

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535-15 535-31 621.373.8

РАСЧЕТ РАСШИРИТЕЛЯ ПУЧКА ДВУХВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ЛИДАРА

© 2012 г. Г. П. Коханенко*, канд. физ.-мат. наук; М. М. Макогон*, канд. физ.-мат. наук; Ю. Н. Пономарев*, доктор физ.-мат. наук; О. А. Рынков*; Г. В. Симонова***, канд. техн. наук

* Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск

** Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск

*** Томский государственный университет, Томск

E-mail: kokh@iao.ru, mmm@asd.iao.ru, yupon@iao.ru, lspg@iao.ru, galina_simonova@inbox.ru

Представлена конструкция и результаты абберационного расчета расширителя пучка, являющегося передатчиком двухволнового лазерного аэрозольно-флуоресцентного лидара, предназначенного для обнаружения в атмосфере загрязнений биогенного происхождения. Возможность функционирования передатчика на двух сильно отличающихся длинах волн обеспечена подбором оптических материалов, работающих в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, и совместно проведенной минимизацией сферических и хроматических аббераций. Изготовленный передатчик позволил уменьшить расходимость лазерного излучения на длинах волн 1,064 и 0,266 мкм более чем в 7 раз, обеспечив при этом работу без перефокусировки.

Ключевые слова: флуоресцентный лидар, передатчик лазерного излучения, расширитель лазерного пучка.

Коды OCIS: 010.3640, 010.3310

Поступила в редакцию 17.01.2011

Разработка и создание аппаратуры, позволяющей разрешить проблему дистанционного обнаружения источников выбросов вредных веществ в атмосферу, работающей на базе высокоэнергетической лазерной техники, является актуальной задачей. Следует отметить, что качество измерений будет зависеть от параметров лазерного пучка. При этом естественно, что лазерный пучок, выходящий в атмосферу, должен характеризоваться минимально возможной расходимостью для рабочих длин волн и высокой параллельностью этого пучка оптической визирной оси аппаратурного комплекса. Как правило, расходимость излучения даже лучших коммерческих лазеров, представленных на рынке, слишком велика для обеспечения дальности действия лидаров более сотен метров, и поэтому необходима коллимация излучения. Возможность получения требуемых

параметров зависит от расширителей лазерного пучка, которые должны разрабатываться в соответствии с техническими требованиями на лидар в целом.

Описываемый ниже расширитель лазерного пучка был разработан для оснащения мобильного аэрозольно-флуоресцентного лидара, предназначенного для оперативного обнаружения в атмосфере частиц биогенного происхождения на дальности до 4 км.

Оптическая схема двухволнового передатчика лазерного излучения флуоресцентного лидара

При расчете расширителя лазерного пучка исходными являются конкретные параметры лазерного пучка: его диаметр, угол расходимости и длина волны излучения лазера – λ . Для

различных типов лазеров угол расходимости генерируемого излучения меняется от нескольких угловых минут до нескольких градусов. Для уменьшения угла расходимости лазерных пучков лучей (для их коллимации) используют телескопические системы, представляющие собой обратные системы Галилея или Кеплера. Предпочтительнее применять обратную систему Галилея, не дающую промежуточное действительное изображение, не допустимое при использовании мощных лазеров.

В данной работе рассматривается расширитель пучка, предназначенный для коллимации излучения твердотельного импульсного лазера LS-2137/20 (ЛОТИС ТИИ, Республика Беларусь) на основе алюмоиттриевого граната, активированного неодимом, генерирующего на первой ($\lambda = 1,064$ мкм), второй ($\lambda = 0,532$ мкм) и четвертой ($\lambda = 0,266$ мкм) гармониках; все гармоники излучаются соосно. Основными в лидаре являются первая и четвертая гармоники, вторая используется для визуализации лазерного луча в атмосфере, импульсы излучения на всех длинах волн посылаются одновременно. Излучение в инфракрасной (ИК) области спектра используется для зондирования атмосферного аэрозоля любой природы, а излучение в ультрафиолетовой (УФ) области – для возбуждения флуоресценции аэрозоля только биогенного происхождения. Работа оптической системы на сильно различающихся длинах волн накладывает дополнительное условие для разработки оптической схемы – это минимизация не только геометрических, но и хроматических aberrаций, а также оптимизация параметров оптических компонентов, позволяющая работать без перефокусировки расширителя на двух длинах волн.

Целью работы являлась разработка лидарного передатчика, позволяющего обеспечить высокое качество выходящего в атмосферу лазерного пучка путем формирования пучка большей апертуры с минимизацией aberrаций при одновременной работе системы на двух длинах волн в УФ и ИК областях спектра без ее перефокусировки. Передатчик должен обеспечивать возможность юстировки выходящего лазерного пучка лучей параллельно оптической визирной оси системы аппаратного комплекса флуоресцентного лидара.

Коэффициент расширения пучка зависит от расходимости лазерного излучения, поля зрения приемного телескопа лидара и допустимой из энергетических соображений экраниров-

ки главного зеркала телескопа компонентами передатчика. Исходя из желаемых характеристик аэрозольно-флуоресцентного лидара, оптимальное значение коэффициента расширения должно лежать в интервале от 7 до 8.

Схема передатчика показана на рис. 1. Расширитель представляет собой телескопическую систему Галилея и состоит из отрицательного компонента 2, выполненного из плавленного кварца и несклеенного ахроматического объектива 3, первый компонент которого изготовлен из CaF_2 , а второй – из кварца. Для видимой области составлены таблицы ахроматических пар материалов, но для работы одновременно в УФ и ИК областях спектра таких данных нет. Поэтому разработчики, обладая базой данных оптических материалов для этих областей, определили наилучшее их сочетание. Сделанный таким образом выбор оптического материала обеспечил как возможность ахроматизации оптической схемы расширителя, т. е. компенсации хроматических aberrаций для двух длин волн, так и высокий коэффициент пропускания в рабочих диапазонах длин волн. Кварц и кристалл CaF_2 являются нелюминесцирующими, радиационно-оптически устойчивыми материалами, прозрачными в оптической области спектра. Поверхности всех линз расширителя и катетные грани призм просветлены для рабочих длин волн.

Квазипараллельный пучок излучения лазера выводится на ось приемного телескопа и затем в атмосферу через систему двух юстируемых призм 4–5, позволяющих проводить подъюстировку оптической оси передатчика лазерного излучения к оптической визирной оси аппаратного комплекса флуоресцентного лидара. Многослойные диэлектрические покрытия гипотенузных граней призм имеют коэффициент отражения более 99,5%.

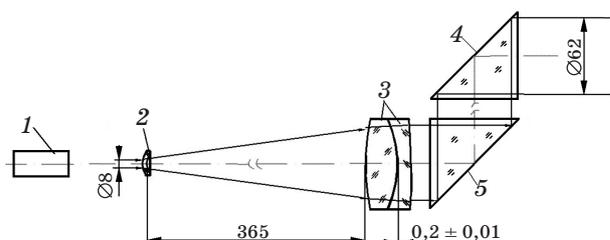


Рис. 1. Оптическая схема двухволнового передатчика лазерного излучения флуоресцентного лидара. 1 – YAG:Nd-лазер, 2, 3 – расширители лазерного пучка, 4, 5 – юстируемые призмы.

Аберрационный анализ

Существуют два совместно действующих фактора, которые влияют на формирование волнового фронта и качество изображения оптической системы – дифракция и аберрации. Формирование изображения вполне корректно описывается с позиций геометрической оптики без привлечения теории дифракции. Если аберрации велики и дифракция теряется на фоне геометрических аберраций, то такие системы называются геометрически-ограниченными. Если аберрации малы и преобладает дифракция, то такие системы называются дифракционно-ограниченными. В классической оптике [1] наименьший размер кружка рассеяния может быть получен в случае работы “идеальной” оптической системы, у которой отсутствуют все виды аберраций и конечное качество на ее выходе определяется только дифракционными явлениями. Качество дифракционно-ограниченных систем оценивается по критериям Рэля и Штреля [1].

Трудоемкая задача оптимизации параметров оптических элементов передающей схемы лидача и минимизация аберраций для двух длин волн была решена с помощью прикладного пакета программ ZEMAX, причем минимизация аберраций и ахроматизация проводились одновременно при варьировании коэффициента расширения. Анализ аберраций расширителя лазерного пучка проведен с использованием модели параксиальной линзы [2], позволяющей сфокусировать коллимированный пучок, не внося аберраций, и затем рассчитать диаметр кружка рассеяния. Расчетные для оптимального по аберрациям и остаточному хроматизму расширителя диаметры кружка рассеяния (рис. 2) 4,68 мкм и 1,34 мкм для $\lambda = 1,064$ мкм и $\lambda = 0,266$ мкм соизмеримы с диаметрами дифракционного кружка, кружка Эйри, – 4,96 мкм и 1,19 мкм, что свидетельствует о том, что рассматриваемая система является практически безаберрационной (дифракционно-ограниченной).

При этом число Штреля для разработанной системы составляет 0,87 для $\lambda = 1,064$ мкм и 0,83 для $\lambda = 0,266$ мкм, а мера волновой аберрации (рис. 3) соизмерима с $\lambda/4$ (критерий Релея) [3].

Помимо монохроматических аберраций в оптической схеме расширителя лазерного пучка скорректированы хроматические аберрации. Задача ахроматизации состоит в том,

чтобы фокальные отрезки линз не зависели от длины волны и отсутствовал сдвиг положения плоскости изображения для разных длин волн. Для решения этой задачи были выбраны оптические материалы для изготовления линз (CaF_2 и плавленый кварц) с разными коэффициентами дисперсии. На рис. 4 представлен график сдвига фокальных отрезков системы

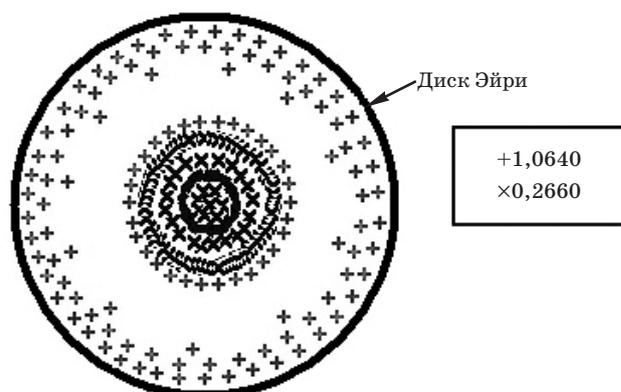


Рис. 2. Расчетный кружок рассеяния излучения, прошедшего через расширитель и сфокусированного параксиальной линзой.

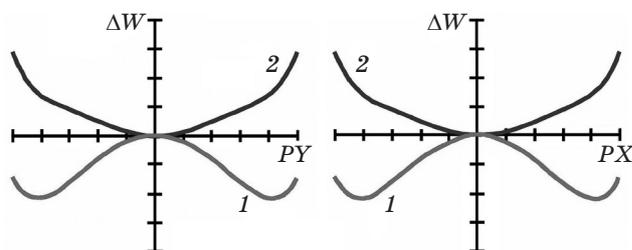


Рис. 3. Волновая аберрация (ΔW) расширителя лазерного пучка. 1 – длина волны 1,064 мкм, $|\Delta W| = 0,22\lambda$, 2 – длина волны 0,266 мкм, $|\Delta W| = 0,28\lambda$.



Рис. 4. Остаточный хроматизм положения фокуса ахроматического объектива расширителя лазерного пучка.

расширителя лазерного пучка с параксиальной линзой для разных длин волн. Параболическая форма графика говорит о том, что линейная часть хроматической аберрации сильно уменьшена, в схеме преобладают аберрации второго порядка. Разница в положении фокальных отрезков для длин волн 1,064 мкм и 0,266 мкм равна 14 мкм. Остается неисправленным хроматизм второго порядка (сдвиг фокального отрезка для длины волны 0,532 мкм составляет 102 мкм). Но так как длина волны 0,532 мкм используется только для юстировки оптической системы, то исправлять хроматизм второго порядка не имеет смысла.

Изготовление оптических компонентов осуществлялось с помощью высокоточных алмазных шлифовальников и полировальников.

Получение расчетных параметров расширителя возможно только при отклонении радиусов от расчетных с погрешностью не более 0,1%. Это удалось достигнуть при контроле линз сферометром ИЗС-7 на стадии шлифовки контактным методом, а на стадии доводки – бесконтактным методом лазерным автоколлиматором.

Контроль и фокусировка коллиматора в сборе осуществлялись по кружку рассеяния на длине волны 532 нм в 100-метровом оптическом коридоре. Фокусировка на ИК и УФ диапазоны проводилась смещением входной линзы 2 (рис. 1) расширителя лазерного пучка на точно рассчитанное расстояние с последующей фиксацией этого положения цанговой гайкой.

Технические характеристики двухволнового лазерного передатчика флуоресцентного лидара

Разработанная схема передатчика лазерного излучения обеспечивает возможность одновременной работы без перефокусировки на длинах волн 1,064 мкм и 0,266 мкм с уменьшением первоначальной угловой расходимости лазерного пучка более чем в 7 раз. Она позволяет юстировать выходящий из расширителя лазерный пучок лучей параллельно оптической визирной оси системы аппаратурного комплекса лидара. Разработанная схема способна минимизировать сфокусированный блик, возникающий в результате отражения излучения от первой поверхности отрицательного оптического компонента расширителя лазерного

* * * * *

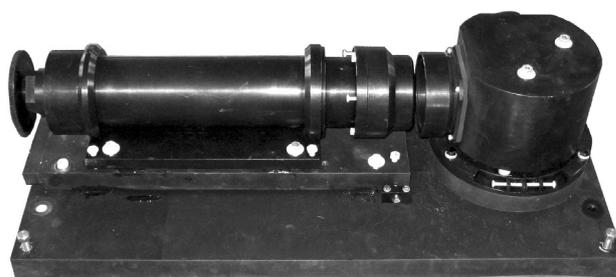


Рис. 5. Фотография расширителя лазерного пучка двухволнового передатчика флуоресцентного лидара в сборе с первой призмой.

пучка, приводящий к нежелательным последствиям. По этой причине отрицательная линза в схеме обращена выпуклой, а не вогнутой поверхностью к выходному торцу лазера.

Первый внутренний радиус кривизны отрицательного компонента объектива отличается от второго внутреннего радиуса кривизны положительного компонента двухлинзового объектива на ширину воздушного промежутка между ними, что дает возможность провести интерференционный контроль сборки и качества изготовления поверхностей по кольцам Ньютона, не изготавливая дополнительно пробное стекло для второй внутренней поверхности объектива. Это повышает технологичность изготовления расширителя в связи с упрощением контроля качества изготовления оптических поверхностей расширителя лазерного пучка.

Технические характеристики передатчика

Источник излучения –	YAG:Nd-лазер
Рабочие длины волн –	1,064 и 0,266 мкм
Энергия импульса ($\lambda = 1,064$ мкм) –	до 200 мДж
Энергия импульса ($\lambda = 0,266$ мкм) –	до 80 мДж
Увеличение расширителя лазерного пучка –	7,75 ^x
Габаритные размеры расширителя лазерного пучка –	100×400 мм.

Расширитель лазерного пучка для двухволнового передатчика (рис. 5) в составе флуоресцентного лидара прошел полевые испытания, обеспечив дальность работы аэрозольного канала до 33 км, а флуоресцентного канала – до 4 км. На расширитель лазерного пучка получен патент [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов С.А. Основы оптики. СПб.: ГИТМО (ТУ), 2000. 173 с.
 2. <http://www.zemax.com>
 3. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М: Машиностроение, 1992. 326 с.
 4. Коханенко Г.П., Макогон М.М., Пономарев Ю.Н., Рынков О.А., Симонова Г.В. Ахроматический расширитель лазерного пучка для УФ и ИК областей спектра // Патент России № 89727. 2009.
-