

МЕТОДИЧЕСКОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАСSEЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2008 г. А. Н. Старченко, канд. техн. наук

НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор,
Ленинградская область

Представлена концепция измерения энергетических показателей рассеянного лазерного излучения в натуральных условиях. Описаны аппаратура с входными апертурами 100–400 мм, а также методы и оборудование для ее энергетической калибровки, исследования пороговых, спектральных и динамических характеристик.

Коды OCIS: 230.1150.

Поступила в редакцию 08.07.2008.

С точки зрения терминологии, рассеяние (упругое рассеяние) предполагает, что в результате взаимодействия с поверхностью, например шероховатой, радикальным образом меняется направленность исходного лазерного излучения (ЛИ). При объемном рассеянии в среде рассматриваются составляющие, не совпадающие с направлением распространения прямого пучка. Специфика рассеяния обусловлена монохроматичностью и когерентностью лазеров. Поле рассеянного лазерного излучения (РЛИ) является следствием интерференции множества пучков со случайными фазами. Таковую структуру с характерными яркими пятнами называют спекл-картиной [1, 2]. На рис. 1 показаны снимки, иллюстрирующие случайное распределение интенсивности РЛИ. В этом случае на поверхность падал пучок одноимодового гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,633$ мкм). Размер пятна по уровню $1/e$ составлял $d_n = 3$ мм, а расстояние до матрицы ТВ камеры составляло $R = 300$ мм. При удалении от рассеива-

ющей поверхности масштаб спекл-картины возрастает пропорционально дистанции R . Для оценки размера “спекла” используется соотношение

$$d_c = (\lambda/d_n)R. \quad (1)$$

При дистанционных измерениях на входную апертуру прибора приходится конечное число спеклов. Когда размеры спекла и апертуры близки, статистические вариации показаний прибора оказываются весьма существенными. Детальное рассмотрение вопроса приведено в работах [2–5]. На основе экспериментов и теоретического анализа получены соотношения, позволяющие оценивать относительные флуктуации облученности и яркости в зависимости от расстояния до регистрирующего прибора, размера и конфигурации его входной апертуры, а также от угла зрения и степени когерентности лазерного пучка. Приемлемую точность оценки относительных флуктуаций облученности [5] дает соотношение

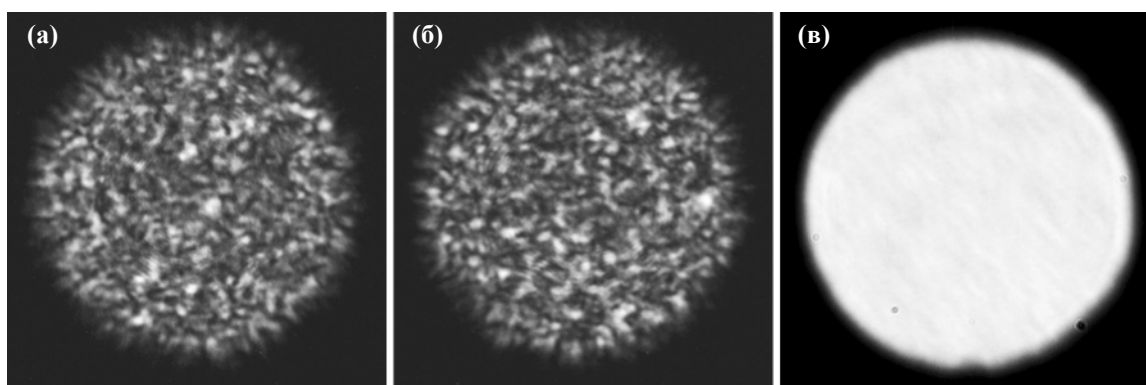


Рис. 1. Две реализации спекл-картины (а и б) при отражении от шероховатой поверхности и результат усреднения при движении отражателя (в).

$$\delta E = [1 + A_{\text{п}}/A_{\text{к}} + A_{\text{п}}A_{\text{вх}}/(\lambda R)^2]^{-0,5}, \quad (2)$$

где $A_{\text{п}}$, $A_{\text{к}}$, $A_{\text{вх}}$ – обобщенные площади [6] лазерного пятна, его когерентности и входной апертуры фотометра, λ – длина волны, R – расстояние до прибора.

В случае регистрации средней по полю зрения яркости, когда изображения пятна больше приемной площадки, для оценки флуктуаций применимо выражение

$$\delta L = [1 + (\lambda R)^2/(A_{\text{к}}A_{\text{вх}})]^{-0,5} \times [1 + (A_{\text{п}}/A_{\text{к}})(R/x)^2 + (A_{\text{п}}A_{\text{вх}})/(\lambda x)^2]^{-0,5}, \quad (3)$$

где $A_{\text{п}}$ – обобщенная площадь приемника излучения, а x – расстояние от задней главной плоскости объектива до плоскости изображения, которое в случае дистанционных измерений ($R \gg F$) примерно равно фокусному расстоянию F объектива.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили сформировать оптимальный подход как к методам измерения энергетических характеристик РЛИ, так и к концепции построения приборов. Полученные результаты стали отправной точкой нового направления, связанного с изучением спектра временных флуктуаций ЛПИ, рассеянного движущейся шероховатой поверхностью, и его использованием для контроля характеристик движения [7–9].

Для интерпретации результатов натуральных измерений потребовалось выбрать адекватные энергетические показатели поля РЛИ. В стандартах по лазерной фотометрии основное внимание уделено

параметрам, описывающим прямой лазерный пучок [10]. С другой стороны, регистрация излучения, рассеянного удаленным объектом, имеет много общего с измерением облученности или яркости удаленного источника в традиционной фотометрии [11]. Поэтому для описания РЛИ выбраны облученность E и энергетическая яркость L [12], энергетическая экспозиция H (ЭЭ) и интегральная по времени яркость Λ для случаев, когда реакция прибора пропорциональна энергии импульса.

Силами института и соисполнителей (Белорусский государственный университет, НПО “Орион”, ПО ЗОМЗ) созданы макеты и приборы для регистрации лазерного излучения: макет универсальной аппаратуры “Луч”, макет “Гамма” для измерения импульсного излучения в диапазоне 0,4–1,1 мкм, три опытных образца возимого комплекса “Луч-1” и макет “Ключ” на диапазон 2–12 мкм. Совместно с ПО ЗОМЗ выпущены опытные образцы и малая серия приборов ИФ-301 [13]. Характеристики приборов приведены в табл. 1, а их фото – на рис. 2–5.

Особенности приборов состоят в больших размерах входной апертуры, высоких пороговых характеристиках и широком диапазоне регистрации облученности или энергетической экспозиции. Устройства “Луч” (рис. 2а), “Луч-1” (рис. 3б), “Гамма” (рис. 2б) и “Ключ” (рис. 5а) имеют зеркальные объективы, а измерители ИФ-300 (рис. 4) и ИФ-301 (рис. 5б) – линзовую оптику. В большинстве приборов выделение требуемого участка спектра или лазерной длины волны осуществляется фильтрами,

Таблица 1. Характеристики аппаратуры для измерения РЛИ

Тип прибора или макета	Диаметр вх. зрачка, фокус, мм	Приемник (спектральный диапазон, мкм)	Угол зрения, угл. мин.	Длительности импульсов	Диапазон, Вт/м ² (погрешность, %)
Макет “Луч”	$D_{\text{вх}} = 250$ $F = 500$	Si–ФД (0,4–1,1)	10	200 нс–100 мс	10^{-7} – 10^{-5}
		Ge–ФД (0,4–1,7)	10	200 нс–100 мс	10^{-6} – 10^{-4}
		CdHgTe–ФР (2–12)	2	500 нс–100 мс	10^{-6} – 10^{-4}
Макет “Гамма”	$D_{\text{вх}} = 100$ $F = 450$	Si–ФД (0,4–1,1)	3,5	200 нс–100 мкс	10^{-4} – 10^{-2} (50–70)
Возимый комплекс “Луч-1”	$D_{\text{вх}} = 390$ $F = 1200$	Si–ФД (0,4–1,1)	1,3	100 нс–1 мс	10^{-5} – 10^{-3}
		Ge–ФД (0,4–1,7)	9	400 нс–непр.	2×10^{-7} – 10^{-4}
		CdHgTe–ФР (2–12)	0,5	2 мкс–непр.	3×10^{-7} – 10^{-4}
		CdHgTe–ФД (2–12)	1	200 нс–1 мс	3×10^{-6} – 10^{-3} (40–70)
Макет “Ключ”	$D_{\text{вх}} = 100$ $F = 300$	CdHgTe–ФР (2–12)	3	5 мкс–непр.	2×10^{-6} –0,02
		CdHgTe–ФД (2–12)	2	50 нс–100 мкс	3×10^{-5} –0,1
ИФ-300 (ПО-ЗОМЗ)	$D_{\text{вх}} = 114$ $F = 114$	Si–ФД (0,4–1,1)	60	10 нс–10 мкс только ЭЭ	10^{-10} – 10^{-5} Дж/м ² (20–30)
ИФ-301	$D_{\text{вх}} = 95$ $F = 100$	CdHgTe–ФР (2–12)	20	100 мкс–непр.	10^{-5} – 10^{-2}
		CdHgTe–ФД (2–12)	20	100 нс–100 мкс	10^{-4} – 10^{-1} (30–40)

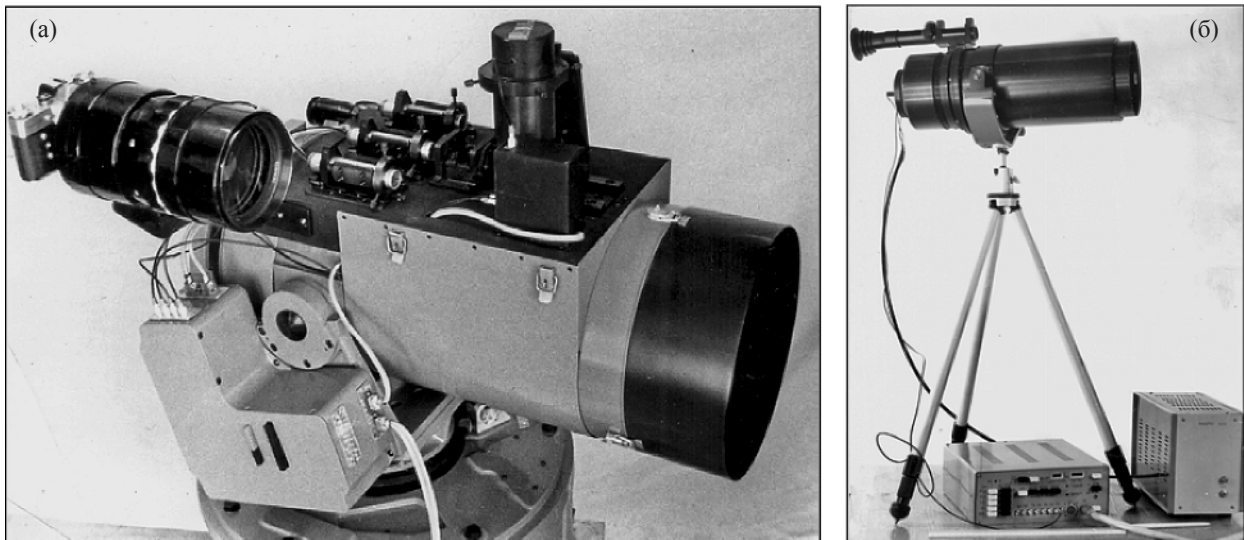


Рис. 2. Фото макетных образцов аппаратуры. а – макет “Луч”, б – макет “Гамма”.

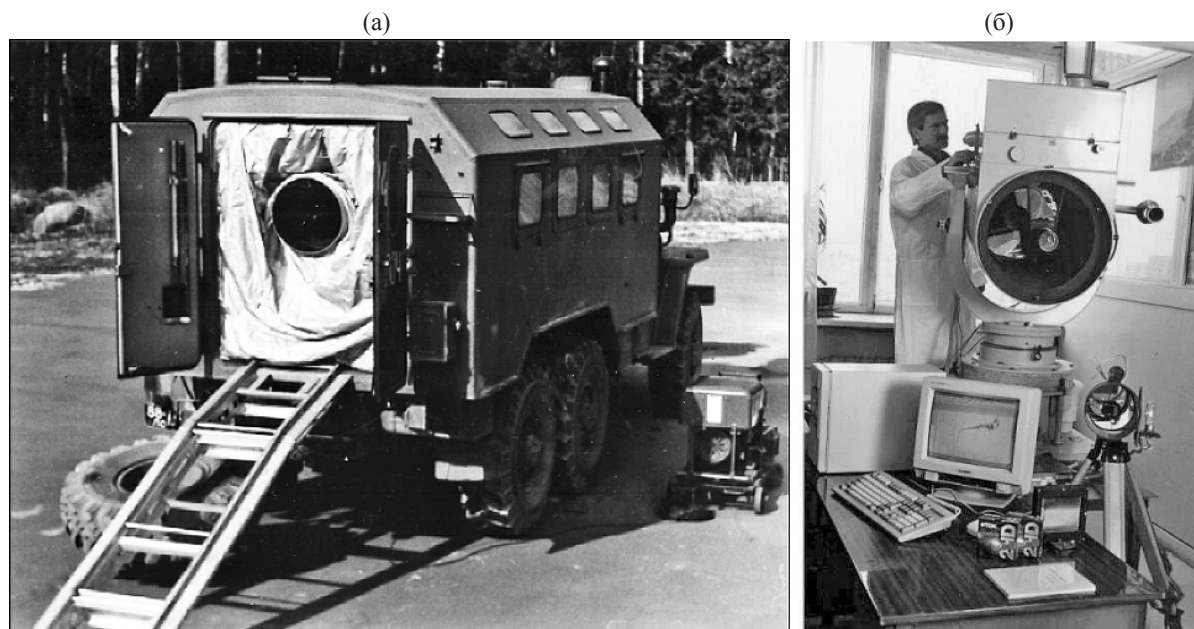


Рис. 3. Фото аппаратуры “Луч-1”. а – комплекс “Луч-1”, б – прибор “Луч-1”.



Рис. 4. Комплект прибора ИФ-300.

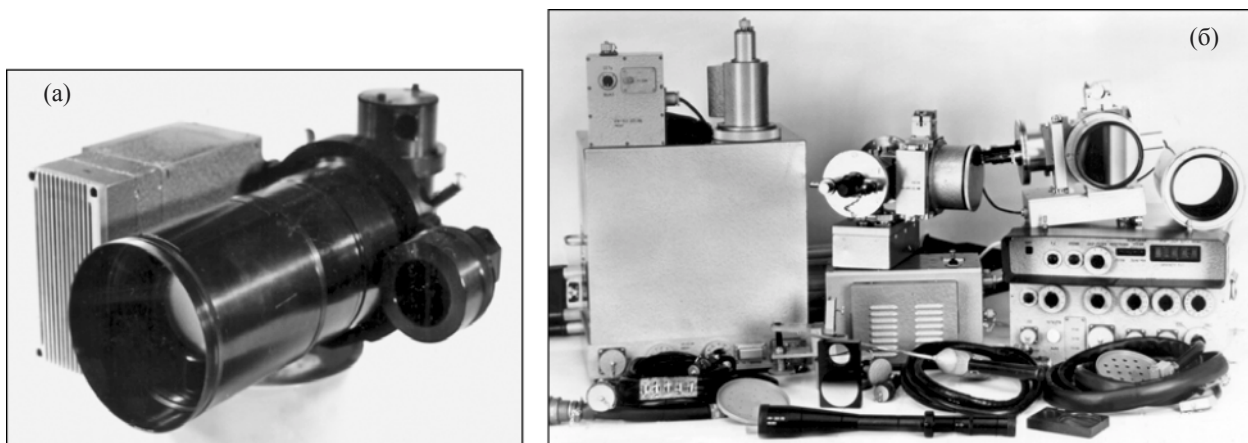


Рис. 5. Макет “Ключ” (а) и прибор ИФ-301 (б).

а регистрация сигналов – сменными фотоприемными устройствами (ФПУ). В приборе “Луч-1” для более эффективного подавления фона применен дифракционный монохроматор. В устройствах “Гамма”, “Луч-1”, ИФ-300 была реализована цифровая регистрация амплитуды импульсных сигналов в диапазоне более 60 дБ и непрерывного излучения в пределах до 90 дБ с автоматическим выбором предела измерений. Макет “Ключ” и прибор ИФ-301 позволили фиксировать форму сигналов путем оцифровки с частотой 100 МГц в импульсном и 1 кГц в непрерывном режиме с записью во внутреннюю память.

К настоящему времени сами приборы и регистрирующая аппаратура усовершенствованы. В частности, ручной привод развертки монохроматора прибора “Луч-1” заменен электрическим, а спектральный диапазон расширен до 0,2–16 мкм за счет разработки новых ФПУ с диапазоном линейной работы более 10 000. На рис. 2б показаны переносной источник излучения и регистрирующее оборудование на основе компьютера. Источник построен на базе зеркального коллиматора и предполагает установку сменных излучателей. На основе приемной головки прибора ИФ-301 создан сканирующий радиометр для измерения яркости и радиационной температуры в диапазоне 2–16 мкм. Его основными элементами являются измерительный канал на основе термоэлектрического приемника излучения, микропроцессорное устройство обработки и ввода информации в компьютер по каналу USB, а также поворотное устройство с программным управлением, обеспечивающее периодический контроль температуры в заданных точках или последовательный просмотр выбранной области с записью распределения яркости.

Для адекватной интерпретации результатов натурных измерений РЛИ в качестве базовых показателей аппаратуры выбраны коэффициенты преобразования по облученности $K(E) = N/E$ и энергетической экспозиции $K(H) = N/H$ для коротких импульсов. Эти коэффициенты (а точнее, характеристики преобразования) находятся экспериментально с помощью специального метрологического оборудования.

Для аттестации представленной аппаратуры создан стенд ИС-101 [14], позволяющий проводить калибровку приборов по облученности [15], яркости [16], энергетической экспозиции и т. д., а также исследовать спектральные и динамические характеристики аппаратуры и ФПУ. Характеристики стенда сведены в табл. 2.

Основными элементами стенда являются лазеры, зеркальный параболический коллиматор с диаметром 450 мм и фокусным расстоянием 2700 мм, набор калиброванных ослабителей, средства измерения ЛИ (ИМО-2-2, ОСИ СМ, ОСИ Э, ИКТ-1М, ФУР, ФПМ-01, ФПМ-02), референтные приемники излучения, электроизмерительные приборы.

Коллимированный пучок, в который помещается исследуемый прибор, в ходе поверки стенда направляется на собирающее зеркало, в фокусе которого располагается средство измерения ЛИ. Собирающее зеркало идентично коллиматорному, а его коэффициенты отражения r на рабочих длинах волн определены по свидетелям, напыленным одновременно с нанесением покрытия на зеркало. Они контролируются в процессе эксплуатации. Средняя облученность находится по известным значениям мощности P , площади коллимированного пучка A и коэффициента отражения r по формуле (4):

Таблица 2. Характеристики стенда ИС-101

Спектральный рабочий диапазон, мкм	0,3–16
Рабочие длины волн, мкм	0,355; 0,533; 0,633; 1,06; 1,15; 3,39 и 10,6
Световой диаметр коллиматора, мм	450
Пределы изменения расходимости коллимированного пучка, мрад	0,1–30
Диапазон воспроизводимых облученностей на длинах волн 0,63; 1,15; 3,39; 10,6 мкм, Вт/м ²	5×10 ⁻⁶ –1
Диапазон длительностей импульсов, формируемых на длинах волн 0,63; 1,15; 3,39; 10,6 мкм	100 нс–10 с
Диапазон воспроизводимых энергетических экспозиций для импульсов длительностью 10–20 нс на длинах волн 0,35; 0,53 и 1,06 мкм, Дж/м ²	5×10 ⁻⁹ –10 ⁻⁴
Погрешность воспроизведения облученности, энергетической экспозиции, яркости и др. в зависимости от уровня, %	10–25

$$E = P/(Ar). \quad (4)$$

В силу сложности установки и юстировки калибруемой аппаратуры, а также нестабильной мощности лазеров необходим ее текущий контроль. Задача решается с помощью светоделиителя, который отводит часть излучения на референтный приемник излучения. Текущая облученность в пучке определяется по сигналу этого приемника $u(t)$, коэффициенту пропускания калиброванных ослабителей и коэффициенту передачи стенда по облученности $K(E)$. Он находится при проверке стенда по формуле

$$K(E) = P(t)/[Aru(t)]. \quad (5)$$

Аналогично формируется пучок с известной энергетической экспозицией. Для передачи единицы энергии от калориметров применяется компаратор на базе фотодиода.

Для “заполнения” коллиматора диаметром 450 мм применяются линзы, которые вместе с коллиматором образуют телескопические расширители, или рассеиватели. В этом случае проводится серия измерений при небольших поперечных смещениях рассеивателя, что приводит к осреднению результата по ряду независимых спекл-картин.

Обработка и хранение данных осуществляются с помощью вычислительного комплекса. Он же применяется для программного управления автоматизированными узлами снятия зонных и угловых зависимостей чувствительности приборов и фотоприемных устройств, стабилизации и плавного регулирования мощности на длине волны 10,6 мкм [17]. Для исследования спектральных характеристик используется канал, содержащий монохроматор МДР-23, источники излучения (лампы ДДС-30, КГМ-12-100 и др.) и неселективные приемники излучения. Импульсы для контроля динамических характеристик ФПУ формируются из непрерывно-

го излучения с помощью дискового обтюлятора или зеркального модулятора [18]. На стенд ИС-101 получено свидетельство Госстандарта, регламентирующее его использование в качестве рабочего средства для калибровки лазерной аппаратуры данного класса. За время эксплуатации на стенде проходили государственную и ведомственную аттестацию, периодическую поверку и калибровку приборы пяти типов. Стенд регулярно оснащается новой аппаратурой и применяется для исследования характеристик новой пассивной и активной аппаратуры [19, 20].

Еще одно направление работ связано с измерениями коэффициентов яркости и двунаправленных коэффициентов отражения или пропускания материалов и покрытий на лазерных длинах волн. Основным достижением является создание гониофотометрической установки, имеющей разрешение 20' и диапазон измерения углов падения и наблюдения от –85° до 85°, а также оригинальной методики измерений. Они позволяют определять полусферические коэффициенты отражения (рассеяния) без образца сравнения с ошибкой менее 10%. Динамический диапазон работы приемной части – 100 000. На установке промерялся широкий набор материалов и покрытий на длинах волн 0,63 и 10,6 мкм. Полученные данные хорошо согласуются с результатами других исследований [21], а по широте охвата материалов и покрытий превосходят их. В статье [22] опубликованы результаты измерения рассеяния на разных зеркалах, установлена их взаимосвязь с режимами обработки и нанесения покрытий.

Уникальная аппаратура и возможность вывода излучения на оптическую трассу длиной 2,6 км, оснащенную оборудованием для контроля метеопараметров атмосферы и дальности видимости, позволяют изучать отражение лазерного излучения искусственными и природными объектами, его рас-

сеяние в атмосфере. В частности, выполнен большой объем натуральных измерений коэффициентов яркости материалов и покрытий в обратном направлении на длине волны 10,6 мкм, что позволило скорректировать результаты лабораторных исследований индикатрис рассеяния. Проведено несколько циклов натуральных исследований (макет “Луч”) индикатрис прямого и обратного рассеяния приземной атмосферы на длинах волн 248, 351 и 1064 нм, в том числе в туманах и дымках.

В рамках натуральных экспериментов собран обширный материал по рассеянию в атмосфере излучения с длиной волны 10,6 мкм. Измерения проводились прибором ИФ-301 [23, 24]. Для описания индикатрис рассеяния предложено соотношение

$$\rho(\theta) = A \exp(-B\theta) + C. \quad (6)$$

Параметр B определяет ширину индикатрис рассеяния, которые оказались вытянутыми намного сильнее, чем предполагалось по литературным данным. Эксперименты показали, что значение $\rho(\theta)$ приближается к асимптотическому значению C при углах 45° – 50° . Интересным оказалось то, что для индикатрис, полученных в разную погоду и разные сезоны, параметр B меняется в пределах от 0,11 до 0,18, а средняя величина равна 0,15.

С помощью прибора “Луч-1” и переносного УФ коллиматора проведены измерения пропускания

приземного слоя атмосферы в диапазоне 200–400 нм. На рис. 6 показаны зависимости коэффициента ослабления в диапазоне, охватывающем длины волн большинства УФ лазеров: криптон–хлор (222 нм), криптон–фтор (248 нм), 4-я гармоника неодима (266 нм), ксенон–бром (282 нм), ксенон–хлор (308 нм), гелий–кадмиевый (325 нм), азотный (337 нм), ксенон–фтор (351 нм), 3-я гармоника неодима (355 нм). Маркерами на графиках показаны точки, соответствующие этим длинам волн. S_m – метрологическая дальность видимости.

В 2006 году завершена разработка аппаратуры “Картинка-2” для исследования отражательных характеристик оптико-электронных приборов (ОЭП) [20] на дистанциях до 2 км. Мобильный комплекс из состава аппаратуры “Картинка-2” включен в Государственный реестр РФ в качестве средства измерения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) ОЭП на длинах волн 0,355, 0,532, 1,064, 1,54 и 10,6 мкм. Он показан на фото рис. 7 и включает приемопередающий модуль, три малогабаритных импульсно-периодических лазера, сменные ФПУ и меры сравнения. В ходе работы предложены и реализованы на практике схема привязки (поверочная схема) к эталонам коэффициентов отражения на лазерных длинах волн, а также новые методы измерения ЭПР и коэффициентов яркости методом сравнения. Для минимизации случайной составляющей

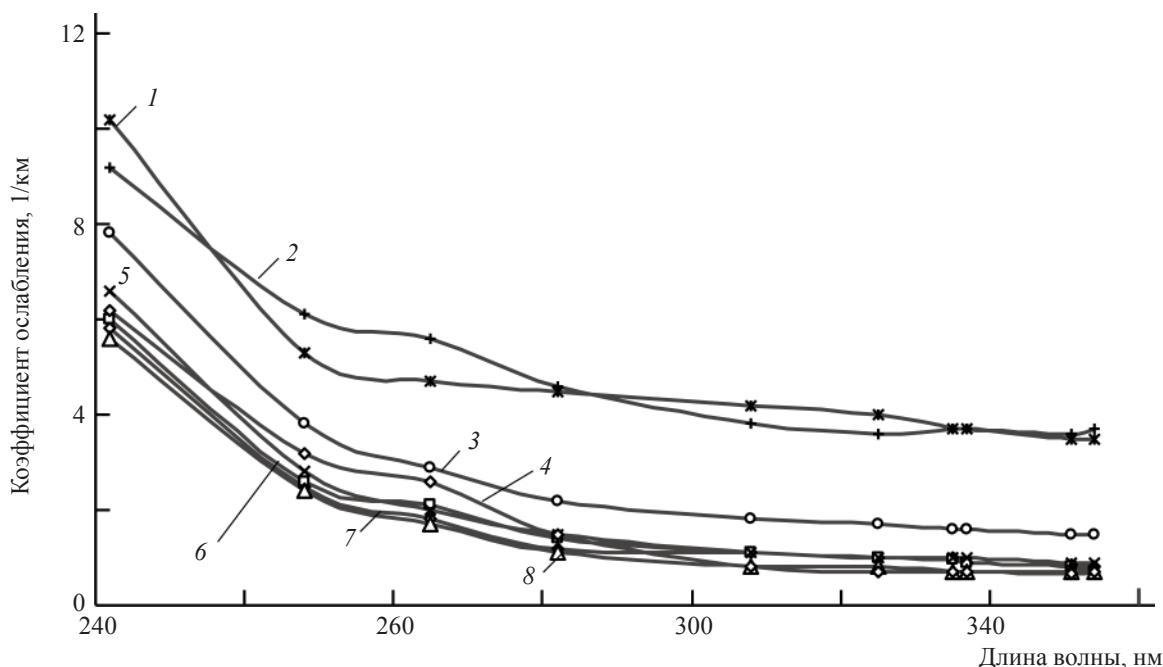


Рис. 6. Натуральные коэффициенты полного ослабления на горизонтальной приземной трассе. 1 – январь, снег, $S_m \approx 1$ км; 2 – июль, ливень, $S_m < 1$ км; 3 – январь, слабый снег, $S_m \approx 5$ –10 км; 4 – июль, после ливня, $S_m > 10$ км; 5 – ноябрь, мелкий дождь; 6 – июнь, $S_m > 10$ км; 7 – август, $S_m > 10$ км; 8 – ноябрь, $S_m > 10$ км.



Рис. 7. Мобильный измерительный комплекс.

погрешности, вызванной неоднородностью и временной нестабильностью РЛИ, в рамках каждого отсчета сигналов от меры сравнения U_{oi} и объекта U_i осуществляется осреднение нескольких сотен лазерных импульсов за время 0,2–0,5 с, а искомый результат находится по серии из $n = 5–7$ пар отсчетов с помощью формулы

$$\sigma = \sigma_0(1/n)\Sigma_n(U_i/U_{oi}). \quad (7)$$

В качестве меры сравнения σ_0 применяется световозвращатель с детерминированно-изменяемой величиной ЭПР [25].

Теоретические и экспериментальные исследования рассеянного лазерного излучения показали, что для описания его энергетических показателей следует пользоваться средними значениями облученности $\langle E \rangle$ и яркости $\langle L \rangle$, а в случае регистрации коротких импульсов оперировать средними величинами энергетической экспозиции $\langle H \rangle$ и интегральной за время импульса яркости $\langle \Lambda \rangle$. Для достоверности оценок нужно выполнять ряд статистически независимых отсчетов. Для этого достаточно перемещать рассеивающую поверхность на величину большую, чем длина волны падающего излучения. При дистанционных измерениях это условие, как правило, реализуется автоматически вследствие турбулентности атмосферы и вибраций лазера, если интервал между отсчетами превышает 10–100 мс (замороженная атмосфера). В случае уникальных однократных экспериментов регистрирующий прибор

нужно располагать так, чтобы изображение пятна на рассеивающей поверхности (или рассеивающего объема) занимало большую часть чувствительной площадки приемника излучения, но не выходило за ее пределы. В этом случае меньшие относительные флуктуации δE и при измерении средней по полю зрения яркости δL реализуются прибором, имеющим большее относительное отверстие. В лабораторных и производственных установках для усреднения рассеивающую поверхность целесообразно непрерывно вращать или смещать, а также использовать излучатели с меньшей пространственной и временной когерентностью, например, светодиоды вместо полупроводниковых лазеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laser Speckle and Related Phenomena / Ed. by J.C. Dainty. 1984. 170 p.
2. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 512 с.
3. Глуценко Л.А., Попов И.А., Сакия А.С., Старченко А.Н. Статистика спеклов применительно к задаче фотометрирования диффузно-отраженного когерентного излучения // Тез. докл. 12 Всесоюз. семинара “Импульсная фотометрия”. Л.: 1988. С. 36.
4. Глуценко Л.А., Попов И.А., Щербакова Н.И. Автокорреляционная функция рассеянного в молочном стекле когерентного излучения // ОМП. 1990. № 3. С. 71–72.

5. Глуценко Л.А., Попов И.А., Старченко А.Н. Оценка дисперсии флуктуаций облученности и энергетической яркости при измерении рассеянного частично когерентного излучения // ОМП. 1989. № 12. С. 13–16.
6. Грязнов М.И. Обобщенные параметры непрерывного излучения // Импульсная фотометрия. Сб. статей. Л.: Машиностроение, 1986. В. 9. С. 26–28.
7. Веселов Л.М., Попов И.А. Статистические характеристики рассеянного на вращающейся поверхности когерентного излучения в плоскости изображения оптической системы // Опт. и спектр. 1990. Т. 69. В. 5. С. 1111–1114.
8. Popov I.A., Sidorovsky N.V., Veselov L.M. Experimental study of intensity probability density function in a speckle pattern formed by small number of scatterers // Opt. Commun. 1993. V. 97. № 5–6. P. 304–306.
9. Popov I.A., Veselov L.M. Vibration analysis by means of speckle method // Optik. 1993. V. 90. № 3. P. 119–122.
10. Квантовая электроника. Термины и определения. ГОСТ 24453-80.
11. Фотометрия. Термины и определения. ГОСТ 26148-84.
12. Попов И.А., Самян А.С., Старченко А.Н., Филиппов О.К. Исследование энергетической освещенности и яркости коллимированного пучка когерентного инфракрасного излучения // Тез. докл. 5 Всесоюз. конф. “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”. М.: Госстандарт, ВНИИОФИ, 1984. С. 42.
13. Евченко Ю.Н., Мартюхина Л.И., Шутов В.Г. Универсальный цифровой ИК фотометр // Тез. докл. 12 Всесоюз. семинара “Импульсная фотометрия”. Л.: 1988. С. 52.
14. Косенко Н.К., Мартюхина Л.И., Пивовар Н.И., Попов И.А., Самян А.С., Старченко А.Н., Филиппов О.К. Установка для энергетической калибровки приемных устройств оптического излучения со световым диаметром до 450 мм // ПТЭ. 1986. № 3. С. 245.
15. Попов И.А., Старченко А.Н. Градуировка фотометров для измерения рассеянного лазерного излучения // Тез. докл. 7 Всесоюз. конф. “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”. М.: Госстандарт, ВНИИОФИ, 1988. С. 32.
16. Попов И.А., Самян А.С., Старченко А.Н., Филиппов О.К. Об особенностях калибровки спектрорадиометра по энергетической яркости инфракрасного лазерного излучения // ЖПС. 1986. Т. 45. № 5. С. 769–773.
17. Самян А.С., Старченко А.Н. Автоматизированная установка для градуировки лазерных фотометров // Тез. докл. 8 Всесоюз. конф. “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”. М.: Госстандарт, ВНИИОФИ, 1990. С. 183.
18. Самян А.С. Оптико-механический формирователь импульсного когерентного излучения // ОМП. 1990. № 1. С. 60–63.
19. Ремизов С.А., Старченко А.Н. Лабораторная установка для измерения параметров оптических когерентных систем // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 9. С. 1870–1872.
20. Попело В.Д., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н. Экспериментальный образец межвидовой многоспектральной аппаратуры “Картинка-2” // Тез. докл. Всерос. научно-технич. конф. “Направления совершенствования методов и средств снижения заметности для разработки перспективных образцов вооружения и военной техники”. Воронеж. 2006. С. 162–165.
21. Непогодин И.А., Тиранов Д.Т., Москалев В.Н., Иванов В.Ф. Гониофотометр для исследования диаграмм обратного рассеяния земных подстилающих поверхностей // Оптический журнал. 1993. № 9. С. 25–28.
22. Бронников В.И., Веселов Л.М., Сидоровский Н.В., Скрелин А.Л. Исследование рассеяния излучения с длиной волны 10,6 мкм зеркальными поверхностями // ОМП. 1989. № 6. С. 9–13.
23. Сидоровский Н.В., Старченко А.Н. Исследование рассеяния излучения CO₂-лазера в атмосфере // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 9. С. 24–28.
24. Окулов В.Л., Резунков Ю.А., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н. Особенности аэрозольного рассеяния излучения импульсно-периодического CO₂-лазера в атмосфере // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 11. С. 34–38.
25. Еришов В.А., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н. Световозвращатель // Патент России № 2149431. 1997.