

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЕГО РАСПРОСТРАНЕНИИ В ОТКРЫТОЙ ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ

Л. И. Зыков, Д. Ю. Ломовский, А. Н. Попов, А. Ю. Портнягин, О. Л. Течко, А. П. Цацкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЛФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Цель исследований состояла в измерении при различных углах наблюдения плотности мощности и яркости рассеянного излучения при прохождении непрерывного лазерного пучка мощностью 1 Вт в открытой воздушной атмосфере. Эксперименты были проведены в ночное время суток в июне и октябре. Регистрация рассеянного излучения осуществлялась видеокамерой типа WAT-100N с объективом.

Исследования показали, что диаграмма рассеяния сильно вытянута в направлении распространения лазерного пучка, интенсивность рассеянного излучения достигала 10 мкВт/м^2 на расстоянии 50 м, а спектральная яркость $15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм)}$.

Введение

Рассеянное лазерное излучение используется в научных исследованиях для изучения аэрозолей [1, 2], атмосферных явлений [3], исследования свойств различных веществ (газовые смеси, жидкости и твердые тела) [4]. К примеру, по наличию характерных пиков на диаграмме углового рассеяния можно определить некоторые свойства аэрозолей, находящихся в рассеивающей среде [5]. Кроме того, при практической работе с лазерами у человека могут возникнуть болезненные ощущения при восприятии глазами рассеянного излучения от проходящего в атмосфере лазерного пучка средней мощности. Поэтому необходимо было выяснить, как рассеянное излучение соответствует нормам по безопасности при работе с лазерным излучением [6, 7]. Также полезно было определить поверхностную плотность мощности (интенсивность) рассеянного излучения и его угловую диаграмму направленности, необходимую для некоторых приложений, а яркость рассеянного излучения сопоставить с яркостью известных источников.

Проведение измерений

Регистрация мощности рассеянного лазерного излучения при разных углах рассеяния проводилась на рабочем поле одного из внутренних полигонов ВНИИЭФ. Измерение мощности рассеянного в атмосферном воздухе лазерного излучения осуществлялось в темное время суток в условиях открытой атмосферы. Эксперименты проводились:

– 04.06.2015 г. с 22:00 до 00:00. Во время экспериментов луна находилась за горизонтом, небо было с редкими облаками. Влажность составляла от 70 % до 90 % (было замечено выпадение росы на поверхностях приборов), температура воздуха составляла от плюс 25 °С до плюс 15 °С;

– 15.10.2015 г. – 16.10.2015 г. с 22:00 до 04:00. Во время экспериментов луна находилась за горизонтом, небо было с облаками. Влажность составляла от 70 % до 82 % (выпадение росы на поверхностях приборов не было замечено), температура воздуха составляла от плюс 7 °С до плюс 4 °С.

В обеих сериях наблюдений метеорологическая дальность видимости измерялась с помощью прибора типа МДВ-М и составляла от 9 до 10 км.

Рассеяние регистрировалось в диапазоне углов от 5° до 60° (в июне) и от 5° до 175° (в октябре), шаг изменения угла составлял 5°. Перед проведением измерений предварительно проводилась разметка на местности. Первоначально определялось направление, в котором будет распростра-

няться лазерное излучение. Для этого луч пускался параллельно поверхности Земли в растворе предполагаемых углов измерения с целью установки нужной его высоты до поверхности Земли и расстояние до границ рабочего поля. После выбора направления, на трассе прохождения лазерного излучения ставилась базовая точка А. С помощью теодолита ЗТ2КА [8], помещенного в эту точку, осуществлялась разметка угловых направлений. Далее с помощью лазерного дальномера BOSCH GLM 80 Professional ($\lambda = 635 \text{ нм}$) для каждого углового направления определялось и фиксировалось с помощью метки расстояние от базовой точки до места расположения приемника. При дальнейших измерениях на помеченные места ставился приемник излучения. В июне разметка места измерений проводилась более грубо с использованием простого транспорта для угловых измерений и ленточной линейки (рулетки).

Во время проведения работ соблюдались требования безопасности при работе с лазерами. Схема проведения измерений представлена на рис. 1.

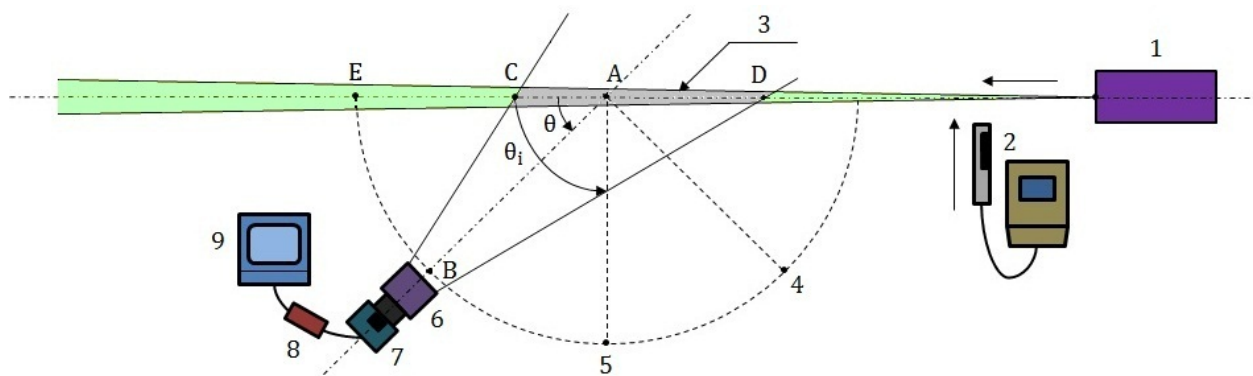


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – измеритель мощности; 3 – исследуемый участок лазерной трассы; 4, 5 – угловые отметки (показаны для примера); 6 – объектив; 7 – видеокамера; 8 – устройство видео-захвата; 9 – компьютер

Пучок непрерывного твердотельного лазера типа DTL-413 с диодной накачкой распространялся через открытую атмосферу приблизительно параллельно поверхности Земли на высоте от 1,6 до 1,8 м. Длина волны излучения лазера $\lambda = 527 \text{ нм}$, выходная мощность в пучке составляла около 1 Вт, расходимость излучения 1 мрад. Диаметр пучка в точке А составлял около 2,5 см. Подстилающей поверхностью под трассой прохождения лазерного излучения являлся травяной покров с участками почвы не заросшей травой. Размер открытой площади, свободной от строений и зданий составлял около 150 м. Базовая точка А, в которую ранее ставился теодолит для осуществления угловой разметки, располагалась приблизительно в середине регистрируемого участка трассы. Через расстояние 50 м от нее вдоль лазерного пучка располагалась угловая метка Е нулевого угла рассеяния, от которой были отсчитаны и отмечены выбранные углы рассеяния. Регистрирующая система, состоящая из объектива и видеокамеры, устанавливалась в точке В и переносилась по размеченным угловым отметкам. Оптическая ось регистрирующей системы ориентировалась так, что пересекала ось луча в базовой точке А и на снимках видеокамеры она располагалась по центру снимка. Угол наблюдения рассеянного излучения θ отсчитывался от трассы прохождения лазерного пучка как показано на рис. 1. Расстояние от приемника до точки А при угловых его перемещениях оставалось постоянным и составляло $L = 50 \text{ м}$. Исследуемый участок воздушной трассы имел разную длину в зависимости от угла наблюдения θ из-за ограниченности поля зрения регистрирующего приемника. Видимая приемником длина участка изменялась от 1 до 12 м при угловом его перемещении.

Интенсивность рассеянного излучения измерялась системой, состоящей из объектива и видеокамеры. В качестве объектива использовался Рубинар-К 4,5/300 МАКРО с фокусным расстоянием 30 см и диаметром 7,4 см. Он формировал изображение воздушной трассы, рассеивающей лазерное излучение, на фотоприемной матрице видеокамеры Watec модели WAT-100N с регистрирующей матрицей размером 6,4 мм (H)×4,8 мм (V) и пикселем 8,6 мкм (H)×8,3 мкм (V). Видеокамера была предварительно прокалибрована. По ее снимкам определялась длина рассеивающей трассы

и интенсивность рассеянного излучения на приемнике. Калибровочный коэффициент видеокамеры составлял 66,5 фотонов/(цифровых единиц×пиксель) [9]. Через сигнальный кабель РК-50 видеокамера подключалась к устройству видео-захвата типа RTCap-2. Видеокадры с изображением исследуемого участка лазерной трассы записывались на переносной компьютер с помощью приложения Ulead Video Studio. Запись изображений проводилась в цифровом формате BMP (8-битный формат) с числом цифровых градаций равном 256 цифровых единиц (ц.е.). Дальнейшая обработка полученных изображений проводилась с помощью программного приложения ImageJ, а численная оценка параметров с использованием Microsoft Excel и MathCad.

При измерении мощности рассеянного лазерного излучения для каждого фиксированного угла рассеяния выполнялось две операции:

- съемка отрезка рассеянной лазерной трассы при различных экспозициях,
- контроль мощности прямого излучения в лазерном пучке.

Съемка изображений рассеянного пучка проходила следующим образом. Ось поля зрения видеокамеры выставлялась первоначально под углом $\theta = 5^\circ$ к оси пучка лазера. Оператор проводил съемку пучка, последовательно переключая время экспозиции видеокамеры с минимальной отметки (1/10000 с) до максимальной (1/50 с). Далее, измерялась мощность излучения непосредственно в лазерном пучке измерителем мощности типа Ophir Nova (позиция 2 на рис. 1). Затем производилась съемка фонового кадра при закрытом заслонкой пучке лазера. После этого регистрирующая система переносилась с угловым шагом 5° на следующую угловую отметку и вышеописанные операции повторялись. Типичные снимки изображения лазерной трассы показаны на рис. 2. Из всех полученных снимков для дальнейшей обработки выбирались те, цифровая амплитуда в которых не превышала насыщающей, то есть соответствовали линейному участку регистрации.

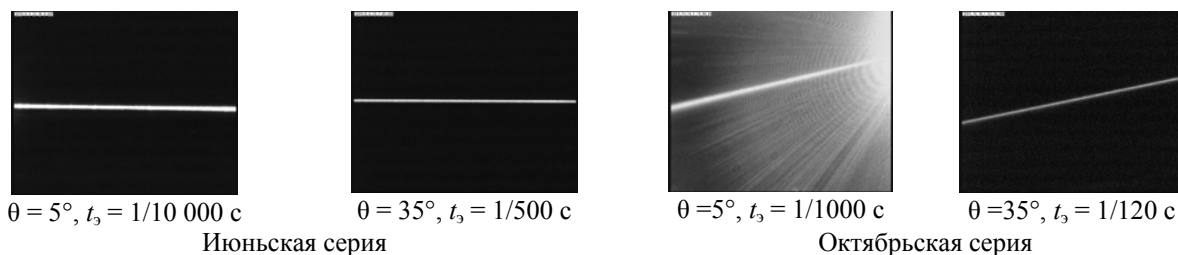


Рис. 2. Типичное изображение лазерной трассы при разных углах рассеяния θ и разных экспозициях t_s

Контроль мощности прямого излучения в лазерном пучке показал, что мощность в июньской серии составила $P \approx 1,043 \pm 0,09$ Вт, а в октябрьской $P \approx 0,848 \pm 0,06$ Вт. Полученные величины согласуются с паспортным значением (1 Вт), однако в октябрьской серии мощность несколько снизилась. Такое снижение, возможно, произошло из-за того, что в июне лазер включался только на момент снятия измерения, а в октябре он работал еще до начала измерений в течение 2-х часов и далее непрерывно еще в течение около 4-х часов.

Длина рассеянной трассы l находилась разными способами. В июньской серии она определялась по меткам, поставленным на лазерной трассе, которые соответствовали границам ее изображения на снимке, и подтверждалась расчетным путем. В октябрьской серии наблюдений длина рассеянной трассы определялась расчетно по следующей формуле [10, 11]:

$$l = \frac{a}{M \sin \theta}, \quad (1)$$

где a , м – длина проекции трассы по снимку с видеокамеры; $M = 6 \cdot 10^{-3}$ – масштаб снимка; θ , град – угол регистрации рассеянного излучения. Необходимо отметить, что рассчитанная длина рассеянной трассы в октябрьской серии имеет погрешность, которая связана с разным масштабом и разным расстоянием от границ отрезка до приемника. Проведенная оценка показала, что эта погрешность не превышает 10%. Рассмотрение снимков показало, что в рассеянном пучке наблюдаются отдельные крупные яркие точки, в которых рассеяние превышает среднее значение. Число этих точек

в июньской серии составило примерно от 25 до 50 по всей регистрируемой трассе, а в октябрьской – от 10 до 25 точек. Причиной их появления являлось, вероятно, наличие летающих насекомых, пыли, крупной пылицы или других рассеивающих центров. Кроме того, в октябрьской серии наблюдалось большое число рассеивающих центров, размеры которых визуальнo по снимку были меньше, чем крупных и в приведенном подсчете они не указаны.

В связи с этим обработка изображений и дальнейшее построение графиков проходило для двух участков трассы – малого участка трассы, который выбирался так, чтобы крупные рассеивающие центры отсутствовали, и всей зарегистрированной трассы (большой участок трассы), ограниченной только размерами снимка. Это соответствовало значениям проекции трассы на направление наблюдения соответственно 6,5 см и 1 м.

Результаты измерений

Для того, чтобы получить представление о пучке рассеяния было найдено распределение амплитуды рассеивающего сигнала в сечении перпендикулярном направлению распространения лазерного пучка. Для этого были выбраны снимки, полученные при угле рассеяния 20° в обеих сериях наблюдений. Для статистики было взято по три сечения отстоящих друг от друга примерно на 2–4 пикселя по снимку (3–6 мм вдоль трассы по объекту). На рис. 3 показан профиль поперечного сечения рассеянного лазерного излучения в октябрьской серии наблюдений.



Рис. 3. Профиль поперечного сечения рассеянного лазерного излучения в октябрьской серии наблюдений $t_s = 1/500$ с

Видно, что поперечный размер рассеянного пучка по полувысоте профиля составляет около 20 мм. В июньской же серии наблюдений соответствующий поперечный размер составил 8 мм. Такой результат остается пока для нас не понятным. Возможно, это связано с разной угловой расходимостью лазерного пучка в проводимых сериях. Отметим также, что изменение поперечного размера лазерного пучка не должно влиять на величину интенсивности рассеянного излучения, регистрируемого приемником.

Интенсивность (поверхностная плотность мощности) рассеянного лазерной трассой излучения достигаемая на входной апертуре объектива измерительной системы определялась с помощью следующего выражения:

$$E = \frac{IkE_1}{S_A \tau_s}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где I , ц.е. – интеграл сигнала по области изображения рассеянной трассы по снимку с видеокамеры; $k = 66,5$ фотонов/(ц.е.×пиксель) – калибровочный коэффициент; $E_1 \approx 3,8 \cdot 10^{-19}$ Дж – энергия одного

фотона для лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 527$ нм; t_3 , с – время экспозиции; $\tau = 0,7$ – светопропускание объектива; $S_A = 2,915 \cdot 10^{-3}$ м² – площадь апертуры объектива. Для нахождения интеграла сигнала на снимках выделялась область, включающая изображение трассы, и в этой области вычислялся интеграл I_1 , (ц.е.хпиксель), в который кроме сигнала входил световой фон. Затем выделенная область перемещалась за пределы изображения лазерного пучка, и в ней вычислялся интеграл фона I_2 . После вычитания определялся искомый интеграл сигнала $I = (I_1 - I_2)$, значение которого подставлялось в выражение (2).

На рис. 4 показано поведение интенсивности рассеянного излучения в зависимости от угла рассеяния для большого участка трассы в обеих сериях наблюдений.

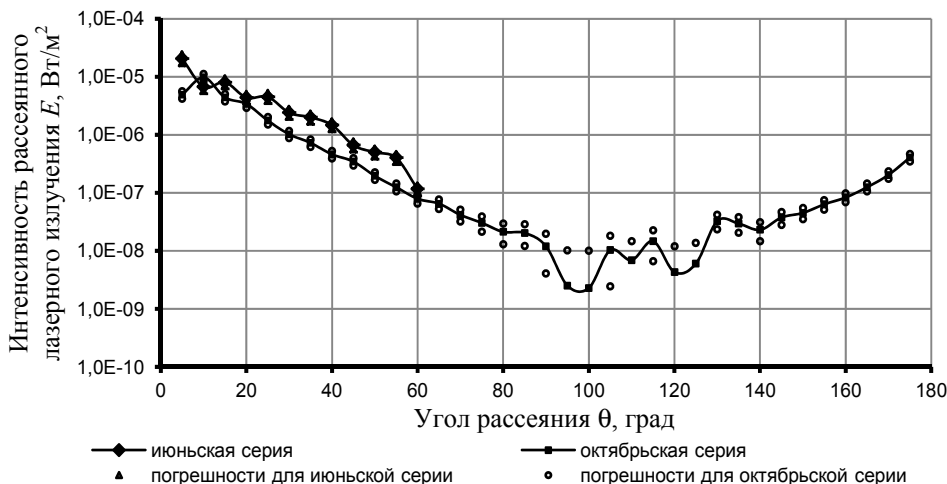


Рис. 4. Зависимость интенсивности рассеянного лазерного излучения от угла рассеяния для большого участка в июньской и октябрьской сериях наблюдений

Как видно из рисунка, интенсивность рассеянного излучения сначала падает с ростом угла рассеяния, а затем снова возрастает. Графики на данном рисунке приведены в удобном для обзора логарифмическом масштабе по оси ординат. Максимальная величина интенсивности достигается при угле рассеяния 5° и составляет примерно 20 мкВт/м² для июньской серии и 9 мкВт/м² для октябрьской. Минимальная интенсивность рассеянного излучения, которая наблюдается в октябре, при углах рассеяния от 90° до 115° составляет 2 нВт/м² и приблизительно в 2000 раз меньше максимальной. В совпадающем диапазоне изменения углов рассеяния от 5° до 60° для обеих серий наблюдений, кривые рассеяния ведут себя одинаково. Можно увидеть, что значения интенсивности рассеянного излучения в июньской серии в среднем в 2–3 раза выше, чем в октябрьской. На рис. 4 светлыми точками обозначена погрешность измерения, которая подсчитывалась отдельно для каждого фиксированного угла рассеяния. Так делалось потому, что из-за большого диапазона изменения интенсивности рассеяния погрешность обработки сильно менялась. При углах от 5° до 80° погрешность измерения составляла не более 17 %, а при углах близких к 90° возросла даже до 340 % в обеих сериях измерений.

Полученные путем измерения величины интенсивности рассеянного излучения были сопоставлены с известными нормами по безопасности труда. Согласно полученным данным, максимальная измеренная интенсивность, которая достигается при малых углах рассеяния, составляет около 10 мкВт/м² и согласно нормам становится опасной для восприятия глазом человека при фоновой освещенности 0,1 люкс (лк) и времени рассматривания рассеянного пучка от 120 до 500 минут. Отметим, что указанная фоновая освещенность 0,1 лк приблизительно соответствует рассматриванию в ночных условиях поверхности Земли, освещенной светом Луны [12].

При регистрации рассеянного излучения от лазерной трассы разными приборами и на различных расстояниях могут фиксироваться трассы различной длины. Поэтому для практики жела-

тельно знать интенсивность рассеянного излучения, которое создается участком трассы единичной длины. На рис. 5 приведены зависимости от угла интенсивности рассеяния E_I , создаваемой участком лазерной трассы длиной один метр в проведенных экспериментах.

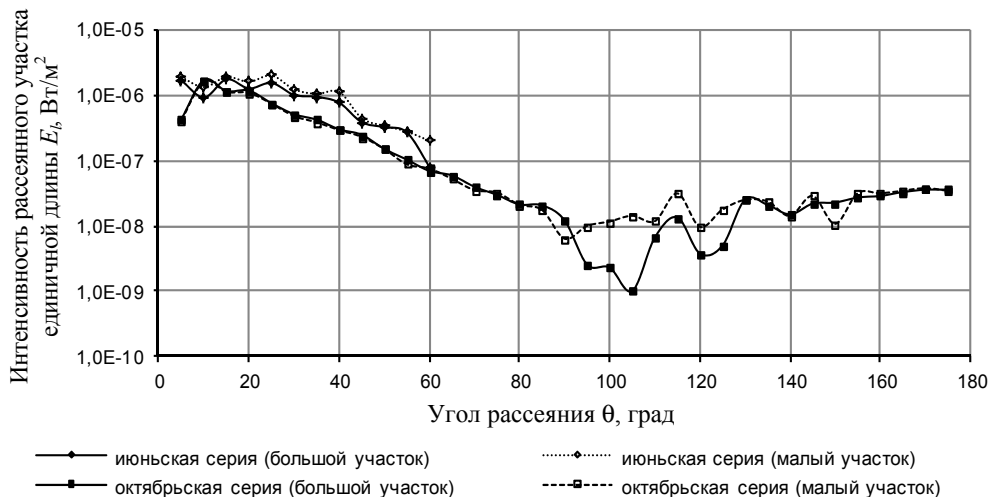


Рис. 5. Зависимость интенсивности рассеяния создаваемой участком трассы единичной длины от угла рассеяния

Как видно из рисунка, интенсивность рассеянного излучения от единичного участка примерно одинакова при регистрации участков малой и большой длины в диапазоне углов от 5° до 85° в каждой серии наблюдений. Однако, при углах рассеяния от 90° до 120° , которые присутствовали в октябрьской серии, видно несовпадение значений E_I для большой и малой трасс. Это несовпадение может быть объяснено большой погрешностью измерений в данном диапазоне углов из-за близости измеряемого сигнала к шумам. Далее, при увеличении угла рассеяния до 175° , (при регистрации в октябрьской серии) снова наблюдается хорошее совпадение значений E_I при регистрации излучения с большой и малой трасс. Величина E_I в июньской серии в 2–3 раза больше чем октябрьской при совпадающих углах регистрации (в диапазоне от 5° до 60°). Совпадение значений интенсивности рассеяния, созданного участком трассы единичной длины, наблюдаемое внутри каждой серии измерений говорит о том, что интенсивность рассеянного излучения на регистрирующем приемнике изменяется пропорционально длине рассеивающего участка трассы. И это несмотря на выбор малого участка без ярких рассеивающих центров. Такое обстоятельство указывает на то, что наблюдаемые в рассеянном лазерном пучке отдельные яркие рассеивающие центры не дают заметного вклада в общее рассеяние, которое происходит на основных частицах воздуха и содержащихся в нем аэрозолях.

Поведение кривых на рис. 5 может быть описано простыми количественными зависимостями. Проведенная интерполяция показала, что при углах рассеяния от 10° до 80° логарифм величины E_I уменьшается прямо пропорционально углу рассеяния. Для октябрьской серии наблюдений кривая на этом участке может быть описана формулой:

$$E_I = 3,5 \cdot 10^{-6} e^{-0,063\theta}, \quad (3)$$

а для июньской серии формулой:

$$E_I = 3,5 \cdot 10^{-6} e^{-0,047\theta}. \quad (4)$$

Интенсивность излучения, созданная источником излучения на приемнике, характеризует степень его облученности или иначе степень воздействия на него со стороны источника света. Одной из характеристик, которая описывает непосредственно источник света, является его яркость. Для возможности сопоставления полученных результатов с известными данными была определена

яркость свечения участка рассеянной лазерной трассы единичной длины. Она находилась как яркость светящейся поверхности, которая является касательной к участку трассы и через которую проходило рассеянное излучение в направлении приемника. Величина яркости определялась с помощью выражения [11]:

$$B = \frac{E_l L^2}{S_A \sin \theta}. \quad (5)$$

Полученные в результате оценки по данной формуле значения яркости для обеих серий измерений при угле 5° составляет от 4 до 18 Вт/(м²·ср) и убывает при увеличении угла рассеяния примерно до 0,01–0,001 Вт/(м²·ср) при углах от 95° до 105° . Экстраполированные на угол 0° величины яркости в июньской и октябрьской сериях в 1,7 раза отличаются между собой и составляют соответственно 19 и 11,2 Вт/(м²·ср). Рассеяние лазерного излучения в направлении распространения прямого лазерного пучка, то есть в попутном направлении, в 25–140 раз превышает рассеяние в обратном направлении. Самая минимальная яркость рассеивающего источника наблюдается в перпендикулярном к падающему пучку направлении, где она составляет величину в 1000–1800 раз меньшую, чем при наблюдении при малых углах.

Для сопоставления наблюдаемого нами рассеянного лазерного излучения с другими источниками была проведена оценка его спектральной яркости. Проведенная оценка для ширины линии $\Delta\lambda = 4,5$ см [13] примененного в измерениях лазерного излучения, дала яркость равную от 7 до 15 Вт/(м²·ср·мкм). Сопоставление показывает, например, что такая спектральная яркость примерно на порядок меньше спектральной яркости дневного неба, при его наблюдении на использованной длине волны (527 нм) в зенитном направлении и при высоте Солнца 50° .

Для того чтобы иметь наглядное представление о пространственной конфигурации диаграммы рассеяния, угловая зависимость яркости представлена на рис. 6 в полярных координатах. Участок диаграммы в диапазоне углов более 180° отображался симметрично участку, в котором были проведены измерения. В соответствии с рисунком 6, диаграмма рассеяния для обеих серий измерений сильно вытянута в направлении малых углов рассеяния, то есть рассеяние лазерного излучения вперед намного превышает рассеяние в обратном направлении.

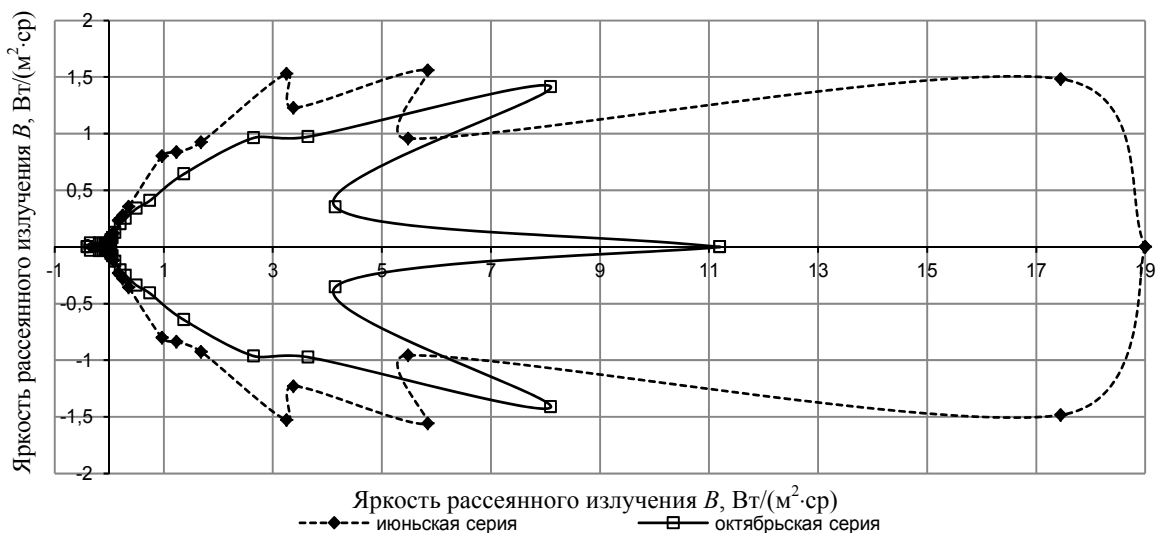


Рис. 6. Диаграмма рассеяния лазерного излучения для участка единичной длины для июньской и октябрьской серий наблюдений

Приведенная диаграмма отличается по форме от диаграммы релеевского рассеяния [14], которая напоминает симметричную «восьмерку». Особенностью снятой нами диаграммы является также наличие боковых лепестков с увеличенной яркостью на некоторых углах рассеяния. Это указывает на то, что зарегистрированное в проведенных наблюдениях рассеяние лазерного пучка

происходит в основном на аэрозольных частицах находящихся в воздухе, а не на молекулах воздуха [15].

Проведенные исследования показали, что для получения более полной картины поведения интенсивности рассеянного лазерного излучения в зависимости от угла рассеяния необходимо проведение измерений в разных погодных условиях.

Список литературы

1. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Современные проблемы атмосферной оптики. Том 4. Оптика атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеиздат, 1987.
2. Зуев В. Е., Зуев В. В. Современные проблемы атмосферной оптики. Том 8. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992.
3. Арсеньян Т. И., Короленко П. В., Петрова Г. В., Федотов Н. Н., Эмбаухов С. В. Программа исследований эффектов стохастизации лазерного излучения в атмосфере. НИИ ядерной физики МГУ, 1977.
4. Тихомиров И. А., Мышкин В. Ф., Власов В. А., Борисов В. А., Сосновенко В. М., Васильев А. Г. Методы и устройства по определению индикатрисы рассеяния лазерного излучения в газодисперсной среде. Известия Томского политехнического университета. Томский политехнический университет, 2003. Т. 306, № 5.
5. Мышкин В. Ф. Особенности рассеяния лазерного излучения из области интерференции. Известия Томского политехнического университета. Томский политехнический университет, 2004. Т. 307, № 3.
6. 5801-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров», Москва, 1991.
7. Отраслевой стандарт ОСТ 95 10069-84 «ССБТ. Лазерная безопасность. Нормы и правила безопасности труда», Москва, 1984.
8. Теодолит ЗТ2КА. Паспорт ЗТ2КА-с60 ПС. УОМЗ, 2007.
9. Евтихеев Н. Н., Краснов В. В., Родин В. Г., Солякин И. В., Стариков С. Н., Черемхин П. А., Шапкарина Е. А. Увеличение отношения сигнал-шум за счет пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. 2012, № 4. С. 122–136.
10. Junichi Nakamura. Image sensors and signal processing for digital still cameras, Japan Imaging Design Center Micron, Taylor&Francis Group, LLC, 2006.
11. Годжаев Н. М. Оптика. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1977, 432 с.
12. Зверева С.В. В мире солнечного света. – Л.: Гидрометеиздат, 1988, 160 с. с илл.
13. Лазер. Модель ДТЛ-413. Руководство по эксплуатации. Москва, 2014.
14. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
15. Хвостиков И. А. Теория рассеяния света и ее применение к вопросам прозрачности атмосферы и туманов. – М.: УФН, 1940. Т. XXIV. Вып. 2.