного лазерного излучения при различных начальных условиях. // *Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике: сб. ст. XX международной научно-практической конф.* – Санкт – Петербург, 2015. - С. 10-12.

1 САМОВОЗДЕЙСТВИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Стремление проводить исследования в масштабах предельно коротких интервалов пространства и времени мотивировало развитие лазеров ультракороткой длительности. Развитие техники позволило создавать компактные лазерные системы. Современные фемтосекундные лазерные системы размещаются на обычном лабораторном столе (рисунок 1.1).

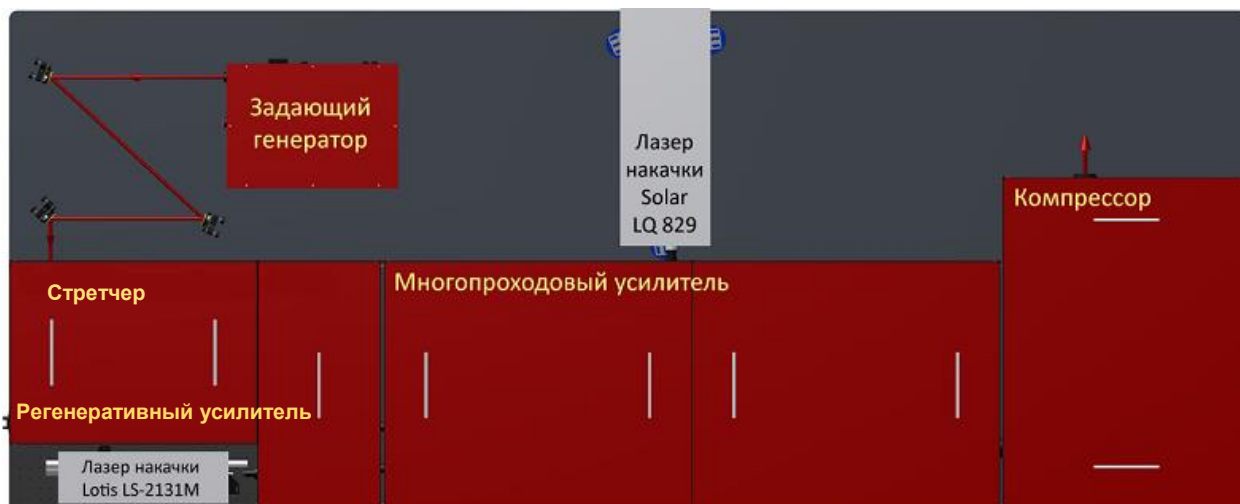


Рисунок 1.1 – Схема размещения блоков фемтосекундной тераваттной лазерной системы ИОА СО РАН.

Лазерная система, приведенная на рисунке 1.1, предназначена для генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов длительностью 25-55 фс и энергией $(5 \div 100) \cdot 10^{-3}$ Дж. Такая лазерная система позволяет получать излучение с высокой интенсивностью при сравнительно малом значении энергии импульса например, $E_{\text{им}} = 20 \cdot 10^{-3}$ Дж; $\tau_{\text{им}} = 50 \cdot 10^{-15}$ с; $a_0 = 1,25 \cdot 10^{-2}$ м – радиус пучка; $P = 0,4 \cdot 10^{12}$ Вт; $I = 0,82 \cdot 10^{15}$ Вт/м² для не сфокусированного пучка.

Огромная интенсивность, достигаемая в пучке, вызывает ряд явлений, такие как самофокусировка, филаментация и генерация излучения суперконтинуума, которые являются предметом исследования нелинейной оптики. Эти явления применимы в задачах дистанционного зондирования атмосферы, позволяя проводить дистанционную диагностику в широком спектральном диапазоне от УФ до ИК [6,7].

1.1 Самофокусировка и филаментация

Использование фемтосекундной лазерной системы для дистанционной диагностики атмосферы требует учитывать комбинации характеристик излучения: энергии излучения E , длительности импульса τ , площади поперечного сечения лазерного пучка S .

Высокие выходная мощность P и интенсивность I излучения предъявляют высокие требования к лучевой стойкости зеркал, входящих в оптическую систему лидара. Например, для энергии импульса $E=10^{-3}$ Дж, длительности импульса $\tau=100 \cdot 10^{-15}$ с, радиуса начального поперечного сечения 1 см, получим значения мощности $P=10^{10}$ Вт (10 ГВт), интенсивности $I \approx 3.2$ ГВт/см².

В процессе распространения высокоинтенсивного лазерного излучения в атмосфере наблюдаются процессы самофокусировки и филаментации, а также генерация СК.

Эффекты самовоздействия связаны с зависимостью комплексного показателя преломления от интенсивности распространяющейся волны. В данном случае появление эффектов связано с электрооптическим эффектом Керра. В работе [8] вводят величину называемую мощность самофокусировки для среды $P_{кр.}$, которая определяется по формуле

$$P_{кр} = \frac{3.77\lambda^2}{(8\pi n_0 n_2)}, \quad (1.1)$$

где n_0 – линейный показатель преломления;

n_2 – нелинейный коэффициент преломления, зависящий от нелинейно-оптической восприимчивости среды третьего порядка χ^3 ;

λ – длины волны лазерного излучения.

При условии $P_{изл} > P_{кр}$ возникает самофокусировка излучения, для воздуха это значение по формуле (1.1) составляет 2,9 ГВт.

Под действием светового поля высокой напряженности первоначально оптически однородная среда становится оптически неоднородной; показатель преломления среды теперь определяется распределением интенсивности в поперечном сечении распространяющегося пучка.

$$n = n_0 + n_2 I(t), \quad (1.2)$$

где n_0 – линейный показатель преломления;

n_2 – нелинейный коэффициент преломления, зависящий от нелинейно-оптической восприимчивости среды третьего порядка χ^3 ;

$I(t)$ – интенсивность лазерного излучения.

В среде с $n_2 > 0$ (такой знак реализуется при электрооптическом эффекте Керра) области максимальной интенсивности являются одновременно и более оптически плотными. В этом случае происходит концентрация энергии – периферийные лучи отклоняются в область, где поле максимально – излучение преломляется в среду более оптически плотную. Этот эффект получил название самофокусировки светового пучка.

В результате самофокусировки (уменьшение расходимости или увеличение сходимости мощного излучения из-за различных нелинейных эффектов, возникающих под действием самого луча [9]) повышается интенсивность на переднем фронте (острие) импульса (эквивалентно действию собирающей линзы). Интенсивность, на переднем фронте импульса, достигнув значения достаточного для ионизации кислорода и азота, приводит к образованию плазмы (эффект оптического пробоя). В поле сфокусированных фемтосекундных импульсов могут быть получены интенсивности $10^{17} - 10^{18}$ Вт/см², при этом напряженности светового поля достигают здесь 10^{10} В/см. Если длительность импульса 100 фс, то импульс занимает в пространстве 30 мкм. Нарастанию поля препятствует дифракция на плазме, которая вызывает дефокусировку излучения импульса (можно сравнить с действием отрицательной линзы). Процессы самофокусировки и дефокусировки продолжаются до тех пор, пока выполняется условие $P_{изл} > P_{кр}$.

Процесс образования плазмы называют филаментацией, начало которой происходит на некотором расстоянии Z_f от источника излучения (рисунок 1.2). Протяженность филамента может составлять десятки и сотни метров [10,11]

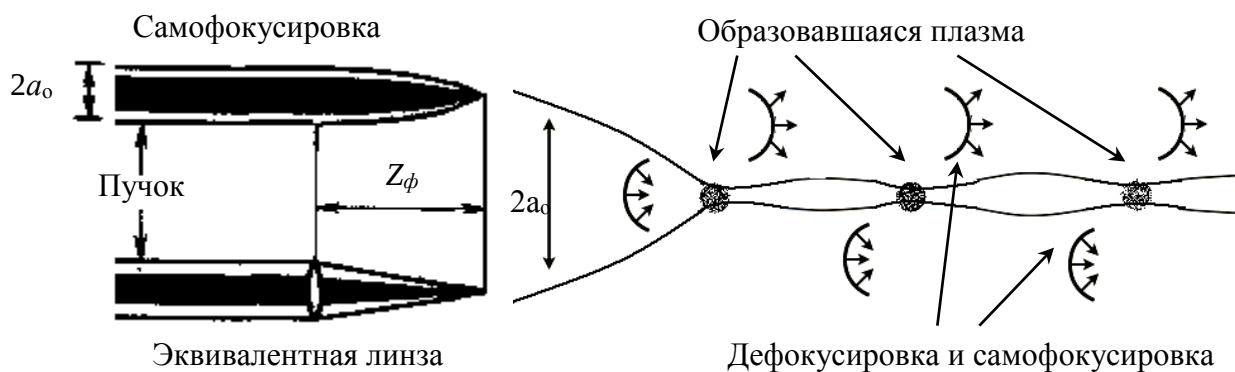


Рисунок 1.2– Самофокусировка пучка с дальнейшей филаментацией [8].

Расстояние Z_f до точки филаментации рассчитывается с помощью формулы Марбургера, которая была получена на основе обобщения большого количества результатов численного исследования [12].

$$Z_{\Phi} = \frac{2L_R 0.367}{\sqrt{(\sqrt{\eta} - 0.852)^2 - 0.0219}} \quad (1.3)$$

где $L_R = k \frac{a_0^2}{2}$ – дифракционная длина исходного пучка;

$\eta = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{кр}}}$ – безразмерная величина;

k – волновое число, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$;

a_0 – радиус пучка;

$P_{\text{изл}}$ – мощность лазерного излучения;

$P_{\text{кр}} = \frac{3.77\lambda^2}{(8\pi n_0 n_2)}$ – критическая мощность светового для гауссова пучка.

Используя значения E , τ , a_0 для лазерного излучения указанные в начале раздела, получим, что начальная точка филаментации по формуле 1.3 находится на расстоянии $Z \approx 327$ м от лидарной системы.

Для заранее сфокусированных пучков применима формула Власова-Таланова

$$Z_{\Phi'} = \left(\frac{1}{F} + \frac{1}{Z_{\Phi}} \right)^{-1}, \quad (1.4)$$

где $Z_{\Phi} = \frac{2}{\sqrt{(\eta - 1)}}$.

Изменение поперечных размеров пучка a_0 , за счет фокусирующих/дефокусирующих зеркал, ведет к изменению места филаментации в соответствии с формулой Марбургера и Власова-Таланова (1.3), (1.4).

Поскольку, при острой фокусировке $F \ll L_R$, где $L_R = k \frac{a_0^2}{2}$, интенсивность сильно зависит от продольной координаты, остается открытым вопрос о формировании нелинейного фокуса при жесткой фокусировке $F \ll L_R$ [13].

В силу оптической неоднородности атмосферы, связанной, например, с турбулентностью, в поперечном сечении возникают флуктуации показателя преломления. Их наличие создает условия для множественной филаментации. Она выражается в разбиении основного пучка на меньшие (лучевые трубки), для каждой из которых при выполнении условия $P_{\text{изл}} > P_{\text{кр}}$ реализуются самофокусировка и филаментация [11].

Сравнивая величины $P_{\text{изл}}$ и $P_{\text{кр}}$ между собой можно оценить поведение пучка в нелинейной среде:

а) $P_{\text{изл}} < P_{\text{кр}}$ пучок распространяется без появления добавки $n_2 I(t)$, к основному показателю преломления – нет реализации нелинейных эффектов;

б) $P_{\text{изл}} \approx P_{\text{кр}}$ реализуются условия нелинейного волновода (рисунок 1.3), излучение распространяется почти без потерь (возникает эффект полного внутреннего отражения);

в) $P_{\text{изл}} > P_{\text{кр}}$ происходит самофокусировка излучения. Процесс самофокусировки продолжается до тех пор пока выполняется условие $P_{\text{изл}} \geq P_{\text{кр}}$.

При возникновении оптического волновода вне пучка радиусом a_0 показатель преломления среды $n = n_0$. Внутри пучка радиусом a_0 показатель преломления $n = n_0 + n_2 I(t)$. Лучи, падающие на границу пучка изнутри, совершают переход из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную; следовательно, при достаточно больших углах φ возможен эффект полного внутреннего отражения.

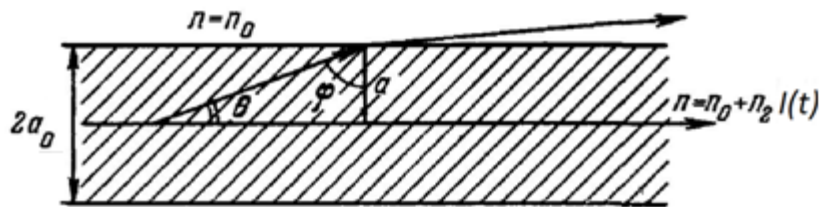


Рисунок 1.3 – Ход лучей в сечении пучка при создании оптического волновода [14].

Критический угол, при котором реализуются условия оптического волновода, соответствует лучу, наклон θ_0 которого к оси пучка равен

$$\theta_0 = \arccos\left(\frac{n_0}{n_0 + n_2 I(t)}\right) \quad (1.5)$$

Лучи с $\theta > \theta_0$ выходят наружу, лучи с $\theta < \theta_0$ возвращаются к оси - реализуется эффект полного внутреннего отражения.

Волноводный режим интересен, так как сопровождается минимальными потерями световой энергии в процессе распространения.

Самофокусировка и реализация оптического волновода в атмосфере позволяют создать условия передачи излучения высокой мощности практически без потерь на большие расстояния (до тех пор пока выполняется условие $P_{\text{изл}} = P_{\text{кр}}$). Но, условия возникновения этих эффектов в реальной атмосфере не постоянны, из-за присутствия флуктуаций показателя преломления различного рода (турбулентность, водяные капли, аэрозоли твердой фракции...), которые становятся причиной разрушения волновода или

реализации множественной филаментации. Поэтому вопрос о методе генерации оптического волновода в условиях реальной атмосферы остается открытым.

1.2 Генерация излучения эмиссии суперконтинуума

В процессе филаментации наблюдается временная модуляция (изменение частотного спектра) и пространственная модуляция (изменение углового спектра) волнового пакета, при этом, значительная часть энергии остается локализованной в узкой приосевой области диаметром 100 мкм. Оба явления визуально наблюдаются одновременно, как уширение спектра лазерного излучения по всей длине филамента – генерация излучения суперконтинуума. Распределение энергии происходит в стоксовую и антистоксовую, по отношению к лазерной длине волны, области спектра в виде конусов с характерной угловой расходимостью. При этом, спектр СК простирается от УФ до ИК диапазонов.

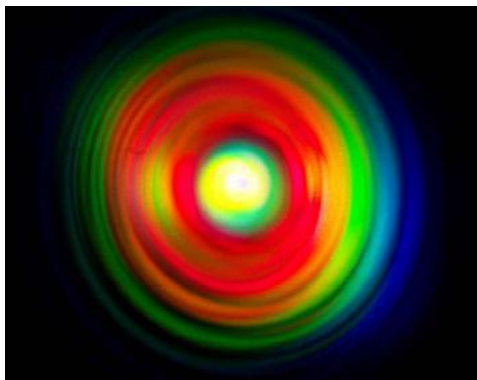


Рисунок 1.4 – Спектральное распределение энергии при конической эмиссии.

Преимущественно в антистоксовой части спектра реализуется распределение излучения с признаком: чем короче длина волны, тем больше угол при вершине конуса расходимости излучения. При этом, спектр простирается от УФ до ИК диапазонов [6].

В излучении из зоны филаментации (по направлению распространения) всего лишь несколько процентов составляет излучение конической эмиссии СК (в видимой области спектра). На видимую область спектра СК приходится порядка $2\div3\%$, а на ИК область $4\div5\%$. По результатам эксперимента [15] порядка 93% энергии СК (включая лазерные длины волн) сконцентрировано в приосевой части импульса.

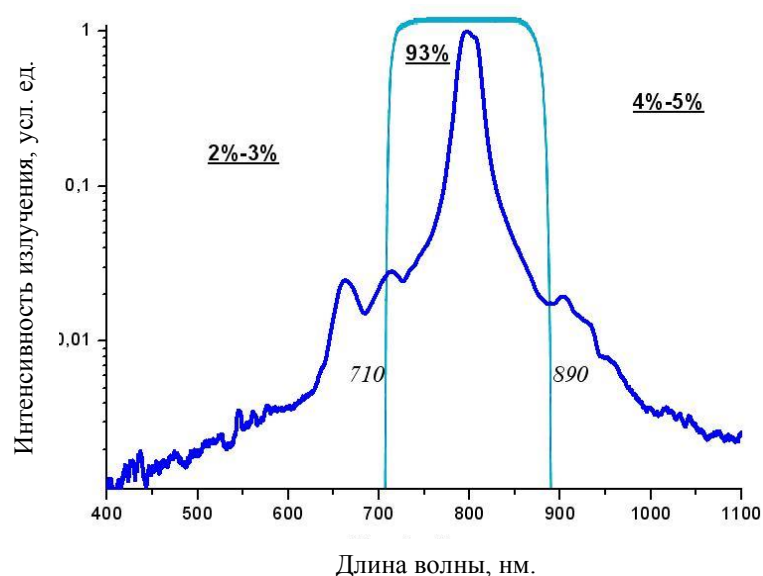


Рисунок 1.5– Спектр излучения СК в филаментированном импульсе[15].

В качестве фильтра (спектрорделителя) было использовано диэлектрическое зеркало, которое отражает излучение в районе 800нм (выделена область отражения диэлектрического зеркала, его эффективность – 99.5%), всё остальное оно пропускает, почти с такой же эффективностью. В коротковолновой части спектра можно выделить локальные максимумы, соответствующие кольцевой структуре конической эмиссии СК. Часть коротковолнового излучения СК распределяется в виде конусов по правилу: чем короче длина волны, тем больше угол при вершине конуса - коническая эмиссия СК (КЭ СК).

Расходимость коротковолновой (синей) составляющей СК оценивается в пределах $(2\div3)\cdot 10^{-3}$ рад. Угловая расходимость для длин волн СК (рад): 0,4 мкм – $4\cdot 10^{-3}$; 0,5 мкм – $1,1\cdot 10^{-3}$; 0,55 мкм – $7,6\cdot 10^{-4}$; 0,6 мкм – $5,9\cdot 10^{-4}$; 0,8 мкм – $1,8\cdot 10^{-4}$; 1,1 мкм – $1,2\cdot 10^{-4}$ соответственно.

Спектральная интенсивность СК падает с ростом частотного сдвига и на границах его полосы уменьшается на 3÷4 порядка по сравнению с интенсивностью на частоте лазерного импульса. Однако, в филаменте интенсивность на этой частоте достигает 10^{13} – 10^{14} Вт/см², и суперконтнуум представляет собой импульсный широкополосный источник высокой спектральной яркости [5]. Перераспределение световой энергии в поперечном сечении импульса играет ключевую роль для реализации условий филаментации (одиночной и/или множественной) в сечении пучка.

2 УРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛИДАРА

Атмосфера Земли представляет собой среду, состоящую из смеси газов и взвешенных в воздухе твердых и жидких частиц, называемых аэрозолями. Общее ослабление лазерного излучения в атмосфере обусловлено молекулярным и аэрозольным поглощением и рассеянием

$$\alpha = \sigma_m + \kappa_m + \sigma_a + \kappa_a, \quad (2.1)$$

где σ_m, κ_m – коэффициенты молекулярного рассеяния и поглощения, соответственно;

σ_a, κ_a – коэффициенты аэрозольного рассеяния и поглощения, соответственно;

Молекулярное поглощение имеет ярко выраженный селективный характер и проявляется в виде полос поглощения, разделенных «окнами прозрачности», где поглощение либо вообще отсутствует, либо весьма мало. Наибольшее значение для лазерного контроля аэрозольных загрязнений имеют «окна прозрачности» в видимом и ИК-диапазонах: 0,5...0,75 и 0,95...1,06 мкм.

При молекулярном рассеянии интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны. С практической точки зрения, его учет имеет значение лишь в прозрачной атмосфере в ультрафиолетовой области спектра.

Оптические характеристики атмосферы в «окнах прозрачности» видимой и ближней ИК области спектра практически полностью определяются присутствием аэрозоля в атмосфере – его концентрацией, распределением по размерам, химической природой и прочее.

Атмосферный аэрозоль чрезвычайно изменчив во времени и пространстве по микроструктуре и физико-химическим свойствам.

Информация об оптических характеристиках атмосферы содержится в уравнении лазерного зондирования (УЛЗ), связывающем амплитуду отраженного атмосферой излучения с параметрами лидара и оптическими характеристиками атмосферы по трассе зондирования. Длина волны зондирующего лазерного излучения подбирается таким образом, чтобы минимизировать эффекты поглощения и рассеяния от посторонних компонент (химические соединения, атмосферные газы, аэрозоли определенного размера). Таким образом, интерпретация данных измерений электромагнитного излучения проводится на такой длине волны или в спектральном интервале, где излучение чувствительно к тому или иному физическому свойству объекта исследования (поглощение или рассеяние).

Одночастотные лидары достаточно широко распространены в практике атмосферных исследований. Разумеется, получаемый при этом объем измерительной информации недостаточен. Одночастотные лидары позволяют, как правило, получить лишь качественные оценки оптических характеристик аэрозолей, а не их микрофизические характеристики [16].

Мощность регистрируемого сигнала обратного рассеяния в приближении однократного рассеяния для одночастотного лидара (зондирующее излучение одной длины волны) определится как функция расстояния Z следующим образом

$$P(Z) = P_0 \frac{A_0}{Z^2} \xi \beta_\pi(Z) G(Z) \frac{c\tau_{\text{и}}}{2} T^2(Z), \quad (2.2)$$

где P_0 - исходная мощность лазерного излучения;

$\frac{A_0}{Z^2}$ - телесный угол, в котором осуществляется прием сигналов оптической системой;

ξ - коэффициент пропускания оптических элементов лидарной системы;

$\beta_\pi(Z) = \frac{\sigma}{4\pi} \chi_\pi(Z)$ - объемный коэффициент обратного рассеяния; σ -коэффициент рассеяния; $\chi_\pi(Z)$ - относительное угловое распределение света, рассеянного единичным объемом взвешенных в воздухе частиц в направлении назад - индикатриса рассеяния для угла 180° ;

$G(Z)$ - геометрический фактор лидара;

$\frac{c\tau_{\text{и}}}{2}$ - расстояние, которое проходит передний фронт волны лазерного излучения за время τ ;

$T^2(Z) = \exp(-2 \int_0^Z \alpha(Z') dZ')$ - интегральное пропускание; $\alpha(Z')$ - коэффициент ослабления атмосферы для лазерной длины волны.

Запишем УЛЗ для лидара «белого» света, как уравнение многочастотного зондирования [17,18]

$$P(Z, \lambda_i) = P_0(\lambda_i) \frac{A_0}{Z^2} \xi(\lambda_i) \beta_\pi(Z, \lambda_i) G(Z, \lambda_i) \frac{c\tau_{\text{и}}}{2} T^2(Z, \lambda_i), \quad (2.3)$$

где $P_0(\lambda_i)$ – исходная мощность излучения на длине волны суперконтинуума;

$\frac{A_0}{Z^2}$ - телесный угол, в котором осуществляется прием излучения обратного рассеянного оптической системой от суперконтинуума;

$\xi(\lambda_i)$ - коэффициент пропускания лидарной системы на длинах волн суперконтинуума;

$\beta_\pi(Z, \lambda_i)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния для длин волн суперконтинуума;

$G(Z, \lambda_i)$ – геометрический фактор лидара в зависимости от длины волны суперконтинуума;

$\frac{c\tau_{\text{и}}}{2}$ – расстояние, которое проходит передний фронт волны излучения суперконтинуума от точки образования вторичного излучения за время τ ;

$T^2(Z, \lambda_i) = \exp(-2 \int_0^Z \alpha(Z', \lambda_i) dZ')$ – интегральное пропускание для спектра суперконтинуума; $\alpha(Z', \lambda_i)$ – коэффициент ослабления атмосферы для длин волн суперконтинуума.

Многочастотное лидарное зондирование основанное на использовании длин волн СК требует пересмотра лидарного уравнения в соответствии с отличительными характеристиками используемых явлений: самофокусировка, филаментация.

Распространение лазерного излучения в виде конической эмиссии СК сопровождается перераспределением энергии в конусы с характерной угловой расходимостью для каждой из длин волн СК. Тогда составляя УЛЗ для лидара «белого» света необходимо учесть начальное значение мощности $P_0(\lambda_i)$ для каждой из длин волн СК.

На основании данных эксперимента [15] распределение интенсивности при генерации СК следующее: 0,4 мкм – $0,001P_{\text{изл}}$; 0,5 мкм – $0,02P_{\text{изл}}$; 0,55 мкм – $0,04P_{\text{изл}}$; 1,1 мкм – $0,12P_{\text{изл}}$ ($E=20$ мДж; $\tau=40$ фс; $P_{\text{изл}}=0,5$ ТВт).

В процессе зондирования лазерный импульс, проходя через среду, испытывает дисперсию групповой скорости – разные спектральные компоненты распространяются с разными скоростями, импульс расплывается – длительность становится функцией расстояния, что приводит к увеличению числа неизвестных в уравнении дистанционного зондирования.

Дисперсионное расплывание световых импульсов характеризуется длиной дисперсионного расплывания

$$L_{\text{дис}} = \frac{\tau_0^2}{2|\beta_2|} \quad (2.4)$$

где τ_0 – начальная длительность импульса;

$\beta_2 = \frac{n''_{\lambda} \lambda^3}{2\pi c^2}$ – коэффициент дисперсии групповой скорости [18].

Она имеет следующий физический смысл – длительность импульса $\tau_{\text{и}}$ на расстоянии $L_{\text{дис}}$ увеличивается в $\sqrt{2}$ раз, т.е. расстояние, до которого временным расплыванием импульса можно пренебречь.

Величина β_2 есть слагаемое в аппроксимации дисперсионных свойств среды, которая описывает дисперсию спектральных компонент частоты ω в окрестности несущей частоты оптического импульса ω_0 в виде ряда

$$k(\omega) = k(\omega_0) + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2, \quad (2.5)$$

где β_1 – обратная величина групповой скорости;

β_2 – коэффициент дисперсии групповой скорости.

При распространении импульса в среде с нормальной дисперсией ($\beta_2 > 0$) длинноволновые компоненты движутся быстрее коротковолновых, при аномальной дисперсии ($\beta_2 < 0$) компоненты меняются ролями (рисунок 2.1), импульс сжимается во времени (уменьшается длительность), при этом говорят, что импульс чирпирован.

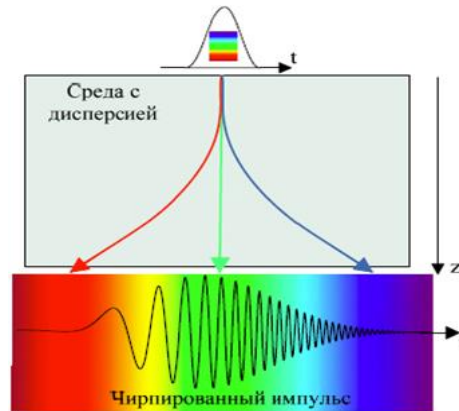


Рисунок 2.1 – Распространение излучения в диспергирующей среде с $\beta_2 < 0$ – аномальная дисперсия[19].

Такие положения компонент частотного спектра описываются положительной и отрицательной частотной модуляцией импульса, как если бы синхронизация мод в лазере осуществлялась соответствующим способом [19]. Зависимость (2.4) справедлива для лазерного излучения с нулевой частотной модуляцией.

При распространении импульсов с линейной частотной модуляцией их длительность меняется с расстоянием Z по закону

$$\tau(Z) = \tau_i \sqrt{\left(1 + 2\gamma\beta_2 \frac{Z}{\tau_i^2}\right)^2 + 4\beta_2^2 \frac{Z^2}{\tau_i^4}} \quad (2.6)$$

где γ – параметр начальной фазовой модуляции;

β_2 – коэффициент дисперсии групповой скорости;

Z – расстояние [7,18].

Увеличение длительности импульса в $\sqrt{2}$ раз при начальной фазовой модуляции имеет место на расстоянии

$$l = L_{\text{дис}} \frac{(-|\gamma| + \sqrt{1+2\gamma^2})}{1+\gamma^2} \quad (2.7)$$

при $\gamma\beta_2 > 0$ и

$$l = L_{\text{дис}} \frac{(\gamma + \sqrt{1+2\gamma^2})}{1+\gamma^2} \quad (2.8)$$

при $\gamma\beta_2 < 0$

где $L_{\text{дис}}$ – длина дисперсионного расплывания без фазовой модуляции;

γ – параметр начальной фазовой модуляции.

Временная дисперсия импульса и пространственное сжатие пучка – два конкурирующих процесса, которые происходят одновременно при распространении излучения. Влияние временного расплывания на участке филаментации имеет смысл учитывать при условии $Z_{\text{ф}} \approx L_{\text{дис}}$. В этом случае изменение длительности импульса излучения, под действием диспергирующей среды, окажет влияние на положение точки самофокусировки, так как произойдет изменение начальной мощности излучения, потому что $P_{\text{изл}}(Z) = \frac{E_0}{\tau(Z)}$, которая входит в ф.Марбургера (1.3). В этом случае ф. Марбургера с учетом дисперсионных свойств среды примет следующий вид

$$Z_{\text{ф.р}} = \frac{2L_R 0.367}{\sqrt{(\sqrt{\eta_p} - 0.852)^2 - 0.0219}}, \quad (2.9)$$

где $L_R = k \frac{a_0^2}{2}$ – дифракционная длина исходного пучка;

$\eta_p = \frac{P_{\text{изл}}(Z)}{P_{\text{кр}}}$ – безразмерная величина;

k – волновое число, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$;

a_0 – радиус пучка;

$P_{\text{изл}}(Z) = \frac{E_0}{\tau(Z)}$ – мощность лазерного излучения при изменении длительности;

$P_{\text{кр}} = \frac{3.77\lambda^2}{(8\pi n_0 n_2)}$ – критическая мощность светового для гауссова пучка.

Положением точки дисперсионного расплывания и самофокусировки можно управлять, меняя такие величины, как E_0 – начальная энергия; τ_0 – длительность импульса; λ – рабочая длина волны; a_0 – начальное сечение пучка [20,21]. Подобрав

соответствующие значения приведенных величин возможно определить току на трассе, для которой выполняется условие $Z_{\text{ф}} \approx L_{\text{дис}}$.

Оценим положение точки самофокусировки (1.3) и длины дисперсионного расплывания (2.4) для следующих начальных данных $\tau_0 = 40 \cdot 10^{-15} \text{с}$; $E_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{Дж}$; $a_0 = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{м}$; $P_{\text{кр}} = 3,4 \cdot 10^9 \text{Вт}$. Используя начальные данные, построим график зависимости двух искомых величин $Z_{\text{ф}}$ и $L_{\text{дис}}$ от длины волны излучения и найдем точку пересечения этих кривых (рисунок 2.2).

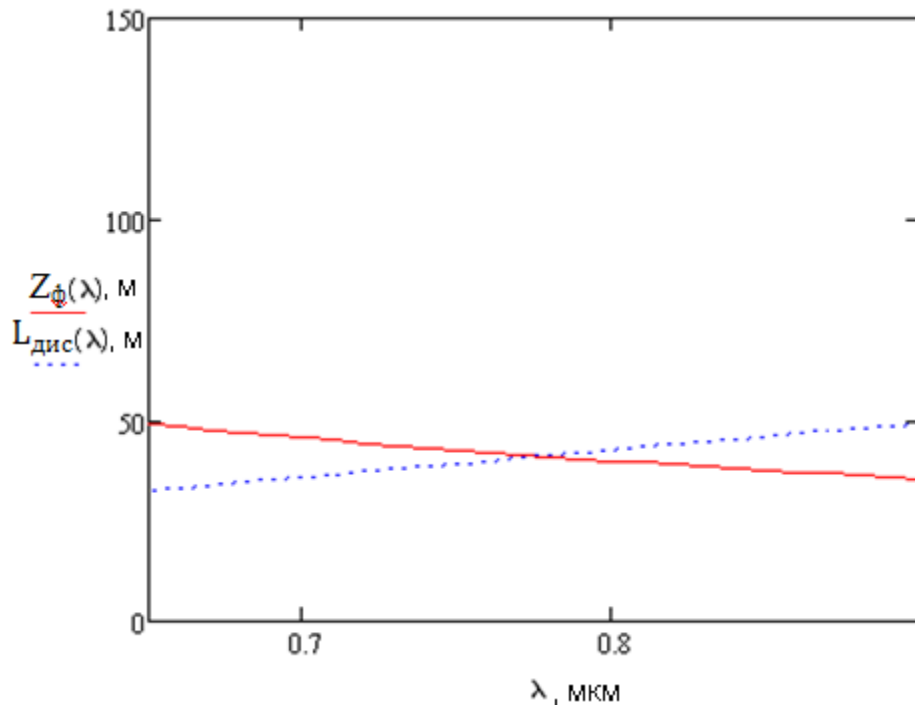


Рисунок 2.2 – К учету дисперсионного расплывания в ф. Марбургера для оценки положения точки начала филаментации.

При данных, для которых проводился расчет, длина волны, для которой выполняется условие $Z_{\text{ф}} \approx L_{\text{дис}}$ находится в диапазоне рабочей длины волны лазера $\lambda = 0,8 \pm 0,05 \text{мкм}$.

Используя формулу (2.9) получим, что расстояние до точки самофокусировки с учетом влияния дисперсионного расплывания составит $Z_{\text{ф.р}} \approx 48 \text{м}$, то есть дистанция самофокусировки увеличилась на 20%.

Падение мощности ведет к условию $P_{\text{изл}} < P_{\text{кр}}$, при котором заканчивается филаментация, а, следовательно, условия для генерации конической эмиссии СК. Длительность на расстоянии $L_{\text{дис}}$ составит $\tau(Z) = 57 \text{фс}$, при этом значение мощности $P = 0,7 P_0$ ($P_0 = 0,5 \text{ТВт}$). Таким образом, падение мощности излучения обусловлено не только

многофотонной и туннельной ионизациями, происходящими во время филаментации, но и дисперсионным распылением пучка.

Проводя зондирование в широком спектре СК необходимо в уравнении (2.3) учесть поправку в величине интегрального пропускания, так как образование длин волн конической эмиссии происходит только от начальной точки филаментации и на протяжении всего филамента. Пройденный зондирующим излучением СК путь исключает участок самофокусировки в прямом ходе, так как на нем еще нет условий реализации широкополосного спектра, но рассматривается в обратном ходе. Тогда, величина интегрального пропускания для длин волн СК примет вид $T^2(Z, \lambda_i) = \exp(-2 \int_{Z_\phi}^Z \alpha(Z', \lambda_i) dZ' - \int_0^{Z_\phi} \alpha(Z', \lambda_i) dZ')$, где $-2 \int_{Z_\phi}^Z \alpha(Z', \lambda_i) dZ'$ – описывает ослабление на участке от точки филаментации до объема зондирования в прямом и обратном ходе; $\int_0^{Z_\phi} \alpha(Z', \lambda_i) dZ'$ – описывает ослабление на участке самофокусировки в обратном ходе для спектра СК от точки филаментации; $\alpha(Z', \lambda_i)$ – коэффициент ослабления атмосферы для длин волн СК.

Многофотонное поглощение и туннельная ионизации среды под действием мощного лазерного излучения, рассеяние на образующейся плазме и потери при преобразовании лазерного излучения в коническую эмиссию СК также требует ввести соответствующее интегральное пропускание на участке филаментации [22]. Ослабление на участке филаментации будет иметь вид $T_\phi(Z) = \exp(-\int_0^{Z_\phi} \alpha_\phi(Z') dZ')$, где $-\int_0^{Z_\phi} \alpha_\phi(Z') dZ'$ – учитывает ослабление на участке филаментации в прямом ходе; $\alpha_\phi(Z')$ – ослабление на участке филаментации для лазерной длины волны.

Зондирование с помощью ЛБС позволяет работать в двух «режимах»: на лазерной (основной) длине волны $\lambda=0,8$ мкм и на длинах волн СК λ_i . Тогда также необходимо сделать поправку на расстояние Z пройденное зондирующим излучением. При зондировании на лазерной длине волны лазерное излучение проходит путь в прямом и обратном ходе от источника излучения (лазера) до точки зондирования. Работая с длинами волн СК пройденное расстояние считается от точки филаментации до точки зондирования в прямом обратном ходе плюс участок самофокусировки в обратном ходе, исключая его же в прямом.

Тогда в уравнение вводится условие для выбора Z_p в зависимости от режима работы

$$Z_p = \begin{cases} Z, & \text{зондирование на лазерной длине волны} \\ Z - Z_\phi, & \text{зондирование на длинах волн СК} \end{cases}$$

При зондировании была использована коаксиальная схема зондирования. В качестве приемной антенны использован телескоп системы Ньютона с фокусным расстоянием 80 см и диаметром главного зеркала 30 см. Входное окно ФЭУ диаметром 10 мм выполняло роль полевой диафрагмы.

На рисунке 2.3 схематично изображены поперечные сечения поля зрения приемного телескопа ограниченного входным окном ФЭУ и излучения конической эмиссии СК.

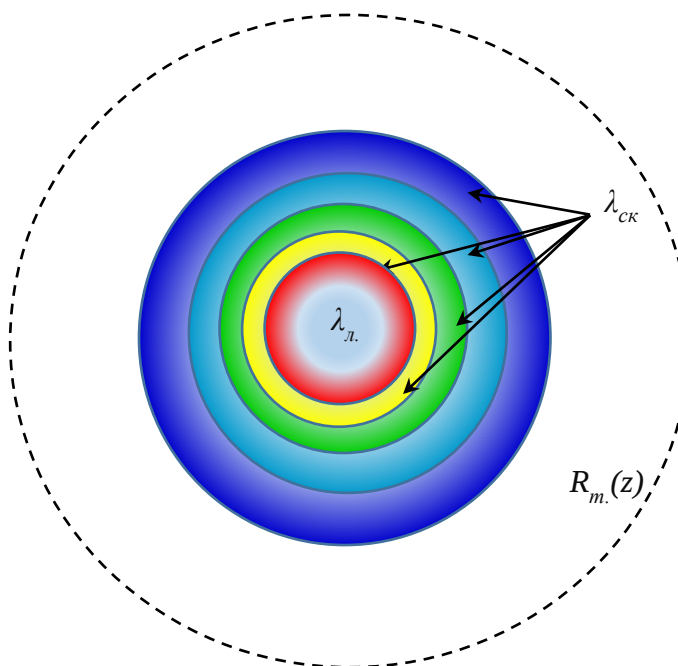


Рисунок 2.3 – Поперечные сечения поля зрения приемного телескопа ограниченного входным окном ФЭУ и излучения конической эмиссии СК.

Угол расходимости спектральных компонент СК (рад): 0,4 мкм – $4 \cdot 10^{-3}$; 0,5 мкм – $1,1 \cdot 10^{-3}$; 0,55 мкм – $7,6 \cdot 10^{-4}$; 0,6 мкм – $5,9 \cdot 10^{-4}$; 0,8 мкм – $1,8 \cdot 10^{-4}$; 1,1 мкм – $1,2 \cdot 10^{-4}$ и мгновенного угла поля зрения, образованного входным окном приемника – $\alpha_m = 6,25 \cdot 10^{-3}$ рад говорят о том, что весь широкий зондирующий спектр СК лежит в телесном угле образованном приемным телескопом с диафрагмой. Тогда, из условия, что угловые расходимости длин волн СК меньше чем угол поля зрения приемника, геометрический фактор ЛБС для коаксиальной схемы примем $G(Z, \lambda_i) = 1$.

Из предположения, что на длинах волн СК нет условий для генерации нелинейных эффектов и, что вдоль трассы зондирования обратное рассеяние на длинах волн СК реализуется только за счет упругого рассеяния, УЛЗ для лидара «белого» света примет следующий вид

$$P(Z, \lambda_i) = P_0(\lambda_i) \frac{A_0}{Z_p^2} \xi(\lambda_i) \beta_\pi(Z, \lambda_i) G(Z, \lambda_i) \frac{c\tau_{\text{и}}}{2} T^2(Z, \lambda_i) T_\Phi(Z) \quad (2.10)$$

Таблица 1 - Параметры УЛЗ для различных участков трассы при зондировании ЛБС.

$Z < Z_\Phi$	$Z_\Phi = \frac{2L_R 0.367}{\sqrt{(\sqrt{\eta} - 0.852)^2 - 0.0219}}$	$Z_{\text{зонд}} > Z_\Phi$
$P_0 = \frac{E_0}{\tau_0}$ – исходная мощность лазерного излучения	$P_{\text{изл}} > P_{\text{кр}}$	$P_0(\lambda_i) = \frac{E_0(\lambda_i)}{\tau(Z)}$
$\theta_{\text{изл}}$ – расходимость лазерного излучения на основной длине волны	$\theta_{\text{фил}} = 0$	$\theta_{\text{ск}}(\lambda_i)$
$\frac{A_0}{Z^2}$ – телесный угол, в котором осуществляется прием сигналов оптической системой	$d_{\text{фил}} = 50 \div 150 \text{ мкм}$	$\frac{A}{Z_p^2}$
ξ – коэффициент оптического пропускания лидарной системы	$\xi(\lambda_i)$	$\xi(\lambda_i)$
$\beta_\pi(Z)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния	нет данных	$\beta_\pi(Z, \lambda_i)$
$G(Z)$ – геометрический фактор лидара	$G(Z) = 1$	$G(Z, \lambda_i)$
$\frac{c\tau_{\text{и}}}{2}$ – пространственное разрешение, определяемое длительностью импульса. Для ФЭУ 62 пространственное стробирование 3 м при времени нарастания 10 нс.		
$T^2(Z)$ – интегральное пропускание	$T_\Phi(Z) = \exp\left(-2 \int_{Z_\Phi}^Z \alpha_\Phi(Z', \lambda_i) dZ'\right) [22]$	$T^2(Z, \lambda_i)$

Для ЛБС точка трассы зондирования, с которой принимают сигнал $Z_{\text{ск}}$, определяют как $Z_{\text{ск}} \geq Z_f + L_{\text{фил}}$, где $L_{\text{фил}}$ – длина зоны филаментации. Учитывая значения параметров $Z_{\text{ск}}$, Z_f , $L_{\text{фил}}$ можно условно разбить трассу зондирования на три части (Таблица 1): а) участок самофокусировки; б) филаментации и генерации конической эмиссии СК и в) участок постфиламентационного распространения лазерного излучения.

ЗДИСТАНЦИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛИДАРОМ

При лазерном зондировании атмосферы характеристики светорассеяния позволяют получать информацию о микроструктурных и микрофизических свойствах облачного аэрозоля и атмосферных газов. Разработаны эффективные методы, основанные на механизмах упругого (молекулярное рассеяние и рассеяние Ми на частицах аэрозоля, резонансное поглощение) и неупругого (комбинационное рассеяние и флуоресценция атмосферных газов и аэрозолей) взаимодействия. Исходный принцип, положенный в основу дистанционного зондирования, состоит в интерпретации данных измерений электромагнитного излучения в таком спектральном интервале, где излучение чувствительно к тому или иному физическому свойству среды [23].

Зондирование может проводиться как на основной длине волны лазера, так и на второй, третьей и даже четвертой гармонике. Для реализации гармоник отличных от лазерной могут быть использованы преобразователи частоты в виде нелинейных кристаллов (дигидрофосфат калия KH_2PO_4 , ниобат лития $LiNbO_3$) или перестраиваемый лазер.

Использование нескольких длин волн вызывает трудность в отстройке системы, что требует дополнительных временных затрат. Потеря времени ведет к снижению получаемой информации, так как аэрозоли имеют нерегулярное пространственное распределение и обладают изменчивостью свойств, что крайне затрудняет получение статистических данных об оптических характеристиках аэрозоля. Поэтому использование широкополосного источника излучения для исследования повышает оперативность получения информации в широком спектральном диапазоне.

Лазерный мониторинг осуществляется системой, называемой лидар. На основе явлений упругого и не упругого рассеяния технически реализованы соответствующие типы лидаров: лидар упругого рассеяния, комбинационного рассеяния, резонансного рассеяния, флуоресценции, дифференциального поглощения и рассеяния [24].

3.1 Конструкция «обычного» лидара

Оптический импульс передается через соответствующий оптический блок в направлении объекта исследования. Оптический блок лазерного передатчика может решать три задачи: улучшать коллимацию, осуществлять пространственную фильтрацию и отсекал любое постороннее излучение самого лазера. Излучение обратного рассеяния, прежде чем попасть в блок детектирования, проходит через приемный телескоп со

спектроанализатором, служащего для выделения интервала длин волн, в котором проводится наблюдение и соответственно отсечки фонового излучения. Принятый пучок обратного рассеяния направляется к соответствующей фотодетектору и блоку обработки информации (ЭВМ) (рисунок 3.1).

Блок синхронизации, синхронизирует работу лазера и ФЭУ, создает задержку начала работы ФЭУ, связанную со временем движения пучка до рассеивающего объекта, а также времени движения рассеянного пучка обратно до лидара.

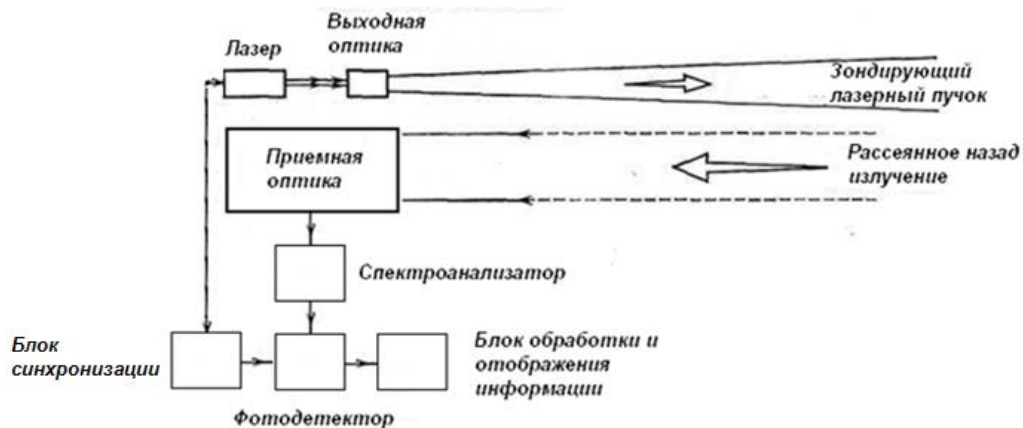


Рисунок 3.1 – Структурная схема лидара.

Основными элементами приемной оптики в большинстве систем дистанционного зондирования в настоящее время являются отражающие телескопы Ньютона, Кассегрена и Грегори (рисунок 3.2).

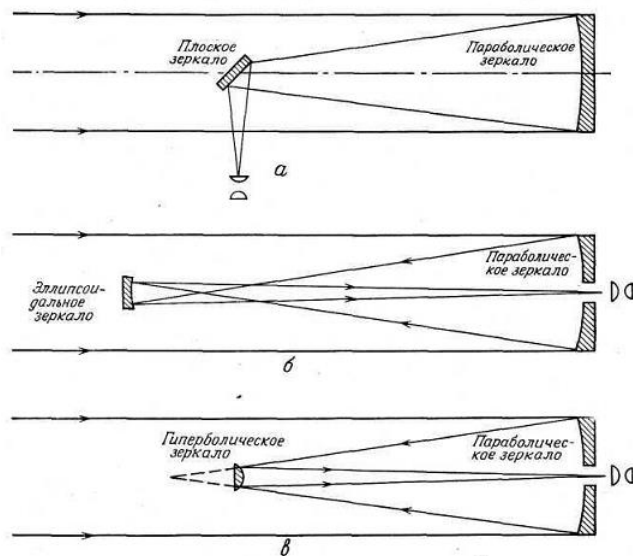


Рисунок 3.2 – Телескопические системы конструкции: а – Ньютона, б – Грегори, в – Кассегрена [24].

Телескопическая система конструкции Ньютона - самая популярная конструкция зеркального телескопа. Первичное зеркало рефлектора представляет собой вогнутую пластину стекла сферической или параболической формы, передняя поверхность которого покрыта отражающим материалом. В конструкции небольших рефлекторов и длиннофокусных телескопов с относительным отверстием $f/9$ или более нередко применяются зеркала сферической формы, однако для больших телескопов и моделей с диафрагменным числом ниже $f/8$ такое решение не подходит. Дело в том, что при использовании в подобных конструкциях сферических зеркал, свет, отражаемый их поверхностью, не сходится в одной точке, формируя в фокусе немного размытое пятно. В результате этого изображение теряет контраст, то есть возникает сферическая аберрация. Предотвратить ухудшение качества изображения, помогают зеркала параболической формы.

В конструкции телескопа Грегори в отличие от Ньютона главное зеркало - вогнутое параболическое. Оно отражает свет на меньшее вторичное зеркало (вогнутое эллипсоидное). От него свет направляется назад в отверстие по центру главного зеркала, за которым стоит окуляр. Расстояние между зеркалами больше фокусного расстояния главного зеркала, поэтому изображение получается прямое (в отличие от перевернутого в телескопе Ньютона). Вторичное зеркало обеспечивает относительно большое увеличение благодаря удлинению фокусного расстояния

Телескоп конструкции Кассегрена - вариант двухзеркального объектива телескопа. Главное зеркало вогнутое (в оригинальном варианте параболическое). Оно отбрасывает лучи на меньшее вторичное выпуклое зеркало (обычно гиперболическое). По классификации Максудова схема относится к так называемым предфокальным удлиняющим - то есть вторичное зеркало расположено между главным зеркалом и его фокусом и полное фокусное расстояние объектива больше, чем у главного. Объектив, притом же диаметр и фокусное расстояние, имеет почти вдвое меньшую длину трубы и несколько меньшее экранирование, чем у Грегори. Система неапланатична, то есть несвободна от аберрации комы. Имеет много как зеркальных модификаций, включая апланатичный Ричи-Кретьен, со сферической формой поверхности вторичного (Долл-Кирхем) или первичного зеркала, так и зеркально-линзовых.

Главное достоинство рефлекторов – отсутствие хроматизма, ведь лучи света в силу самой конструкции отражаются от стекла, а не проходят сквозь него. К тому же, по сравнению с рефракторами зеркальные телескопы менее дороги в производстве: в

конструкции рефлектора присутствуют всего две нуждающиеся в полировке и специальных покрытиях поверхности.

Оптические оси передатчика и приемника ориентируются таким образом, чтобы поле зрения приемной системы максимально перекрывало зондируемый объем по трассе луча. Выделяют следующие схемы лидарных систем: моностатическая и бистатическая (рисунок 3.3).

В моностатической схеме передатчик и приемник устанавливаются в одном месте. В бистатической - разнесены на большое расстояние (большая база).

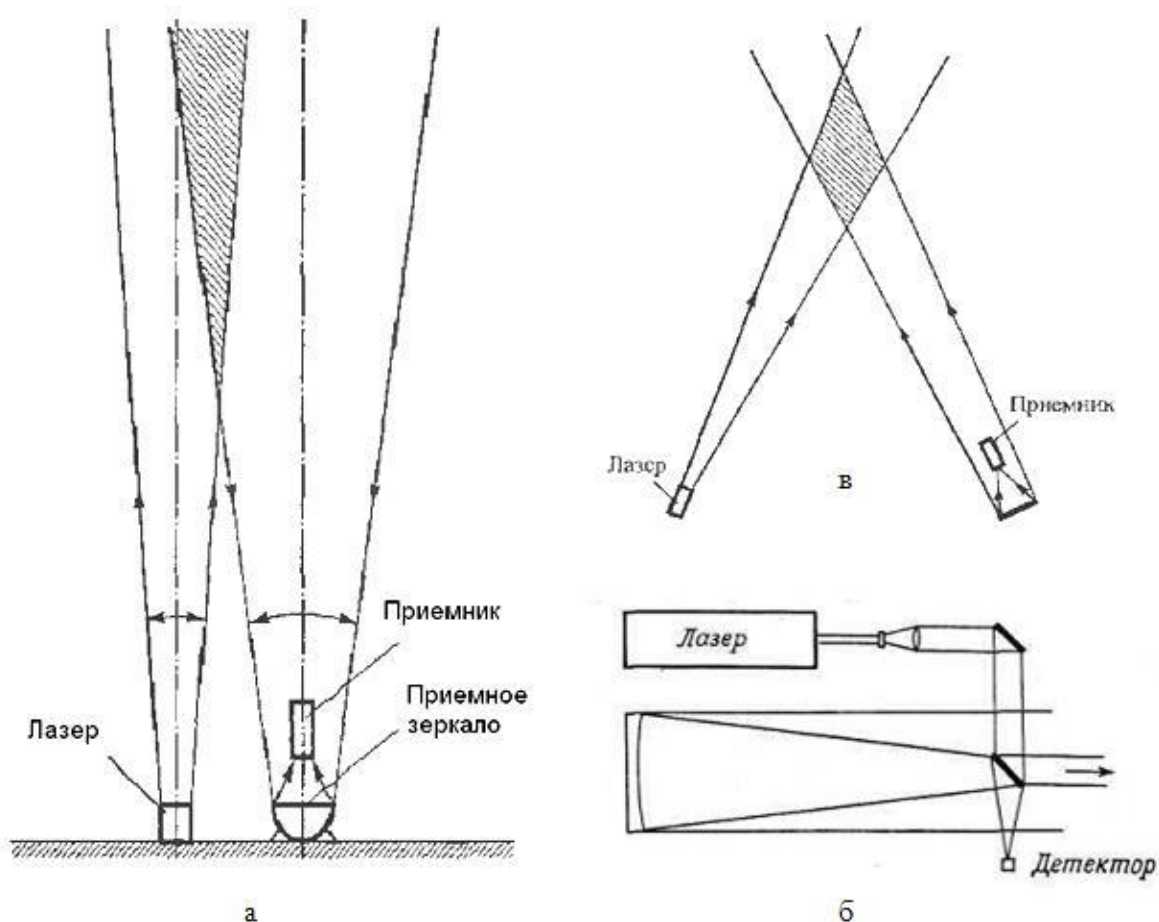


Рисунок 3.3 – Оптические схемы лидарного зондирования: а – моностатическая биаксиальная (схема с «малой базой»); б – моностатическая коаксиальная; в – бистатическая [24,25].

Моностатический лидар может иметь как коаксиальное, так и биаксиальное расположение. В коаксиальной - ось лазерного пучка совпадает с осью приемника, в то время как в биаксиальной - лазерный пучок входит в поле зрения приемника, только на некотором, заранее определенном расстоянии (ось лазерного пучка параллельна оси приемника), при этом говорят, что лидар имеет «малую базу».

Изменяя наклон оптической оси источника совместно с приемником можно менять высоту зондирования и проводить исследования вертикального профиля того или иного параметра атмосферы (для относительно медленно меняющихся по времени параметров).

3.2 Конструкция фемтосекундного лидара

Зондирование сверхкороткими импульсами, с мощностью кратно превышающей некоторое пороговое значение $P_{кр}$ (для воздуха это значение $3-4 \cdot 10^9$ Вт), влечет за собой не только проблему выбора оптимального соотношения технических характеристик лидарной системы: типа системы (использование коаксиальной или биаксиальной схемы зондирования), базы, угла поля зрения в зависимости от угловой расходимости излучения СК, но и выбор типа фоточувствительного приемника [26].

В данной работе использован телескоп конструкции Ньютона с диаметром главного зеркала 30 см и фокусным расстоянием 80 см. Меняя полевые диафрагмы диаметром 1 мм, 5 мм и 10 мм происходит пространственная фильтрация излучения суперконтинуума распространяющегося вдоль трассы. В таблице 1 представлены угловые характеристики излучения суперконтинуума и угол поля зрения телескопа образованный диафрагмами различного диаметра.

Таблица 2 – Ограничение излучения суперконтинуума полем зрения телескопа при различных полевых диафрагмах.

Диаметр диафрагмы, мм	Угол поля зрения, рад	Длина волны λ , мкм					
		0,4	0,5	0,55	0,6	0,8	1,1
		Угловая расходимость $\theta_{\text{СК}}$, рад					
		$4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
1	$1,1 \cdot 10^{-3}$	55 м	480 м	Расстояние селекции.			
5	$3,1 \cdot 10^{-3}$	177 м	Расстояние селекции.				
10	$6,25 \cdot 10^{-3}$	Все обратное рассеяние СК принимается телескопом.					

На рисунке 3.4 представлена схема селекции распространяющегося излучения суперконтинуума полем зрения телескопа, образованного полевой диафрагмой.

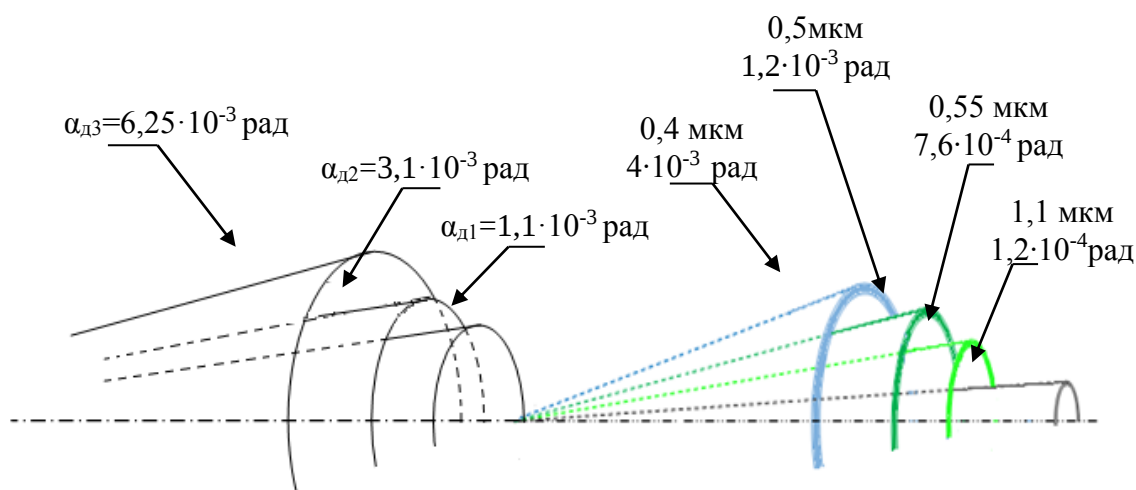


Рисунок 3.4 – Схема перекрытия конической эмиссии СК с полем зрения телескопа.

На основе этого была выбрана коаксиальная схема зондирования и установлена полевая диафрагма диаметром 5 мм, чтобы обеспечить селекцию зондирующего излучения и прием рассеянного назад широкого излучения с дальних участков трассы.

При выборе типа фотоприемника в большинстве случаев решающим фактором является длина волны излучения, на которой принимается сигнал. Используя явление генерации конической эмиссии СК, появляется возможность проводить диагностику в широком спектральном диапазоне. На основании данных работы [27] об угловой расходимости спектральных компонент СК и его ширине, был выбран ФЭУ-62 с фотокатодом Ag-O-Cs. Его широкая спектральная характеристика (рисунок 3.5) удовлетворяет спектральной ширине СК. Спектральная яркость суперконтинуума позволяет работать с ФЭУ в токовом режиме.

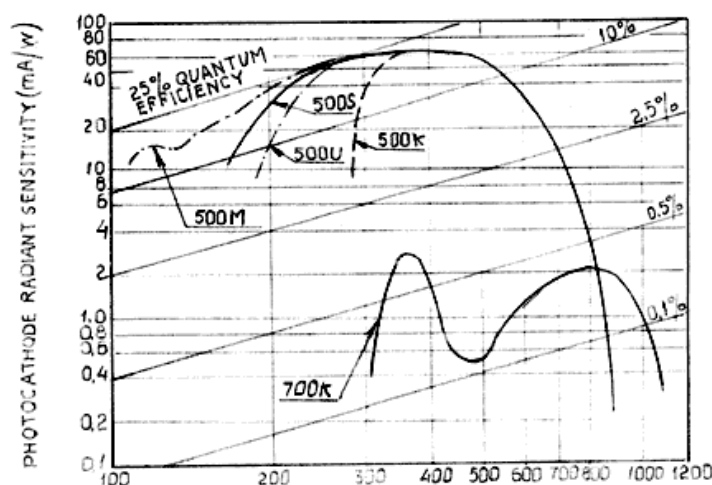


Рисунок 3.5 – Типовая спектральная характеристика фотокатода, код кривой 700K [28].

Высокая спектральная яркость СК обусловлена перекачкой энергии из основной длины волны в длины волн конической эмиссии. Однако в пучке сохраняется достаточный уровень мощности, чтобы реализовать описанные выше явления. Процессы повторяются до тех пор пока выполняется условие $P_{\text{изл}} > P_{\text{кр}}$. В результате, до снижения мощности излучения $P_{\text{изл}}$ ниже чем $P_{\text{кр}}$, реализуется протяженное плазменное образование – филамент. На филаментацию и сопровождающее ее явление генерации излучения суперконтинуума расходуется порядка 8-10% энергии исходного импульса. При этом, диаметр зоны филаментации имеет значение порядка 100 мкм. При выполнении условия $P_{\text{изл}} < P_{\text{кр}}$ импульс распространяется без нелинейного взаимодействия со средой.

В данной работе зондирование слоя облачности проводилось под углом 30° относительно горизонта. Для выделения излучения обратного рассеяния в спектре СК был установлен фильтр СЗС 23. Спектральный диапазон, в котором он работает (рисунок 3.6) практически совпадает со спектральной характеристикой ФЭУ (рисунок 3.2), что позволило регистрировать обратное рассеяние от СК на длинах волн 0,35 – 0,65 мкм и 1 – 1,1 мкм.



Рисунок 3.6 – Спектральная характеристика фильтра СЗС 23: 2 – толщина фильтра 2 мм (в работе); 5 – толщина фильтра 5 мм. Слева обозначены коэффициенты пропускания.

При проведении зондирования установленный фильтр толщиной 2 мм, полностью не пропускал рабочую (лазерную) длину волны. На приведенном ниже графике (рисунок 3.7) представлен спектр обратного рассеяния от слоя облачности.

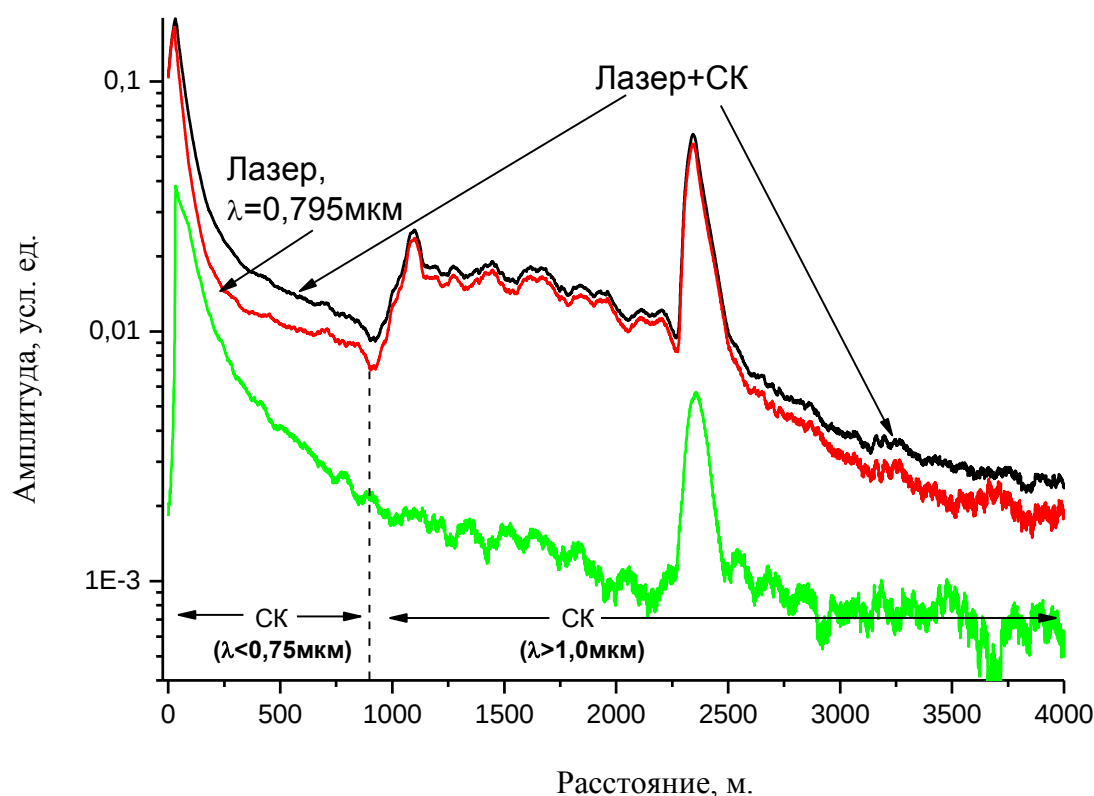


Рисунок 3.7 – Запись лидарного сигнала от слоя облачности: черный – излучение обратного рассеяния на сумме длин волн лазерная + СК; красный – обратное рассеяние на лазерной длине волны 0,8 мкм; зеленый – обратное рассеяние на длинах волн СК.

На графике представлены лидарные сигналы, сформированные суммарным излучением, длинами волн СК (в полосе пропускания фильтра). Из суммарного сигнала «Лазер+СК» был вычтен сигнал от длин волн СК и получен сигнал, сформированный основным (лазерным) излучением, который также представлен на графике.

Максимум интенсивности наблюдаемый на графике обусловлен началом филаментации, положение начальной точки филамента оценено с помощью формулы Марбургера (1.3) и приблизительно составляет 40 м от лазерной системы для следующих параметров системы $E_0=20$ мДж; $\tau_0=40$ фс; $\lambda=0,8$ мкм.

Возможность регистрации излучения обратного рассеяния одновременно во всем спектре СК предлагается в работе [26]. При этом, регистрация проводилась с использованием ПЗС (рисунок 3.8).

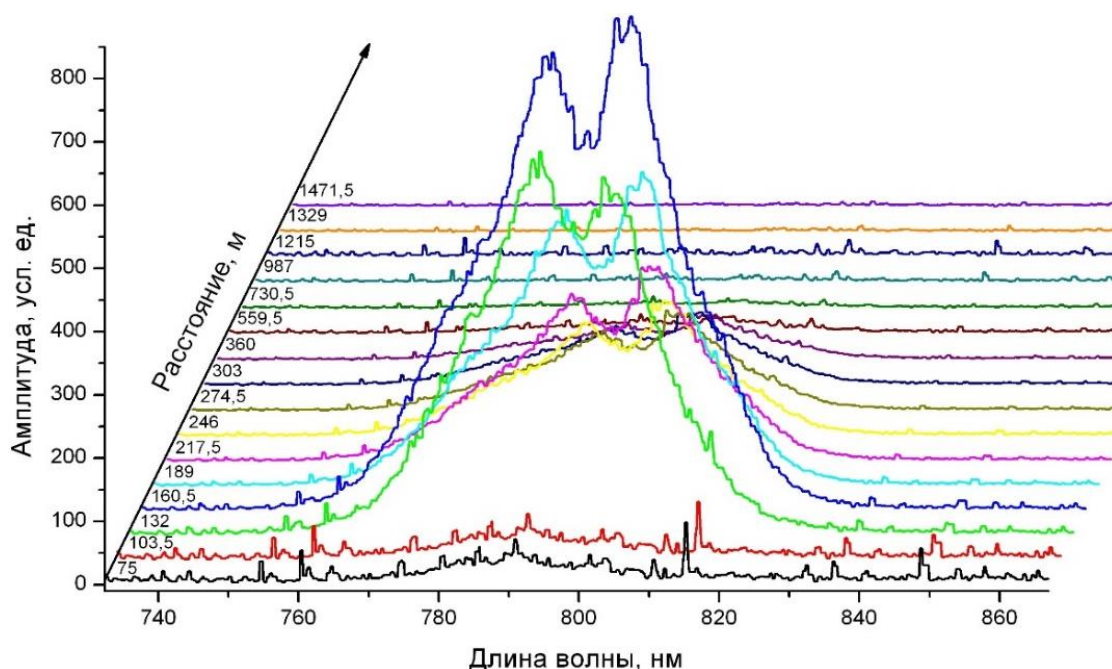


Рисунок 3.8 – Спектры излучения обратного рассеяния на длинах волн СК [22].

ПЗС позволяет осуществлять одновременный прием излучения обратного рассеяния в широком диапазоне длин волн, обеспечив тем самым регистрацию излучения на длинах волн СК.

Из рисунка видно, что начало приема обратнорассеянного излучения начинается с расстояния 132 м, а с расстояния 160,5 м лазерный луч полностью вошел в поле зрения телескопа. В работе [26] авторы отдают предпочтение биаксильной схеме лидара. Начало регистрации сигнала с расстояния 132 м оправдано исключением участка с нелинейными взаимодействиями.

Так как, характеристики излучения СК: длительность импульса, расходимость излучения совпадают с характеристиками излучения лазеров, работающих на длинах волн, совпадающих с СК, то лидары с использованием эффекта генерации СК получили название лидар «белого» света (ЛБС) [9]. В работе [29] авторы говорят о возможности использования генерации СК для комплексной диагностики окружающей среды методом лазерно-индуцированного пробоя *FS-LIBS* (получении эмиссионного спектра вещества) и диагностике *LIF* (лазерно-индуцированная флуоресценция) в спектре длин волн СК.

3.3 Схема проведения дистанционного зондирования фемтосекундным лидаром

При подготовке эксперимента по дистанционному зондированию облачности над городом Томск лидаром «белого» света были учтены рассмотренные ранее угловые,

спектральные и энергетические характеристики эффектов самовоздействия. На их основе был сконструирован лидар, блок-схема которого приведена на рисунке 3.9.

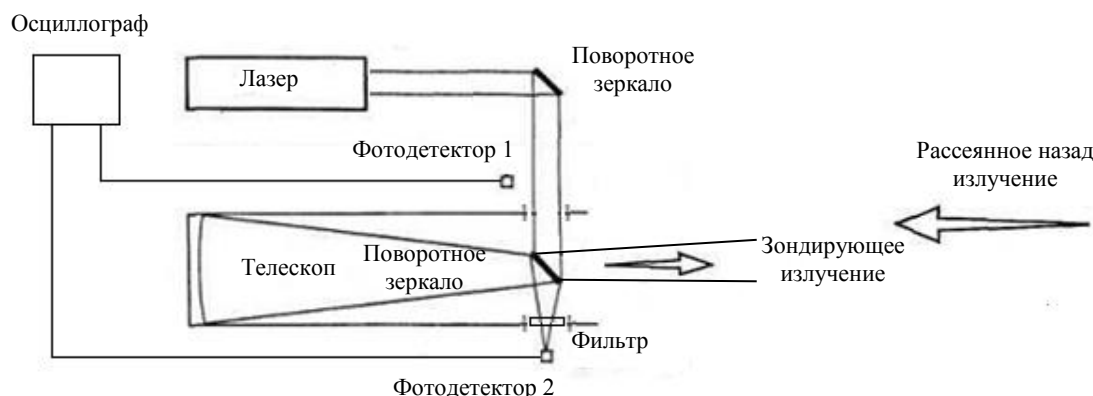


Рисунок 3.9 – Блок-схема лидара «белого» света.

В качестве источника излучения приведенного на рисунке 3.9, использована фемтосекундная лазерная система состоящая из лазера накачки регенеративного усилителя *Lotis LS-2131M*, лазера накачки многопроходового усилителя *SOLAR-LQ829*, которая предназначена для генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов длительностью 25-55 фс и энергией $(5 \div 100) \cdot 10^{-3}$ Дж на длине волны $\lambda = 800 \pm 50$ нм и частотой повторения импульса $f_{\text{пов.им}} = 10$ Гц.

Выходное излучение для передачи в атмосферу направлено через поворотное зеркало на поворотное зеркало телескопа. Телескоп системы Ньютона с фокусным расстоянием 80 см и диаметром главного зеркала 30 см. Схема зондирования коаксиальная. Выбор коаксиальной схемы зондирования обеспечил исключение участка самофокусировки, который характеризуется излучением обратного рассеяния высокой интенсивности, который может привести к порче приемной оптики.

Излучение обратного рассеяния содержит в себе не только лазерную длину волны $\lambda = 800 \pm 50$ нм, но и спектр длин волн суперконтинуума, который в антистоксовой и стоксовой части спектра относительно лазерной длины волны простирается до УФ и ИК соответственно. Для регистрации интересующих стоксового и антистоксового частей спектра, относительно основной длины волны, поставлен фильтр СЗС 23 и ФЭУ 62, спектральные характеристики, которых приведены на рисунке 3.10.

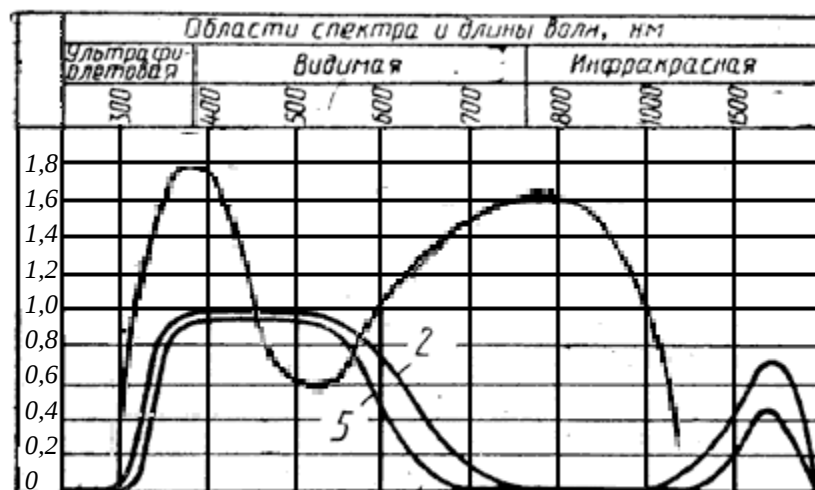


Рисунок 3.10 – Спектральные характеристики фильтра СЗС 23 и ФЭУ 62:
2 – толщина фильтра 2 мм (в работе); 5 – толщина фильтра 5 мм.

Такое сочетание фильтра и ФЭУ позволило исключить из рассмотрения обратное рассеяние на длине волны лазера и сосредоточить внимание на интересующих частях спектра, которые лежат в «окнах» прозрачности атмосферы: 0,5...0,75 и 0,95...1,06 мкм.

Перед входным окном ФЭУ установлена диафрагма диаметром 5 мм, позволяющая проводить пространственную селекцию излучения суперконтинуума, а именно излучения конической эмиссии, диапазон излучения которого находится в антистоксовой части относительно основной длины волны. Для данной полевой диафрагмы диаметром 5 мм угол поля зрения телескопа составляет $\alpha_t = 3,1 \cdot 10^{-3}$ рад, тогда как для наименьшей длины волны в антистоксовой части спектра угол расходимости составляет $\theta_{ск} = 4 \cdot 10^{-3}$ рад.

После ФЭУ усиленный сигнал поступает на осциллограф. Регистрация излучения обратного рассеяния синхронизирована с работой лазерной системы посредством установленного перед входом излучения в телескоп фотодетектора, который обеспечивает импульс запуска для осциллографа.

На рисунке 3.11 представлена запись сигнала обратно рассеяния при зондировании ЛБС, зондирование проводилось на наклонной трассе под углом 30° относительно горизонта.

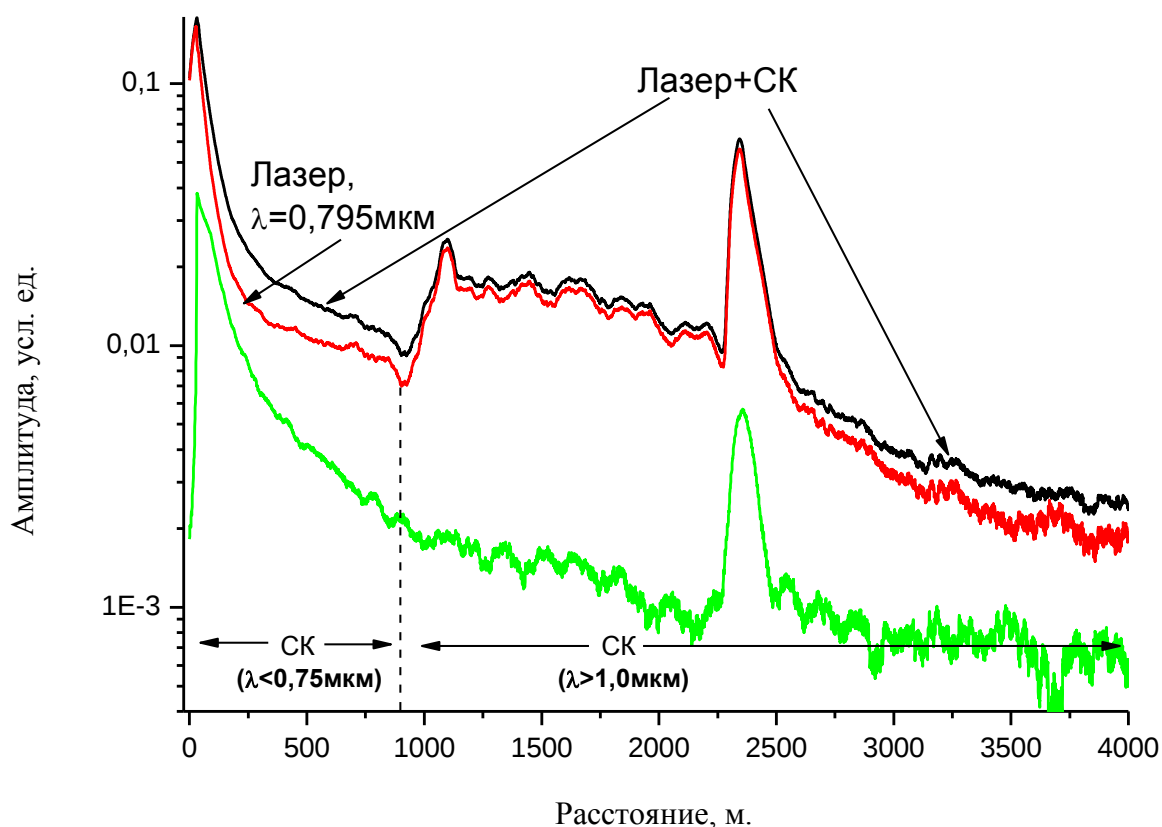


Рисунок 3.11 – Запись лидарного сигнала от слоя облачности при зондировании на наклонной трассе: черный – излучение обратного рассеяния на сумме длин волн лазерная + СК; красный – обратное рассеяние на лазерной длине волны 0,8 мкм; зеленый – обратное рассеяние на длинах волн СК.

По данным зондирования был оценен показатель ослабления вдоль трассы. Предполагаем, что на участке до 900 м спектр СК в диапазоне УФ до ИК ($0,4 \dots 1,2 \mu\text{m}$). После распространяются длины волн СК лежащие в ИК диапазоне $\lambda_{\text{СК}} > 0,75 \mu\text{m}$.

Излучение обратного рассеяния прежде чем попасть на ФЭУ прошло сквозь фильтр СЗС 23, таким образом, спектр обратного рассеяния после фильтра $0,4 \mu\text{m} \leq \lambda_{\text{СК}} < 0,75 \mu\text{m}$ до высоты 450 м и $1,0 \mu\text{m} \leq \lambda_{\text{СК}} < 1,2 \mu\text{m}$ выше 450 м.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛИДАРОМ

В общем случае УЛЗ содержит две неизвестные функции $\beta_\pi(Z)$ и $T(Z)$ и не может быть решено без каких-либо допущений и априорной информации.

За историю развития лазерного зондирования предложено множество подходов и методов, направленных на исключение неопределенности в уравнении (2.2). Множество их представлено в работе [30].

На практике для решения УЛЗ наиболее часто употребляется предположение о неизменности следующих параметров: геометрического фактора, соотношения между длительностями импульса зондирования и временем детектирования, коэффициентов рассеяния или коэффициентов поглощения, лидарного отношения вдоль трассы зондирования [16,30,31].

4.1 Решение уравнения лазерного зондирования для «обычного» лидара

Рассмотрим сначала решение УЛЗ вида (2.2). Допустим, что трасса зондирования однородна, то есть выполняется условие $\alpha_m(Z_m, \lambda) = \alpha_{m+1}(Z_{m+1}, \lambda) = \alpha'(\lambda)$, где m – целое число. Тогда интегральное пропускание примет вид $T^2(Z) = \exp(-2\alpha'(\lambda)Z)$. Также допустим, что на трассе преобладают аэрозольные частицы одного размера, тогда выполняется условие $\beta_{\pi,m}(Z_m) = \beta_{\pi,m+1}(Z_{m+1}) = \beta_\pi = \text{const}$ для любой точки трассы зондирования и, что геометрический фактор лидара $G_m(Z_m) = G_{m+1}(Z_{m+1}) = G = 1$.

Решая уравнение (2.2) методом логарифмической производной, потому что этот метод не требует информации о индикатрисе рассеяния частицы и ослаблении, выбираются участки трассы, где сигнал спадающий. Для каждого такого участка можно записать решение уравнения относительно показателя ослабления с учетом введенных допущений

$$\alpha'(\lambda) = -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(P(Z_m)Z_m^2) - \ln(P(Z_{m+1})Z_{m+1}^2)}{Z_{m+1} - Z_m} \right). \quad (4.1)$$

4.2 Решение уравнения лазерного зондирования для фемтосекундного лидара

Рассмотрим теперь этот метод решения уравнения для ЛБС. Необходимо учесть ослабление в излучения при филаментации $T_\Phi(Z) = \exp(-\int_0^Z \alpha_\Phi(Z') dZ')$. К сожалению, в данной работе подобные измерения провести не удалось, но в работе [22] его величина оценивается, как $\alpha_\Phi = 0,0077 \pm 0,0012 \text{ м}^{-1}$ для основной длины волны.

Предположим, что на длинах волн СК нет условий для возникновения нелинейных явлений, тогда применима логика и методы многочастотного зондирования атмосферы в линейном режиме [26,32]. Введем те же допущения о неизменности геометрического фактора $G_m(Z_m, \lambda_i) = G_{m+1}(Z_{m+1}, \lambda_i) = G(\lambda_i) = 1$, коэффициента обратного рассеяния $\beta_{\pi,m}(Z_m, \lambda_i) = \beta_{\pi,m+1}(Z_{m+1}, \lambda_i) = \beta_{\pi}(\lambda_i) = const$ и однородности атмосферы $\alpha_m(Z_m, \lambda_i) = \alpha_{m+1}(Z_{m+1}, \lambda_i) = \alpha'(\lambda_i)$.

Покажем, что решение уравнения лазерной локации для ЛБС методом логарифмической производной существует.

Составим уравнение ЛБС для любой точки трассы, учитывая введенные предположения

$$P(Z, \lambda_i) Z_p^2 = P_0(\lambda_i) A_0 \xi(\lambda_i) \beta_{\pi}(\lambda_i) G(\lambda_i) \frac{c\tau_{\pi}}{2} \exp(-2\alpha(\lambda_i)(Z - Z_{\phi}) - \alpha(\lambda_i)Z_{\phi}) T_{\phi}(Z). \quad (4.2)$$

Пропотенцируем выражение и выразим коэффициент ослабления $\alpha'(\lambda)$, получим

$$\alpha'(\lambda_i)(2Z - Z_{\phi}) = -\ln(P(Z, \lambda_i) Z_p^2) + \ln\left(P_0(\lambda_i) A_0 \xi(\lambda_i) \beta_{\pi}(\lambda_i) G(\lambda_i) \frac{c\tau_{\pi}}{2} T_{\phi}(Z)\right) \quad (4.3)$$

Введем переменную $\rho = (2Z - Z_{\phi})$ и проведем дифференцирование по ней

$$\frac{d}{d\rho}(\alpha'(\lambda_i)\rho) = \frac{d}{d\rho}\left(-\ln(P(Z, \lambda_i) Z_p^2) + \ln\left(P_0(\lambda_i) A_0 \xi(\lambda_i) \beta_{\pi}(\lambda_i) G(\lambda_i) \frac{c\tau_{\pi}}{2} T_{\phi}(Z)\right)\right). \quad (4.4)$$

Получим при том, что $\ln\left(P_0(\lambda_i) A_0 \xi(\lambda_i) \beta_{\pi}(\lambda_i) G(\lambda_i) \frac{c\tau_{\pi}}{2} T_{\phi}(Z)\right) = const$ следующее

$$\alpha'(\lambda_i) = \frac{d}{d\rho}(-\ln(P(Z, \lambda_i) Z_p^2)). \quad (4.5)$$

Выберем произвольные точки на трассе зондирования, где сигнал спадающий, раскроем $\rho = (2Z - Z_{\phi})$ и приведем подобные слагаемые, получим конечный ответ

$$\alpha'(\lambda_i) = -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(P(Z_m, \lambda_i) Z_{p,m}^2) - \ln(P(Z_{m+1}, \lambda_i) Z_{p,m+1}^2)}{Z_{m+1} - Z_m} \right). \quad (4.6)$$

На рисунке 4.1 представлено оценочное значение показателя ослабления для спектра длин волн СК. При расчете показателя ослабления методом логарифмической производной предполагали, что трасса зондирования однородна и, что преобладают частицы одного размера. Также ввели допущение об ослаблении, только за счет рассеяния.

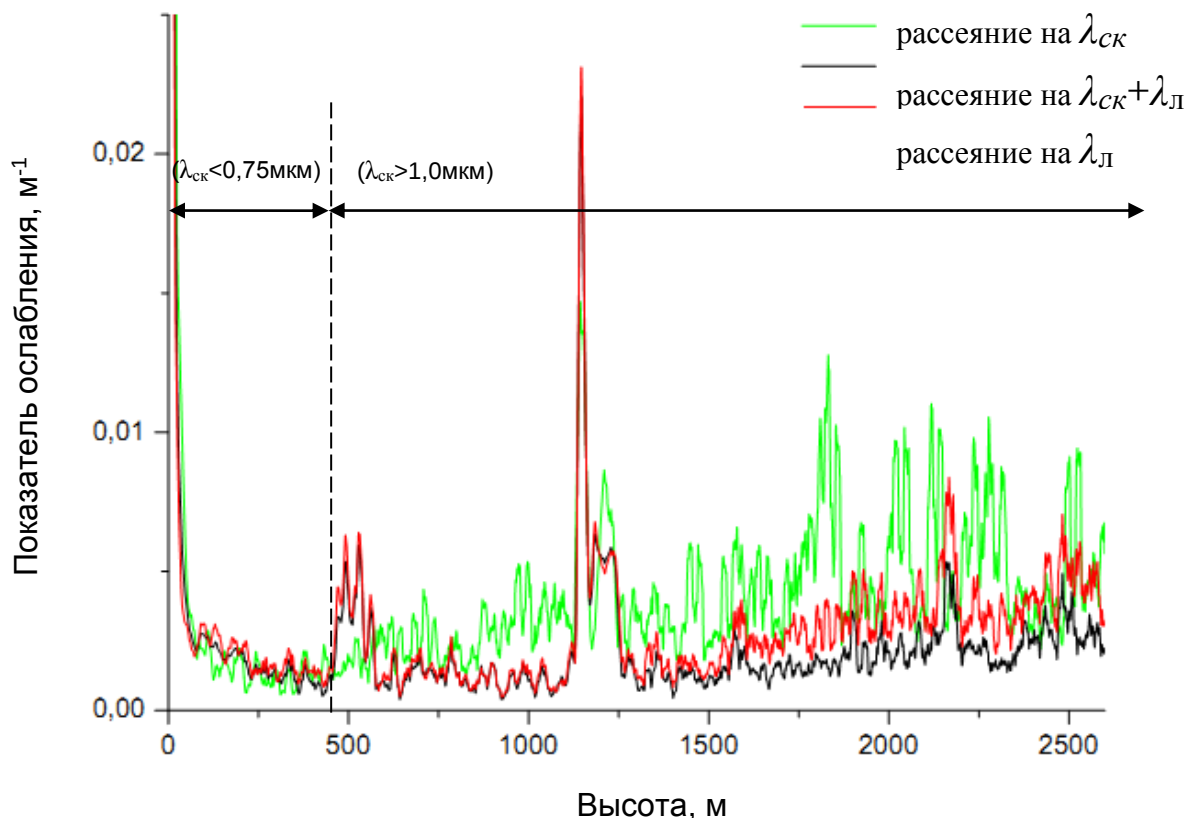


Рисунок 4.1 – Оценка показателя ослабления методом логарифмической производной при зондировании ЛБС.

Наблюдаемые на рисунке 4.1 увеличение показателя ослабления высотах 400...600 м и 1100...1250 м позволяют говорить о наличии на трассе зондирования слоев облачности ≈ 200 м и ≈ 100 м.

На первом участке 400...600 м наблюдается сильное ослабление на длинах волн $\lambda_{Л}$ (красная) и $\lambda_{СК} + \lambda_{Л}$ (черная), которое может быть интерпретировано, как рассеяние на частицах, размер которых сравним или больше указанных длин волн. Тогда, как низкое значение показателя ослабления для длин волн $\lambda_{СК} > 1,0 \text{ мкм}$ (зеленая) можно объяснить тем, что рассеяние на этих частицах происходит в большей степени в направлении вперед.

На участке 1100...1250 м происходит сильное ослабление на всех длинах волн как на $\lambda_{Л}$ (красная), так и на $\lambda_{СК} > 1,0 \text{ мкм}$ (зеленая), что может быть объяснено поглощением, на длинах волн $\lambda_{СК} > 1,0 \text{ мкм}$, потому что для этих длин волн в диапазоне от 1,0...1,3 мкм происходит поглощение парами воды.

Судя по высотному распределению показателя ослабления и протяженности слоя можно предположить, что на участке 450-600 м находилась слоистая облачность St , высота основания которой обычно составляет 0,1-0,7 км, а толщина слоя - от 0,2 до 0,8 км. На

участке 1150-1250м – слоисто-кучевая облачность Sc. Высота основания составляет 0,5-1,5 км, толщина слоя – от 0,2-0,8 км.

В таблице 3 приведены усредненные оценочные значения показателя ослабления для облачности на участках 400...600 м и 1100...1250 м при зондировании ЛБС для разных спектральных диапазонов.

Таблица 3 – Оценочные значения показателя ослабления для облачности при зондировании ЛБС.

Высота, м	Ослабление км ⁻¹			
	СЗС 23		$\lambda_{\text{СК}} + \lambda_{\text{Л}}$	$0,75 < \lambda_{\text{Л}} < 0,85 \text{ мкм}$
	$0,4 \text{ мкм} \leq \lambda_{\text{СК}} < 0,75 \text{ мкм}$	$1,0 \text{ мкм} \leq \lambda_{\text{СК}} < 1,2 \text{ мкм}$		
400-600	1,77		2,4	2,8
1100-1250		6,2	6,4	6,5

По своим оптическим характеристикам облака довольно неоднородны. Показатель ослабления света в них может меняться от точки к точке и от случая к случаю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лидарные методы зондирования без сомнения занимают ведущее место среди бесконтактных методик контроля состояния окружающей среды. Но, применяя, в качестве источника излучения, лазерные системы ультракоротких импульс, проявляется сложная зависимость свойств среды от интенсивности падающего излучения. В частности это явления самофокусировки, филаментация и генерация излучения конической эмиссии суперконтинуума.

Изменение показателя преломления среды, под действием падающего высокоинтенсивного излучения, когда $P_{\text{изл}} \approx P_{\text{кр}}$, приводит к образованию оптического волновода, по которому излучение распространяется практически без потерь. Но при $P_{\text{изл}} \gg P_{\text{кр}}$ возникает множественная филаментация в поперечном сечении пучка, в котором также могут реализоваться условия для создания множества оптических волноводов и/или источников излучения суперконтинуума.

В задачах дистанционного зондирования эти эффекты позволяют проводить многочастотный мониторинг состояния окружающей среды. Отказываясь, при этом, от нескольких лидарных систем или систем использующих перестраиваемый по частоте лазер. Одновременный мониторинг на всех длинах волн широкого спектра излучения суперконтинуума увеличивает оперативность получения данных о состоянии атмосферы перед системами, работающими на одной длине волны. Так, созданный, франко-германским научным коллективом, мобильный вариант фемтосекундного лидара «белого» света «Teramobile» позволил получить ряд уникальных результатов в плане комплексного зондирования аэрозольного и газового состава атмосферы [33].

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы: существующие модели многочастотного УЛЗ не учитывают параметры источника СК; для построения методики управления необходимо учитывать сечение пучка, энергия, длительность, длина волны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Архипова Н.И., Кульба В.В. Управление в чрезвычайных ситуациях. М.: Рос. гос. гуманитар. ун-т. 1988. 316с.
2. Ярочкин В.И. Секьюритология – наука о безопасности жизнедеятельности. – М.: Ось-89. 2000. 400с.
3. Креков Г.М., Матвиенко Г.Г. Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т.23. №10. С. 865-844.
4. Teramobile [Электронный ресурс] URL: <http://www.teramobile.org/publis.html> (дата обращения 18.04.2017).
5. Желтиков А.М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 6. С. 624-649.
6. Креков Г.М., Матвиенко Г.Г. Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т.23. № 10. С. 865-844.
7. Ахманов. С. А., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В. Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде // Успехи физических наук. 1967. Т.93. №1. С. 19-70.
8. Аскарян Г.А. Эффект самофокусировки // Успехи физических наук. 1973. Т.111. №2. С. 249-260.
9. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н. и др. Филаментация тераваттных лазерных импульсов на стометровой атмосферной трассе. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т.28. №3. С. 274-277.
10. Апексимов Д.В., Землянов А.А., Иглакова А.Н. и др. Множественная филаментация лазерных пучков различного радиуса в воздухе на трассе длиной 150м // Оптика атмосферы и океана. Нелинейные оптические явления в атмосфере. 2016. Т.29. №1. С. 51-55.
11. Marburger J.H. Self-focusing: Theory // Progress in Quantum Electronics. 1975. Vol. 4. No. 01. P. 35-110.
12. Власов С.Н., Таланов В.И. Самофокусировка волн / ИПФ РАН. Нижний Новгород, 1997. - 200с.
13. Ахманов. С. А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640с.

14. Couairon A., Mysyrowic Z.A. Femtosecond filamentation in transparent media // *Physics Reports*. 2007. Vol. 441. P. 47-189.
15. Babushkin P.A., Burnashov A.V., Iglakova A.N. and others. Some results of the propagation of the high-power terawatt femtosecond laser radiation in different media // *Proc. SPIE 9810*, International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XII, 98100K (December 15, 2015); doi:10.1117/12.2224928.
16. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. - 242 с.
17. Бабушкин П.А. Уточнение параметров лидарного уравнения при дистанционном зондировании в спектре суперконтинуума // тр. XII всероссийской конф. студенческих научно-исследовательских инкубаторов. Томск, 2015. С. 137-139.
18. Бирмонтас А., Василяускас В., Пискаркас А. и др. Дисперсионное распыление фемтосекундных световых импульсов в кристаллах, воздухе и воде // *Квантовая электроника*. 1985. Т.12. №6. С. 1191-1195.
19. Сухоруков А.П. Оптика сверхкоротких импульсов // *Соросовский образовательный журнал. Физика*. 1997. Т. 7. С. 81-86
20. Ковалева С.Ф. О возможности управления положением точки генерации суперконтинуума филаментированных фемтосекундных импульсов на трассе зондирования // Конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов: сб.тр. тр. XII всероссийской конф.- Томск, 2015.- С. 159-162.
21. Бабушкин П.А., Бурнашов А.В., Иглакова А.Н. и др. Определение характеристик распространения тераваттного фемтосекундного лазерного излучения при различных начальных условиях. // *Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике: сб. ст. XX международной научно-практической конф.* - Санкт – Петербург, 2015. - С. 10-12.
22. Qi Luo, Jin Yu, S. Abbas Hosseini and others. Long-rang detection and length estimation of light filaments using extra-attenuation of terawatt femtosecond laser Pulses Propagating in air // *Applied Optics*. 2005. Vol. 44. No. 3. P. 391-397.
23. Ку-Нан Лиоу. Основы радиационных процессов в атмосфере, пер. с англ. СПб.: Гидрометеиздат, 1984. - 376с.
24. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / пер. с англ. М.: Мир, 1987. – 550с.
25. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л. и др. Оптико–электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. - 528с.

26. Букин О.А., Бабий О.А., Голик С.С. и др. Лидарное зондирование атмосферы с использованием гигаваттных лазерных импульсов фемтосекундной длительности // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 6. С. 563-569.
27. Иглакова А.Н., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. и др. Молекулярный и микроэлементный дистанционный анализ листьев зеленых растений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 11. С. 969-973.
28. Иглакова А.Н., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К. и др. Молекулярный и микроэлементный дистанционный анализ листьев зеленых растений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 11. С. 969-973.
29. Иглакова А.Н., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Тимофеев В.И. Комплексный метод LIF/FS-LIBS зондирования окружающей среды фемтосекундными импульсами// Распространение радиоволн (РРВ-24): сб. тр. XXIV всероссийской конф. - Иркутск, 2014 - Т.2. С. 170-172.
30. Дистанционное зондирование атмосферы / под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск: Наука, 1978. – 173с.
31. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. - 186с.
32. Faye G., Kasparian J., Sauerbrey R. Modifications to the lidar equation due to nonlinear propagation in air // Applied Physics B. 2001 Vol. 73. P. 157-163. doi: 10.1007/s003400100621.
33. Wille H., Rodrigues M., Kasparian J. Teramobile: a mobile femtosecond – terawatt laser and detection system // Eur. Phys. B. 2000. V. 71. P. 573-580.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Зав.кафедрой ОЭС и ДЗ
д-р физ.-мат. наук, профессор
_____ И.В. Самохвалов
«_____» _____ 2017 г.

ОТЧЁТ

о проведении патентно-информационных исследований по теме: **«Лазерное
зондирование атмосферы с помощью филамента»**

Исполнители:
_____ Г.Г. Фомин
_____ П.А. Бабушкин

Томск – 2017

Содержание

1. Общие данные об объекте исследований.....	45
1.1 Краткое описание исследуемого объекта, его назначение.....	45
1.2 Основная (аналитическая) часть отчета о патентных исследованиях.....	46
Заключение.....	47

1 Общие данные об объекте исследований

В последние годы всё чаще появляются статьи, посвященные лазерному зондированию атмосферы с помощью филамента. Это можно объяснить возрастающей актуальностью проблемы мониторинга и контроля атмосферы. Дистанционные методы зондирования атмосферы обладают рядом достоинств по сравнению с контактными методами: оперативность получения данных, возможность получения информации на любом направлении пучка, высокое пространственное и временное разрешение.

1.1 Краткое описание исследуемого объекта, его назначение

Несмотря на полувековую историю использования лидаров, до сих пор не решены многие технические и методические вопросы лазерного зондирования диагностики атмосферного аэрозоля. К числу направлений, все еще нуждающихся в существенной проработке, относится и лазерное зондирование оптически плотных аэрозольных образований (облака, туманы и т.п.) Это объясняется тем, что лидарный сигнал от таких образований обусловлен не только однократным, но и многократным рассеянием, которое существенно влияет на величину интенсивности и состояние поляризации принимаемого излучения.

При решении задач мониторинга окружающей среды все большее внимание уделяется дистанционным методам, особенно методу лазерного зондирования. Развитие лазерной техники позволило получать длительности импульсов порядка десятков фемтосекунд и начальной энергией десятки и сотни миллиджоулей, что обеспечивает большую начальную мощность излучения. В современных лидарах, реализующих метод дистанционного лазерного зондирования, используются мощные, тераваттного уровня, лазерные системы.

Специфической особенностью дистанционного зондирования атмосферы с использованием фемтосекундных лазеров является использование нелинейных эффектов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, таких как филаментация лазерного излучения и генерация конической эмиссии суперконтинуума (СК). Перспективы развития метода дистанционной диагностики среды на основе нелинейных эффектов были впервые подтверждены Франко-Германской группой «Teramobile». Развиваются методы зондирования с использованием мощных фемтосекундных систем и в России. Использование уникальных качеств вторичного широкополосного импульсного излучения СК позволяет применить хорошо развитые методы многочастотного зондирования, отказавшись от эксплуатации громоздких, сложных в управлении систем.

Актуальность проблемы мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды находит свое отражение в «Плане фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года» где она занимает одну из позиций в направлении исследований наук о Земле.

Целью работы является исследование характеристик лазерного излучения фемтосекундной лидарной системы гигаваттной мощности при зондировании облачного аэрозоля «белым» светом.

Работа имеет выраженную практическую направленность в области дистанционного лазерного зондирования окружающей среды.

1.2 Основная (аналитическая) часть отчета о патентных исследованиях

При проведении данных исследований, прежде всего, стояла задача определить – ориентировочно – уровень новизны исследуемой разработки. Одновременно необходимо было определить организации (фирмы), занимающиеся разработками в области генерации оптических вихрей.

Для решения поставленных задач были отобраны патенты РФ, США и ЕПВ (Европейское патентное ведомство), относящиеся к объекту исследования. Глубина поиска определялась сроком 15 лет, т. к. это связано с интенсивным развитием лазерных технологий и быстродействия ЭВМ.

Анализ распределения отобранных патентов по годам и по заявителям показал (таблица В.6.1 - Патентная документация), что за указанный в Регламенте период по данной тематике в Российское патентное ведомство было подано 4 заявки на выдачу охранных документов на объекты промышленной собственности и по всем получены соответствующие документы – 2 заявок на изобретения и 2 описания изобретения к патенту. При этом подавали заявки на выдачу охранных документов (патенты, свидетельства) всего 2 заявителя из России.

Анализ распределения отобранных патентов по годам и по заявителям показал, что за указанный в Регламенте период по данной тематике в Российское патентное ведомство не было подано заявок на выдачу охранных документов на объекты промышленной собственности.

Анализ распределения отобранных патентов по годам и по заявителям показал, что за указанный в Регламенте период по данной тематике в Европейское патентное ведомство было подано 5 заявок на выдачу охранных документов на объекты промышленной собственности и по всем получены соответствующие документы. При этом подавали заявки на выдачу охранных документов (патенты, свидетельства) 4 заявителя из Канады.

Анализ распределения отобранных патентов по годам и по заявителям показал, что за указанный в Регламенте период по данной тематике в Американское патентное ведомство была подана 2 заявки на выдачу охранных документов на объекты промышленной собственности и по всем получены соответствующие документы. При этом подавали заявки на выдачу охранных документов (патенты, свидетельства) 2 заявителя из Канады и США.

При этом анализ распределения патентов по годам и странам показал, что наиболее активной страной, регистрирующей патенты, является Канада,

в выборке за 15 лет было найдено 4 патента по теме лазерного зондирования атмосферы с помощью филамента (по ключевым словам “laser”, “remotesensing”, “filament”, “filamentation”, “radiation”). Так же из анализа следует, что наиболее интересными для дальнейшего исследования являются патенты Американской фирмы APPLIEDPHOTONICSWORLDWIDEIN и Китайской фирмы UNIVERSITELAVAL, потому что они регистрировали свои патенты в Европейском патентном ведомстве.

В целом особой динамики развития данной темы не наблюдается.

Исследования на патентную чистоту и технический уровень не проводились.

Наряду с проведением патентного поиска производился мониторинг отчётов о научных работах организаций (фирм), занимающихся разработками в области лазерного зондирования атмосферы. Данные по этой активности представлены в таблице В.6.4. А

Мониторинг патентной активности организаций (фирм), занимающихся данной тематикой представлены в таблице В.6.1.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено следующее:

3.1. Решение, которое содержит исследуемый объект – лидарный комплекс, позволяющий проводить диагностику атмосферы с помощью филамента не опубликовано в патентных фондах Российской Федерации. Однако базе патентного ведомства Европы и США патент на данное изобретение.

3.2. Фирм, специализирующихся на разработках в сфере лидарных исследований найдено не было.

3.3. В Российской Федерации нет патентов, лидарный комплекс, позволяющий проводить диагностику атмосферы с помощью филамента. Из этого можно сделать вывод, что при выводе на рынок данного комплекса, он не будет иметь конкурентов.

По проведенному анализу представленных данных можно сделать вывод, что на сегодняшний день ведется низкая активность патентования в области лидарных исследований. Однако, данная область является перспективной и в ней очень активно ведутся исследования, что говорит о её востребованности в будущем. Это позволяет сделать вывод о целесообразности патентования лидарного комплекса для диагностики атмосферы с помощью филамента.

“ Утверждаю “

Директор _____

(Подпись) (Ф.И.О.)

“ “ 201__ г.

М.П.

ЗАДАНИЕ № _____
на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы) Лазерное зондирование атмосферы с помощью филамента

Шифр работы (темы) _____

Этап работы _____ Сроки его выполнения _____
(при необходимости)

Задачи патентных исследований Определение уровня новизны, патентной ситуации и выявление фирм - конкурентов

Календарный план

Виды патено-информационных исследований	Исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения исследований (Начало-окончание)	Отчётные документы
1	2	3	4
1. Отбор патентной информации по фондам РФ	Бабушкин П.А.	05.11 - 10.12. 2017 г	Таблица В 6.1
2. Отбор патентной информации по фондам США	Бабушкин П.А.	05.11 - 10.12. 2017 г	Таблица В 6.2
3. Отбор патентной информации по фондам ЕПВ	Бабушкин П.А.	05.11 - 10.12. 2017 г	Таблица В 6.4

Виды патено-информационных исследований	Исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения исследований (Начало- окончание)	Отчётные документы
1	2	3	4
4. Отбор непатентной информации по Интернету	Бабушкин П.А.	05.11 - 10.12. 2017 г	
5. Анализ отобранной патентной и непатентной информации	Бабушкин П.А.	10.12.2017 - 26.12.2017 г.	

Руководитель патентного
подразделения

_____ 201__ г.
(подпись)

_____ (Ф.И.О.)

“ ”

Исполнитель работ

_____ 201__ г.

“ ”

РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА № ____

дата составления регламента _____

Наименование работы (темы) Лазерное зондирование атмосферы с помощью филамента

Шифр работы (темы) _____ Этап работы НИРМ

Номер и дата утверждения задания _____

Цель поиска информации Определение уровня новизны, патентной ситуации и выявление фирм - конкурентов

Обоснование регламента поиска Поиск патентной информации проводится с ретроспективой 10 лет и по странам РФ, США и ЕПВ. Учитывая, что патентная база данных охватывает более 30 стран, а РФ и США являются ведущими в техническом развитии странами, такой поиск даст вполне достоверную информацию об уровне новизны разработки и о сложившейся патентной ситуации в отношении этой же разработки.. Для предварительного определения сложившейся на рынке РФ ситуации и выявления действующих на нём фирм информации, содержащейся в Интернет будет достаточно

Предмет поиска	Страна поиска	Источники информации									
		Патентные		НТИ		Конъюнктур -ные		Другие		Ретро спект ивнос ть	Наименование информацион - ной базы (фонда)
		Наименование	Классификационные рубрики	Наименование	Рубрики УДК и др.	Наименование	Код товара ГС, СМТК БТН	Наименование	Классификационные индексы		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Комплекс дистанционного зондирования микрофизических и микроструктурных параметров облачного аэрозоля фемтосекундным лазерным излучением.	Российская Федерация США Страны Европы	Рефераты и полные описания	G01S17 G02B23							Патентная информация – 10 лет. Конъюнктурная информация – по состоянию на 2017 г.	1. Удалённые патентные базы данных РФ, США, ЕПВ. 2. Непотентная информация

Руководитель

Подразделения – исполнителя работы

(личная подпись/расшифровка подписи)

дата

Руководитель патентного
Подразделения

личная подпись/расшифровка подписи

дата

ФОРМА ОТЧЕТА О ПОИСКЕ

В.1 Поиск проведен в соответствии с заданием _____
 (должность и фамилия ответственного руководителя работы)
 № _____ от _____ и Регламентом поиска № _____ от _____

В.2 Этап работы _____

(при необходимости)

В.3 Начало поиска _____ Окончание поиска _____

В.4 Сведения о выполнении регламента поиска (указывают степень выполнения регламента поиска, отступления от требований регламента, причины этих отступлений)

В.5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа

Таблица В.6.1 - Патентная документация

Предмет поиска (объект исследований, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет, дата публикации	Название изобретения (полезной модели, промышленного образца)	Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)
1	2	3	4	5
Лазерное зондирование спомощью филамента	CACA2883420 (A1) Classification International:	Chin see leang; Universite Laval	Method for remote sensing of Pollutant moleculesin a	

Продолжение таблицы В.6.1

Предмет поиска (объект исследований, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет, дата публикации	Название изобретения (полезной модели, промышленного образца)	Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)
1	2	3	4	5
	G01N21/64; (IPC1-7): G01N21/64	<i>APPL</i>ication Number: US20030682365 20031010 <i>Priority</i> Number(S): US20020417648<i>P</i> 20021011	transParent medium using ultra-short intenselasers	
	CA; CA2883420 (A1) Classification International: G01S7/481; G02B23/02; H02J17/00	Her majesty the queen in right of canada as rePresented by the Minister of the dePt of nat defence [ca] <i>APPL</i>ication Number: CA20122883420 20120910 <i>Priority</i> Number(S): WO2012CA50626 20120910	TelescoPic control of high Power laser ProPagation	

Продолжение таблицы В.6.1

Предмет поиска (объект исследований, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет, дата публикации	Название изобретения (полезной модели, промышленного образца)	Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)
1	2	3	4	5
	CA CA2772562 (A1) Classification international: G02F1/365; G02F1/377; H0 1S3/10	Inst Nat Rech Scient Inrs [CA]; Minister nat defence [CA] Application number: CA20122772562 20120323 Priority number(s): US201161466580P 20110323	System and method for agile remote generation of a broadband tunable short-Pulse emission	

Окончание таблицы В.6.1

Предмет поиска (объект исследований, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет, дата публикации	Название изобретения (полезной модели, промышленного образца)	Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)
1	2	3	4	5
	US US7391557 (B1) Classification international: G01B9/02; H01S3/00	Bruch Reinhard [us]; Gietl Jutta [us] Application number: US20040809932 20040326 Priority number(s): US20040809932 20040326 ; US20030458757P 20030328	Mobile terawatt femtosecond laser system (mtfls) for long range spectral sensing and identification of bioaerosols and chemical agents in the atmosphere	US US7391557 (B1) Classification international: G01B9/02; H01S3/00
	US 12/602,245 Classification international: G01J 3/00 (20060101); G01J 3/40 (20060101)	Kasparian; Jerome (Collonges Sous Saleve, FR), Wolf; Jean-Pierre (Geneva, FR) Application number: US 20100283992 A1 Priority number(s): WO2008/152286	Method of optical teledetection of compounds in a medium	US 12/602,245 Classification international: G01J 3/00 (20060101); G01J 3/40 (20060101)

Таблица В.6.2 - Научно-техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчёты о научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма - держатель технической документации	Год, место и орган издания (утверждения, депонирования источника)
1	2	3	4
	Filamentation “remote” sensing of chemical and biological agents/Pollutants using only one femtosecond laser source	Chin S. L. et al.	APPLIED Physics B. – 2009. – Т. 95. – №. 1. – С. 1-12. Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – №. 7.
	White-light filaments for atmospheric analysis	Kasparian J. et al.	Science. – 2003. – Т. 301. – №. 5629. – С. 61-64.
	Femtosecond laser filamentation for atmospheric sensing	Xu H. L., Chin S. L.	Sensors. – 2010. – Т. 11. – №. 1. – С. 32-53
	White-light filaments for multi-parameter analysis of cloud microphysics	Bourayou R. et al..	JOSAB. – 2005. – Т. 22. – №. 2. – С. 369-377.
	Мобильные многоволновые лидарные комплексы	Борейшо А. С. и др.	Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – №. 12. – С. 1167-1178.
	Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses	Rairoux P. et al.	APPLIED Physics B. – 2000
	Комплексный lif/fs-libs метод зондирования окружающей среды фемтосекундными импульсами	Иглакова А. Н. и др.	Статья в Интернете – 2015.
	Влияние параметров фемтосекундного лазерного импульса на филаментацию в атмосфере	Фёдоров В. Ю..	Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04. 21.
	Локализация плазменного канала при множественной филаментации в воздухе	Панов, Н. А., Косарева, О. Г., Кандидов, В. П., Акозбек, Н., Скалора, М., и Чин, С. Л.	Квантовая электроника, 37(12), 1153-1158.

Окончание таблицы В.6.2.

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма - держатель технической документации	Год, место и орган издания (утвержде- ния, депонирования источника)
1	2	3	4
	Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и ее приложения в атмосферной оптике.	Кандидов, В. П., Шленов, С. А., Силаева, Е. П., и Дергачев, А. А.	Оптика атмосферы и океана, 23(10), 873- 884.
	Зондирование атмосферы фемтосекундными импульсами.	Матвиенко, Г. Г., Ошлаков, В. К., Степанов, А. Н., Голик, С. С., & Шмирко, К. А.	Статья в Интернете – 2015.
	The influence of laser focusing on the intensity of sPectral lines in femtosecond laser-induced breakdown sPectroscoPy of liquids.	Golik, S. S., Ilyin, A. A., Kolesnikov, A. V., Babiу, M. Y., Kul'chin, Y. N., & Bukin, O. A.	Technical Physics Letters, 39(8), 702-704.

Таблица В.6.4. А. - Количество опубликованных охранных документов по годам (изобретательская активность)

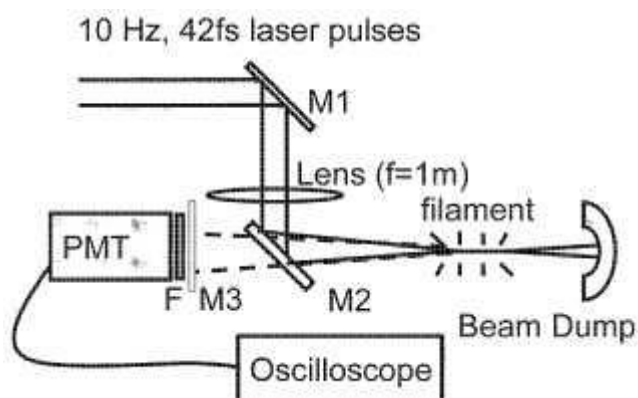
Название фирмы	Страна подачи заявки	Количество патентов, опубликованных заявок по годам подачи заявки (исключая патенты-аналоги)										
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SHANGHAI INST OPTICS & FINE ME	CN					1			1			1
HOSSEINI S ABBAS [CA]	CA						1					
HERMAN PETER R [CA]	CA							1				
INST NAT RECH SCIENT INRS [CA] CA MINISTER NAT DEFENCE [CA]	CA								1			
HER MAJESTY THE QUEEN IN RIGHT OF CANADA AS REPRESENTED BY THE MINISTER OF THE DEPT OF NAT DEFENCE [CA]	US				1							
APPLIED PHOTONICS WORLDWIDE IN [US]	CA	1										
UNIVERSITE LAVAL												

РЕФЕРАТЫ НАЙДЕННЫХ ПАТЕНТОВ ПО ТЕМАТИКЕ «ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ПОМОЩЬЮ ФИЛАМЕНТА»

METHOD FOR REMOTE SENSING OF POLLUTANT MOLECULES IN A TRANSPARENT MEDIUM USING ULTRA-SHORT INTENSE LASERS

Page bookmark	US2004135998 (A1) - Method for remote sensing of pollutant molecules in a transparent medium using ultra-short intense lasers
Inventor(s):	CHIN SEE LEANG [CA] ±
Applicant(s):	CHIN SEE LEANG, ; UNIVERSITE LAVAL
Classification:	- <u>G01N21/64</u> ; (IPC1-7): <u>G01N21/64</u> internatio nal: - cooperativ <u>G01N21/6402</u> e:
Application number:	US20030682365 20031010
Priority number(s):	US20030682365 20031010 ; US20020417648P 20021011
Also published as:	US7184143 (B2)

Abstract of US2004135998 (A1)



said molecule.

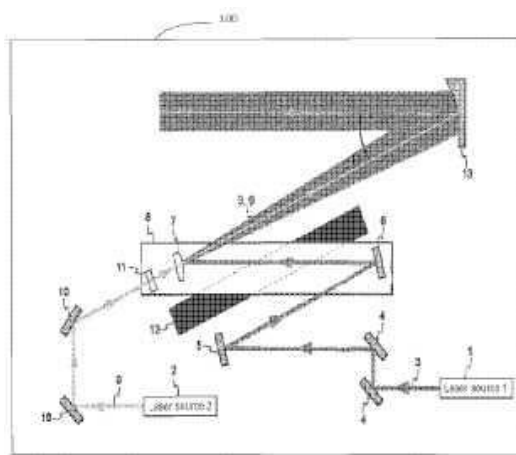
There is described a method for identifying at least one molecule in a substantially transparent medium, the method comprising: transmitting high-power, ultra-short laser pulses into the medium so as to generate filaments in which a spontaneous fluorescence signal propagating along an axis of the filament is amplified by stimulated emission; detecting the amplified spontaneous fluorescence signal; and analyzing the fluorescence signal to identify

2. TELESCOPIC CONTROL OF HIGH POWER LASER PROPAGATION

Page bookmark	CA2883420 (A1) - TELESCOPIC CONTROL OF HIGH POWER LASER PROPAGATION
Inventor(s):	THEBERGE FRANCIS [CA]; DUBOIS JACQUES [CA]; CHATEAUNEUF MARC [CA] ±
Applicant(s):	HER MAJESTY THE QUEEN IN RIGHT OF CANADA AS REPRESENTED BY THE MINISTER OF THE DEPT OF NAT DEFENCE [CA] ±
Classification:	- <u>G01S7/481; G02B23/02; H02J17/00</u> international: - cooperative: <u>G02B23/06; H02J17/00; G01S7/4815</u>
Application number:	CA20122883420 20120910
Priority number(s):	WO2012CA50626 20120910
Also published as:	WO2014036628 (A1) EP2893386 (A1)

Abstract of CA2883420 (A1)

The present invention provides a reflective telescopic system, to control the generation of filamentation of ultrashort and intense laser pulses that includes: a flat mirror, an adaptive reflective mirror, a dichroic convex mirror, an off-axis parabolic mirror, and a first laser source. The convex mirror and the adaptive reflective mirror are mounted on an independent breadboard and set on a translation stage. The propagation axis of the laser beam reflected by the mirror should correspond to the off-axis of the parabolic mirror. The parabolic mirror reflects the beam at a specific angle. Finally, the propagation axis between the dichroic convex mirror and the off-axis parabolic mirror, the propagation axis between the flat mirror and the adaptive reflective mirror, and the axis of the translation stage should be substantially parallel to each other. The present invention also contemplates the boresighting of a weak laser beam from a second laser source.



3. SYSTEM AND METHOD FOR AGILE REMOTE GENERATION OF A BROADBAND TUNABLE SHORT-PULSE EMISSION

Page bookmark	CA2772562 (A1) - SYSTEM AND METHOD FOR AGILE REMOTE GENERATION OF A BROADBAND TUNABLE SHORT-PULSE EMISSION
Inventor(s):	PAYEUR STEPHANE [CA]; LASSONDE PHILIPPE [CA]; KIEFFER JEAN-CLAUDE [CA]; THEBERGE FRANCIS [CA]; CHATEAUNEUF MARC [CA]; DUBOIS JACQUES [CA] ±
Applicant(s):	INST NAT RECH SCIENT INRS [CA]; CA MINISTER NAT DEFENCE [CA] ±
Classification:	- international: G02F1/365 ; G02F1/377 ; H01S3/10 - cooperative: G02F1/3511 ; H01S3/0057 ; H01S3/0078 ; G01N21/3581 ; G02F2001/3528 ; H01S3/00
Application number:	CA20122772562 20120323
Priority number(s):	US201161466580P 20110323
Also published as:	US2012243564 (A1)

Abstract of CA2772562 (A1)

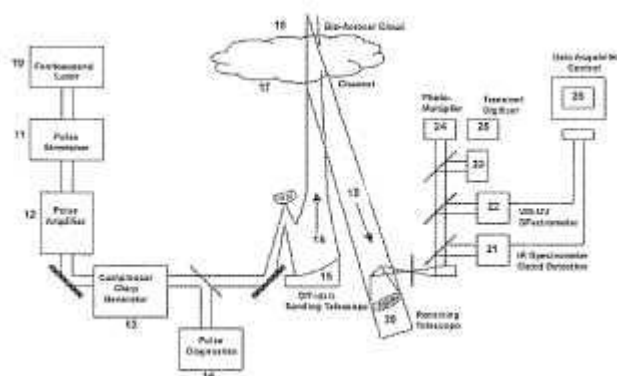
A method comprising using a pulse shaper in the spectral domain to generate multiple-color pulses directly at the output of the laser amplifier. The delay can thus be controlled directly in the spectral domain and there is no need for an optical delay line. The method allows reducing the number of optical components and insures insensitivity to alignment, vibrations and turbulence on long distance propagation and filamentation, particularly in air. The method allows programmable and tunable interaction, since the pulse shaper is able to control the laser spectral amplitude and phase.

4.MOBILE TERAWATT FEMTOSECOND LASER SYSTEM (MTFLS) FOR LONG RANGE SPECTRAL SENSING AND IDENTIFICATION OF BIOAEROSOLS AND CHEMICAL AGENTS IN THE ATMOSPHERE

Page bookmark	US7391557 (B1) - MOBILE TERAWATT FEMTOSECOND LASER SYSTEM (MTFLS) FOR LONG RANGE SPECTRAL SENSING AND IDENTIFICATION OF BIOAEROSOLS AND CHEMICAL AGENTS IN THE ATMOSPHERE
Inventor(s):	BRUCH REINHARD [US]; GIETL JUTTA [US] ±
Applicant(s):	APPLIED PHOTONICS WORLDWIDE IN [US] ±
Classification:	- <u>G01B9/02</u>; <u>H01S3/00</u> intern ational - <u>G01J11/00</u>; <u>G01J3/10</u>; <u>G01J3/36</u>; <u>G01J3/42</u>; <u>G01J3/44</u>; <u>G01N21/636</u>; <u>G01N2021/1793</u>; <u>G01N2021/6417</u>; <u>G01N21/65</u>; <u>G01N2201/0697</u>
Application number:	US20040809932 20040326
Priority number(s):	US20040809932 20040326 ; <u>US20030458757P</u> 20030328
Also published as:	<u>US2008180655 (A1)</u>

Abstract of US7391557 (B1)

The present invention relates to a system for detection and identification of airborne biological, chemical and/or nuclear threats such as toxins, spores, bacteria, and viruses in real time at distances from a few meters to several kilometers. Compact femtosecond terawatt laser technology is combined with spectroscopic and mathematical methods for spectral sensing of airborne warfare agents such as bio-aerosols. Trigger sensors and standoff devices based on mobile terawatt femtosecond laser systems are provided that may be placed at strategic monitoring locations. Furthermore, the invention relates to the propagation of airborne ultra-short, ultra-intense laser pulses giving rise to plasma channels (filamentation) producing white light supercontinuum ranging from the ultraviolet (UV), visible (VIS), near infra-red (NE) and middle infra-red (MIR).; According to this invention, the supercontinuum can be directly produced in a particle cloud and hence is uniquely suitable for multi-spectral long-range atmospheric agent and radioactive isotope detection.



Уважаемый пользователь! Обращаем ваше внимание, что система «Антиплагиат» отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение.

Отчет о проверке № 1

дата загрузки: 12.06.2017 10:34:16

пользователь: pavelbabushkin.pb@gmail.com / ID: 4427944

отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»

на сайте <http://www.antiplagiat.ru>

Информация о документе

№ документа: 5

Имя исходного файла: Диссертация_Бабушкин П.А_.docx

Размер текста: 1905 кБ

Тип документа: Не указано

Символов в тексте: 89597

Слов в тексте: 10911

Число предложений: 450

Информация об отчете

Дата: Отчет от 12.06.2017 10:34:16 - Последний готовый отчет

Комментарии: не указано

Оценка оригинальности: 88.37%

Заимствования: 11.63%

Цитирование: 0%



Оригинальность: 88.37%

Заимствования: 11.63%

Цитирование: 0%

Источники

Доля в тексте	Источник	Ссылка	Дата	Найдено в
3.61%	[1] не указано	http://propat.ru	раньше 2011 года	Модуль поиска Интернет
3.61%	[2] В.И.Карнышев, А.В. Семенов, Т.Н. Пчельникова.	http://tusur.ru	раньше 2011 года	Модуль поиска Интернет
3.57%	[3] ГОСТ Р 15.011 – 96	http://misis.ru	03.10.2016	Модуль поиска Интернет

