

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 543.422.4.551.510.522

Ю.А. Ивакин, А.П. Черепанов, Р.Ш. Цвык, И.Я. Шапиро, Ю.Ф. Яцкеев

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОСЛАБЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА $\lambda = 10,6$ мкм

Обсуждаются технические требования к построению лазерного измерителя коэффициентов ослабления излучения с целью повышения точности измерений на приземных трассах. Обосновывается необходимость «полного перехвата» потока излучения на трассе с целью уменьшения влияния на точность измерений блуждания оси потока, перераспределения энергии по поперечному сечению и уширения потока в турбулентной атмосфере. Приводится блок-схема измерителя на $\lambda = 10,6$ мкм. Экспериментально исследованы технические характеристики прибора. Показано, что на трассе 0,5 км относительная среднеквадратическая погрешность составила 6% в диапазоне измерений коэффициентов ослабления (0,06–4,00) км⁻¹. Автоматическая компенсация углов регулярной рефракции производится в пределах 1'.

Развитие средств оптической локации и связи, светодальнометрии и тахеометрии требует решения задачи радиационной эффективности используемых источников света в атмосферном канале [1]. Важное место в этой задаче занимает измерение прозрачности атмосферы. Вопросам разработки методики и приборных реализаций измерения спектральной прозрачности атмосферы посвящено немало работ, например [2–4], в которых мало внимания, на наш взгляд, уделяется лазерным приборам, позволяющим измерять радиационную эффективность непосредственно на интересующей нас линии излучения.

В данной работе сделана попытка обобщить опыт, накопленный авторами при разработке и исследовании лазерного измерителя коэффициентов ослабления излучения атмосферы на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм.

Независимо от используемых источников при измерении ослабления излучения в атмосфере необходимо учитывать влияние геодезической регулярной рефракции, случайных блужданий оси пучка и его уширение из-за турбулентности атмосферы, а также перераспределение энергии в поперечном сечении пучка. Влияние последнего фактора в области сильных флуктуаций при значениях параметра $\beta_0^2 = 1,23 C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6} \gg 1$ (C_n^2 — структурная постоянная пульсаций показателя преломления атмосферы; L — длина трассы; $k = 2\pi/\lambda$) возрастает из-за интерференции отдельных участков волнового фронта и ведет к сильным флуктуациям принимаемого сигнала [5] вплоть до полного его замирания.

Малая по сравнению с тепловыми и другими некогерентными источниками угловая расходимость потока излучения лазера дает возможность осуществить «полный перехват» потока, т.е. обеспечить выполнение условия

$$R \gg a_3, \quad (1)$$

где R — радиус приемной апертуры измерителя; a_3 — эффективный радиус пучка в конце атмосферной трассы; на трассах ($L \leq 1000$ м) с приемлемыми габаритами оптической приемной системы, что позволяет существенно снизить влияние вышеперечисленных факторов на точность измерений коэффициентов ослабления излучения в атмосфере. Для Гауссова пучка [5]

$$a_3 = a_0 \left[\left(1 - \frac{L}{F} \right)^2 + \Omega^{-2} \left(1 + \frac{a_0^2}{\rho_k^2} + \frac{4}{3} \frac{a_0^2}{\rho_0^2} \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где a_0 — начальный радиус пучка; F — радиус кривизны волнового фронта в центре излучающей апертуры; $\Omega = \frac{ka_0^2}{L}$ — параметр Френеля излучающей апертуры; ρ_k — радиус когерентности поля

источника; $\rho_0 = (1,45k^2 \cdot C_n^2 \cdot L)^{-3/5}$ — радиус когерентности плоской волны. При «полном перехвате» потока излучения на трассе турбулентное уширение энергии по поперечному сечению потока не ведет к флуктуациям принимаемого сигнала. Флуктуации интенсивности из-за статистического экранирования потока частицами малы и осреднением минимизируются. Регулярную рефракцию как для когерентных, так и для некогерентных источников необходимо компенсировать в процессе измерений.

Схема измерений с «полным перехватом» позволяет оперативно калибровать измеритель установкой на выходе оптико-механического тракта зеркала, возвращающего поток излучения в приемную систему. Погрешность калибровки при учете разницы коэффициентов отражения рабочего и калибровочного зеркала определяется лишь инструментальной погрешностью измерителя.

Выполнение этих условий при малой инструментальной погрешности может обеспечить измерение коэффициентов ослабления на коротких трассах даже в условиях высокой прозрачности атмосферы с погрешностью, не уступающей фотометрическим методам на трассах длиной несколько километров без «полного перехвата» потока. Представляет практический интерес определение требований к инструментальной погрешности такого измерителя при заданном диапазоне измерений коэффициентов ослабления в зависимости от длины трассы.

При измерениях по наиболее распространенному базисному методу коэффициент ослабления определяется из закона Бугера

$$\alpha = -\frac{1}{L} \ln \frac{P}{P_0}, \quad (3)$$

где P, P_0 – потоки излучения, соответственно прошедший трассу в атмосфере и посылаемый на трассу в атмосфере; L – длина трассы. При построении измерителя, выходной сигнал которого

$$U_{\text{вых}} = \ln \frac{U_0}{U} = \ln U_0 - \ln U \quad (4)$$

с учетом калибровки, коэффициент ослабления определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\gamma (U_{\text{вых}} - U_{\text{вых.к}})}{L}, \quad (5)$$

где γ – коэффициент, равный 1 В^{-1} , введенный для сохранения размерности α ; U_0, U – сигналы соответственно в опорном и рабочем каналах измерителя, пропорциональные мощности потоков излучения; $U_{\text{вых}}, U_{\text{вых.к}}$ – выходные сигналы при измерениях соответственно на рабочей трассе и при калибровке измерителя, В.

Продифференцировав выражение (5), пренебрегая погрешностью из-за неточности определения длины трассы ввиду ее малости, получим абсолютную погрешность определения коэффициентов ослабления

$$\Delta\alpha = \frac{(\Delta U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{вых.к}}) \cdot \gamma}{L}. \quad (6)$$

Исходя из заданного значения $\Delta\alpha$ и полученной при испытаниях инструментальной погрешности $\Delta U_{\text{вых}}$, можно выбрать оптимальные длину трассы L и зависящие от трассы габариты приемной оптической системы измерителя. Так, например, чтобы обеспечить погрешность $\Delta\alpha = 0,002 \text{ км}^{-1}$ на трассе $L = 0,5 \text{ км}$, $\Delta U_{\text{вых}}$ должна быть меньше или равна $5 \cdot 10^{-4} \text{ В}$. На трассе $L = 0,1 \text{ км}$ при том же значении $\Delta U_{\text{вых}}$ $\Delta\alpha = 0,01 \text{ км}^{-1}$.

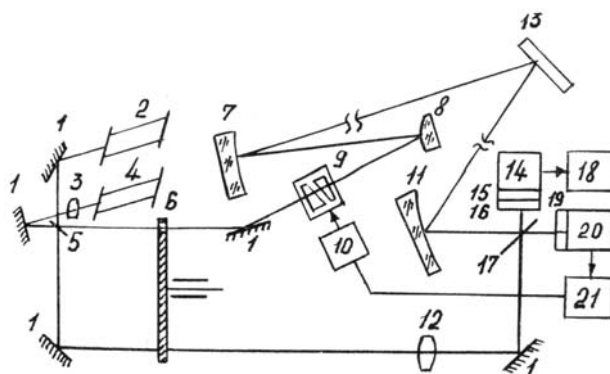


Рис. 1. Блок-схема лазерного измерителя коэффициентов ослабления: 1 – зеркало; 2 – He–Ne-лазер; 3 – корригирующая линза из ВаF₂; 4 – CO₂-лазер; 5 – полупрозрачная пластина из ВаF₂; 6 – модулятор; 7, 8 – внеосевые асферические зеркала передатчика; 9 – оптические клинья из ВаF₂; 10 – исполнительный механизм клинового компенсатора; 11 – внеосевое асферическое приемное зеркало; 12 – фокусирующая линза из ВаF₂; 13 – зеркало отражателя; 14 – пироэлектрический болометр; 15 – дисперсионный фильтр; 16, 19 – ослабляющие фильтры; 17 – полупрозрачная пластина из ВаF₂;

18—блок преобразования; 20—четырёхплощадочный пироэлектрический болометр; 21—блок управления клиновым компенсатором

На рис. 1 представлена блок-схема лазерного измерителя коэффициентов ослабления. Измеритель работает по базисному фотоэлектрическому методу с приемом опорного и прошедшего трассу в атмосфере потоков излучения на один пироэлектрический болометр 14 с чувствительной площадкой 4×4 мм. В качестве рабочего источника излучения используется стабилизированный по мощности одночастотный лазер на CO₂ ЛГ-74 с автоподстройкой частоты, работающий на одном из трех переходов P(18); P(20); P(22).

Совмещение потоков излучения рабочего CO₂- и юстировочного He—Ne-лазеров происходит на полупрозрачной для обеих длин волн пластине 5 из BaF₂. Диск модулятора 6 прерывает совмещенный поток излучения с частотой 391±1 Гц и коммутирует потоки опорного и измерительного каналов на приемник 14 с частотой 16,25±0,04 Гц. Полупрозрачная BaF₂ пластина 17 разделяет принимаемый поток с трассы на измеряемый и контрольный. Контроль за положением принимаемого потока относительно оптической оси приемного зеркала осуществляется с помощью четырехплощадочного пироэлектрического болометра 20. По сигналам отклонения по координатам X и Y клиньями 9 из BaF₂ производится автоматическая компенсация регулярной рефракции атмосферы в пределах ±1'. При больших углах рефракции компенсация осуществляется дистанционным управлением привода отражателя 13 с зеркалом диаметром 500 мм. Зеркала 7, 8 передатчика и приемное зеркало 11 (F = 780 мм, Ø250 мм)—асферические внеосевые. С пироэлектрического болометра 14 сигнал поступает на вход блока преобразования 18 [6], выходной сигнал которого равен натуральному логарифму отношения сигналов в опорном и рабочих каналах.

Для оперативного контроля коэффициента передачи блока преобразования в измеритель встроен электронный калибратор, формирующий сигнал, по форме идентичный с сигналом пироэлектрического болометра с регулируемым перепадом уровней в опорном и рабочем каналах. Контроль и регулировка коэффициента передачи осуществляется при периодической коммутации выхода калибратора на вход блока преобразования.

Регистрация выходного сигнала осуществляется цифровым вольтметром постоянного тока или микроЭВМ с АЦП с выводом значений коэффициентов ослабления, полученных в соответствии с формулой (5), на цифropечать.

Технические характеристики измерителя

Рабочая длина волны	— 10,6 мкм
Юстировочная длина волны	— 0,63 мкм
Диапазон измерения	
коэффициентов ослабления на трассе $L = 0,5$ км	— 0,06—4,00 км ⁻¹
Среднеквадратическая погрешность	
определения коэффициентов ослабления на трассе $L = 0,5$ км	— 6%
Диапазон компенсации регулярной рефракции	— 1'
Габариты приемопередающего устройства	— 770×570×1040 мм

Основным источником погрешности измерений является нелинейность преобразования. Контроль преобразования оптико-электронного тракта путем установки в рабочем канале перед пироэлектрическим болометром калиброванных ослабляющих фильтров из CaF₂ разной толщины не позволил определить нелинейность преобразования из-за большой паспортной погрешности (±1%) коэффициентов пропускания фильтров. Отдельно определялась нелинейность блока преобразования путем подачи на вход блока с калибратора регулируемого уровня перепада сигналов опорного и измерительного каналов, измеренных с большой точностью (0,06%), с последующим сравнением значения выходного сигнала с рассчитанным значением в соответствии с формулой (4). Относительная систематическая погрешность преобразования по диапазону измерений меняется от -3,5% до +1,3%.

Выбранные частоты модуляции и коммутации опорного и рабочего каналов на пироприемник устраняют влияние низкочастотной нестабильности мощности источника излучения.

Проверка прибора проводилась в летне-осенний период 1988 г. в прибрежной зоне озера Балхаш на трассе до отражателя 179,4 м; одновременно измерялись температура, относительная влажность, давление окружающей среды в начале трассы, а также значение структурной характеристики показателя преломления воздуха C_n^2 [7].

Контроль перехвата потока излучения приемным зеркалом осуществлялся при развитой турбулентности ($C_n^2 \approx 10^{-15}$ см^{-2/3}) путем последовательной установки на апертуру приемного зеркала кольцевых диафрагм разного диаметра от меньшего к большему и фиксации выходного сигнала измерителя при каждой установленной диафрагме. Считалось, что диаметр сечения потока, проходящего с трассы, равен диаметру диафрагмы, при увеличении которой выходной сигнал не меняется. Диаметр потока излучения, определенный по данной методике, при указанном значении C_n^2 на трассе до от-

ражателя $L = 179,4$ м оказался равным 210 мм. Полученная среднеквадратическая абсолютная погрешность измерений коэффициентов ослабления $\Delta\alpha$ равнялась $0,006 \text{ км}^{-1}$ с доверительной вероятностью $P = 95\%$ для числа наблюдений $n = 10$.

Расчитанное по формуле (2) значение $a_3 = 5,15$ см при $a_0 = 5$ см показывает, что в нашем случае диаметр $D_{\text{сеч.п}}$ и, следовательно, длина трассы определяются коэффициентом усиления и качеством оптики передатчика.

Работоспособность устройства компенсации регулярной рефракции атмосферы проверялась на трассе $L = 200$ м по выходному сигналу измерителя при дискретном угловом отклонении лазерного пучка паспортизованной парой оптических клиньев из BaF_2 , установленных на выходе передатчика. Дискрет составлял 2,4 угл. с. Считалось, что угол отклонения компенсируется, если выходной сигнал измерителя после компенсации не изменяется. Диапазон компенсации составил 1 угл. мин. Крутизна пеленгационной характеристики по координатам X и Y составила 0,9 мВ на угловую секунду. По измеренным значениям метеопараметров в соответствии с [8, 9] проводился расчет сплошного поглощения парами воды и поглощения на линии перехода $P(20)$ углекислого газа. На рис. 2 (кривые 1, 1', 2, 2') представлены примеры результатов измерений и расчетов, проведенных 28.06.88 г. и 2.07.88 г. в дни, когда при небольших колебаниях температуры воздуха относительная влажность изменялась в широких пределах. Представленные результаты наглядно иллюстрируют хорошую корреляцию между измеренными и расчетными значениями коэффициентов ослабления. Систематическое превышение измеренного коэффициента ослабления над расчетным, достигающее до $0,04 \text{ км}^{-1}$, по-видимому, можно объяснить ослаблением на «гигантских» частицах, образование которых характерно для прибрежной зоны [10]. Измерения, проведенные осенью (25.10.88 г.) при иной атмосферной ситуации, такой корреляции не выявили (кривые 3, 3'), что, видимо, объясняется влиянием аэрозольной составляющей ослабления, которая не учитывалась при расчете кривой 3'.

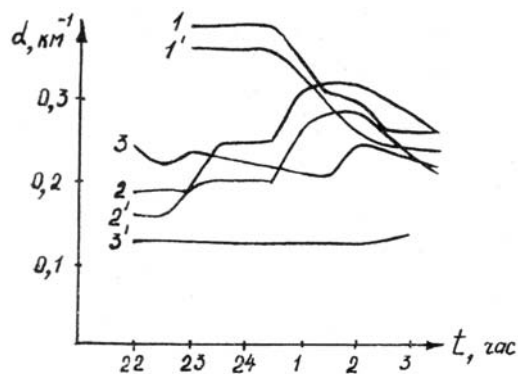


Рис. 2. Результаты измерений и расчета коэффициентов ослабления излучения на $\lambda = 10,6$ мкм в прибрежной зоне озера Балхаш: 1, 2, 3 — измеренные значения соответственно 2.07.88, 28.06.88 и 25.10.88 г.; 1', 2', 3' — расчетные значения

Полученные результаты дают основание утверждать, что разработанный лазерный измеритель позволяет на трассе длиной около 500 м, с оперативно осуществляемой калибровкой, измерять значения коэффициентов ослабления на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм в диапазоне $0,06-4,00 \text{ км}^{-1}$ с относительной погрешностью не хуже 6%. Устройство может быть использовано при комплексном исследовании параметров атмосферы.

1. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Советское радио, 1970. 496 с.
2. Филиппов В. Л. и др. //Оптико-механическая промышленность. 1979. № 6. С. 24.
3. Вагин Н. И., Ваулин П. П., Денчик Б. Н., Цвык Р. Ш. //Оптика атмосферы, 1988. Т. 1. № 6. С. 90—97.
4. Кабанов М. В., Кабанов Д. М., Сакерин С. М. //Оптика атмосферы, 1988. Т. 1. № 1. С. 107—114.
5. Беленький М. С., Лукин В. П., Миронов В. Л. и др. Когерентность лазерного излучения в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1985. 173 с.
6. Плюснин И. И., Яцкеев Ю. Ф. //Измерительные приборы для исследования параметров приземных слоев атмосферы. Томск: ИОА ТФ СО АН СССР, 1977. С. 111.
7. А. с. 934427 СССР. Устройство для измерения структурной характеристики показателя преломления атмосферы /Цвык Р. Ш., Шапиро И. Я. Опубл. в БИ, 1982. № 21.
8. Арефьев В. Н., Дианов-Клоков В. И. //Квантовая электроника, 1976. Т. 3. № 4. С. 923.
9. Graig S. E., Morgan D. R., Roberts D. L., Showma L. R. //EPA 650/2—74—046—a. 1974. V. 1. P. 88.
10. Панченко М. В., Пхалагов Ю. А., Тумаков А. Г., Ужegov В. Н. // V Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докладов). Томск: ИОА СО АН СССР, 1979. С. 29—32.

Yu. A. Ivakin, A. P. Cherepanov, R. Sh. Tsvyk, I. Ya. Shapiro,
Yu. F. Yatskeev. **A Laser Device for Measuring the Extinction Coefficient at $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.**

Some technical requirements to the design of laser measurers of radiation extinction coefficients aimed at improving the accuracy of measurements along the paths in the boundary layer are discussed in the paper. It is shown in the paper that full interception of sounding beam by a receiving aperture is needed in order to eliminate the influence of beam wandering, random energy redistribution over the beam cross section and of the beam expansion to the measurement accuracy. Block-diagram of the device operating at $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ is also presented in the paper. The characteristics of the device were tested experimentally. It was shown that the RMS-error of the extinction coefficient measurements along the path of 0,5 km length was 6%, the extinction coefficient values being from 0,06 to 4,0 km. An automated correction for angles of regular refraction within 1' angular minute is performed.