

Метод поэлементной калибровки оптико-электронного измерителя атмосферных осадков

В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, А.А. Тихомиров, Д.Е. Филатов*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 3.08.2021 г.

Проведен обзор методик калибровки оптических измерителей характеристик атмосферных осадков. Проанализированы недостатки существующих методик калибровки оптико-электронного измерителя осадков ОПТИОС и предложены способы их устранения. Подробно описан оригинальный запатентованный метод калибровки оптического осадкомера, позволяющий повысить точность определения размеров гидрометеоров за счет учета эффективного размера каждого светочувствительного элемента линейного сенсора. Сделан вывод об универсальности предложенного метода калибровки, что позволяет использовать его для повышения показателей точности любых оптических измерителей линейных размеров различных объектов, использующих в качестве измерительного преобразователя линейный массив светочувствительных элементов.

Ключевые слова: осадкомер, калибровка, размер капель, оптический измеритель линейных размеров; optical precipitation gauge, calibration, drop size, optical meter of linear dimensions.

Введение

Оптические приборы для измерения линейных размеров различных объектов давно и широко применяются во многих областях человеческой деятельности. Использование современных многоэлементных оптико-электронных преобразователей, обеспечивающих высокоскоростную обработку и передачу измерительных данных, позволило создать целый ряд оптических измерителей параметров атмосферных осадков, использующих принцип определения размеров и скоростей отдельных гидрометеоров (капель дождя, снежинок, градин и т.д.) и рассчитывающий на их основе в режиме реального времени интегральные характеристики (интенсивность и общее количество) осадков [1–4]. Этот же принцип лежит в основе действия разработанного в ИМКЭС СО РАН оптического осадкомера ОПТИОС [5].

Изготовление любого измерительного устройства, как правило, включает в себя процесс его калибровки, которая позволяет уменьшить разницу между реальной и измеренной величинами. Процедура калибровки зачастую сопровождается цифровой обработкой сигналов, получаемых с преобразователей, математической обработкой измерительных данных и сложной настройкой самого устройства.

Вычислительные системы на базе современных микроконтроллеров предоставляют возможность применения все более сложных методик калибровки с использованием новых алгоритмов обработки

и анализа данных, что ведет к повышению производительности измерительных устройств и точности измерений.

Единого стандарта для калибровки оптических измерителей линейных размеров частиц не существует. Поэтому при калибровке оптических осадкомеров применяются различные методики. Например, приборы [1, 2], измеряющие распределение частиц осадков по размерам (дисдрометры), калибровались с использованием металлических шаров различного диаметра (до 10 мм). Для калибровки лазерного дисдрометра PARSIVEL [3] применялись стеклянные сферы и капли этанола и воды размерами от 0,28 до 4,29 мм. Оптический осадкомер [4] калибровался с помощью непрозрачных кругов диаметром от 0,50 до 4,75 мм, наклеенных на вращающийся с заданной скоростью прозрачный диск. Регулировка масштабирования и фокусировка прибора SVI (Snowflake Video Imager) осуществлялась с помощью линейки, расположенной на расстоянии 2 м от объектива [6]. Для калибровки измерителя параметров снежинок MASC (Multi-Angle Snowflake Camera) применялась калибровочная мишень [7]. Измеритель частиц облаков CPI (Cloud Particle Imager) [8] калибровался стеклянными шарами. Датчик текущей погоды на базе оптического дисдрометра Thies LPM (Laser Precipitation Monitor) [9] калибровался на специальном калибровочном стенде, состоящем из прецизионного дозирующего насоса и генератора капель с системой 2D-позиционирования.

Первая версия процедуры калибровки оптико-электронного осадкомера ОПТИОС была предложена в [10]. Она основана на измерении размеров эталонных стальных шаров диаметром 5,01 мм,

* Владимир Викторович Кальчихин (vvk@imces.ru); Алексей Анатольевич Кобзев (kaa@imces.ru); Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru); Дмитрий Евгеньевич Филатов (dmitrii.04101995@gmail.com).

отпускаемых в свободное падение через измерительную площадку прибора, которая условно разбивается по ширине на 8 участков. Калибровочные параметры рассчитываются для каждого из этих участков в виде разности реального диаметра эталонного шара и среднего значения ста результатов его измерений. Применение такой калибровки позволило частично компенсировать несовершенство оптической системы и достичь относительной погрешности 5% при измерении средних и крупных (более 2 мм) шаров.

Известно [11], что размеры наибольшего количества капель дождя — от 0,5 до 1,5 мм. Поэтому для уменьшения погрешности измерения более мелких шаров, которая на некоторых участках достигала 30%, в [12] была предложена оптимизированная процедура калибровки. Основные идеи оптимизации: использование эталонных шаров диаметром 2,99 мм, введение дополнительной калибровки шарами диаметром 1 мм, а также применение для объектов с размерами менее 2 мм калибровочных коэффициентов, зависящих от измеренного диаметра и рассчитываемых с помощью линейной интерполяции. Применение оптимизированной процедуры калибровки сократило относительные погрешности измерений для малых объектов с десятков до единиц процентов.

В качестве менее трудоемкого и более точного варианта калибровки оптического осадкомера в [13] предложена процедура, предполагающая вместо многократного измерения диаметра эталонных шаров, осуществляемого последовательно на определенных участках измерительной площадки, использовать непрерывное измерение диаметра эталонного непрозрачного цилиндрического стержня при его однократном горизонтальном перемещении перпендикулярно направлению светового потока. Такая процедура обеспечивает лучшую по сравнению с калибровкой отдельными шарами компенсацию недостатков оптической системы измерителя осадков за счет того, что калибровочные коэффициенты являются непрерывной функцией положения эталонного объекта в измерительной области, а не дискретно зависят от небольшого количества условно выделенных участков, через которые измеряемый объект пересекает измерительную площадку. Однако этот способ, как и все предыдущие, не учитывает тот факт, что светочувствительные элементы линейных сенсоров, как правило, имеют разные размеры, а в технических характеристиках указываются лишь их средние значения. Это обстоятельство может существенно влиять на результаты измерений размеров мелких частиц, тени которых затемняют лишь несколько элементов, а также понижать точность измерения крупных частиц. Кроме того, калибровка эталонными объектами определенного размера обеспечивает приемлемую точность измерения размеров объектов только в узком диапазоне размеров, близких к диаметру эталона. Например, процедура калибровки оптического осадкомера шарами или стержнем диаметром 5 мм не обеспечивает достаточной точности определения размеров малых (до 2 мм и менее) и круп-

ных частиц осадков (7 мм и более) [10]. При этом для приборов, определяющих интегральные характеристики осадков на основе измерения их микроструктурных параметров (к числу которых относится и ОПТИОС), задача повышения точности измерения размеров каждой частицы очень важна.

Для снижения погрешностей измерений, вызванных неоднородностью светового потока и вариациями размеров светочувствительных элементов, а также для устранения зависимости этой погрешности от размеров эталонных объектов нами предложен метод калибровки любых оптических измерителей линейных размеров, реализованных на основе линейного массива светочувствительных элементов (линейного сенсора). Этот метод позволяет при определении реального размера регистрируемого объекта учитывать эффективный размер каждого элемента массива [14]. Процедура калибровки при этом, как и в методике [13], заключается в измерении линейных размеров теней непрозрачного цилиндрического стержня, горизонтально перемещаемого через измерительный канал перпендикулярно направлению светового потока с сохранением ортогональности оси стержня относительно плоскости измерительной площадки. На всем пути стержня непрерывно анализируется количество и положение затененных элементов, рассчитывается размер тени и сопоставляется с диаметром стержня.

В отличие от [13], для анализа формируется двумерный массив калибровочных данных из единиц и нулей, соответствующих затененным и незатененным светочувствительным элементам линейного сенсора. Столбцы (i) соответствуют порядковым номерам светочувствительных элементов, строки (j) — номеру измерения, осуществляемого при смещении начала и/или конца тени как минимум на один светочувствительный элемент. Для получения эффективного размера отдельного светочувствительного элемента сначала вычисляется средний размер элемента для каждого теневого изображения (строки), в формировании которого участвует этот светочувствительный элемент, а затем проводится усреднение по всем этим теневым изображениям (строкам).

Средний размер светочувствительного элемента в теневом изображении (строке) j вычисляется по формуле

$$l_j^{\text{cp}} = \frac{d}{\sum_i k_{ij}}, \quad (1)$$

где d — диаметр стержня, мм; k_{ij} — значение из массива калибровочных данных; i — номер светочувствительного элемента; j — номер измерения.

При дальнейшем усреднении значений l_j^{cp} по теневым изображениям (столбцам) и подстановке вместо l_j^{cp} выражения (1) получаем формулу для вычисления эффективного размера i -го элемента

$$l_i^{\text{эф}} = \frac{\sum_j k_{ij} l_j^{\text{cp}}}{\sum_j k_{ij}} = \frac{1}{\sum_j k_{ij}} \cdot \sum_j k_{ij} \frac{d}{\sum_i k_{ij}}. \quad (2)$$

В результате после калибровки реальный размер измеряемого объекта будет рассчитываться по формуле

$$d_{из} = \sum_{p=m}^n I_p^{\Phi}, \quad (3)$$

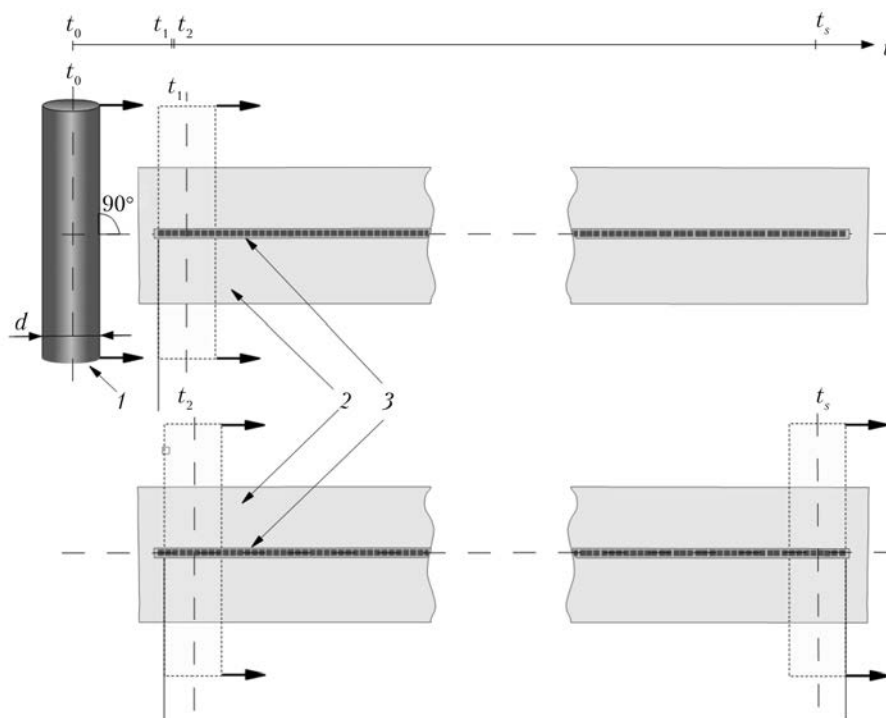
где m и n — порядковые номера светочувствительных элементов начала и конца тени соответственно.

Таким образом, сумма эффективных размеров всех элементов, составляющих конкретное теневое изображение, должна с высокой точностью совпадать с реальным размером создавшего это изображение эталонного объекта. Нужный результат достигается за счет точного определения вклада каждого светочувствительного элемента в размер формируемой тени с учетом неоднородности светового потока. Высокая точность определения эффективного размера элемента, в свою очередь, достигается за счет вычисления среднего размера светочувствительного элемента в каждом теневом изображении, полученном при перемещении эталонного объекта в процессе калибровки, и дальнейшего усреднения этой величины по всем теневым изображениям, в формировании которых принимал участие данный светочувствительный элемент.

Процедуру калибровки иллюстрирует рисунок, на котором показано вертикальное сечение оптического канала и положение калибровочного стержня относительно светового потока и линейного сенсора.

В момент времени t_0 стержень находится вне оптического канала, поэтому световой поток беспрепятственно достигает всех светочувствительных элементов линейного сенсора. Процесс калибровки начинается в момент времени t_1 , когда тень от стержня имеет максимальный размер и при этом затеняет первый светочувствительный элемент линейного сенсора. Калибровка считается завершенной, когда зарегистрировано затенение последнего элемента сенсора t_s . При перемещении стержня фиксируется изменение общего количества затененных элементов линейного сенсора и регистрируются их порядковые номера. Эти параметры формируют массив калибровочных данных. В общем случае при движении стержня слева направо увеличение количества освещенных элементов слева от стержня, например на единицу, сопровождается сдвигом тени на один элемент с сохранением количества затененных элементов, как показано на рисунке, в промежуток времени $(t_1 - t_2)$. Однако в силу влияния неоднородности светового потока размер тени (следовательно, и количество затененных элементов) при дальнейшем перемещении стержня может меняться.

В качестве примера рассмотрим калибровку оптического измерителя размеров с линейным сенсором, состоящим из 12 светочувствительных элементов с горизонтальным средним размером каждого 0,25 мм, стержнем диаметром 2 мм. Массив калибровочных данных представлен в таблице.



Поэлементная калибровка оптического измерителя линейных размеров: 1 — калибровочный стержень; 2 — световой поток; 3 — линейный сенсор

Пример массива калибровочных данных для 12-элементного линейного сенсора со средним размером элемента 0,25 мм при калибровке эталонным стержнем диаметром 2 мм

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\sum_i k_{ij}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	8
2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	9
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
6	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
$\sum_j k_{ij}$	1	2	3	4	5	6	6	6	4	4	4	2	
$l^{\text{эф}}, \text{ мм}$	0,250	0,268	0,253	0,252	0,252	0,257	0,257	0,257	0,252	0,252	0,252	0,268	

Пусть при перемещении стержня происходит затенение от 7 до 9 светочувствительных элементов (см. значение $\sum_i k_{ij}$). Тогда каждый светочувствительный элемент дает вклад в формирование от 1 до 6 теневых изображений (см. значение $\sum_j k_{ij}$).

Для получения эффективного размера светочувствительного элемента $l_i^{\text{эф}}$ по формуле (2) нужно сначала вычислить средний размер элемента для каждого изображения (строки), в формировании которого участвует указанный светочувствительный элемент, а затем провести усреднение по всем этим теневым изображениям (строкам). Вычисленные эффективные размеры для каждого светочувствительного элемента представлены в нижней строке таблицы. Видно, что эффективные размеры близки к горизонтальному размеру светочувствительного элемента, но не совпадают с ним, что отражает результат калибровки, призванной повысить точность совпадения измеренной величины с реальным размером эталонного объекта, создавшего теневое изображение.

Таким образом, описанный в настоящей работе метод поэлементной калибровки оптико-электронного измерителя осадков, защищенный патентом [14], позволяет свести к минимуму недостатки всех ранее предложенных калибровочных методик, в результате чего должна повыситься как точность определения размеров отдельных гидрометеоров, так и точность проводимых с помощью этих размеров расчетов интегральных характеристик атмосферных осадков. Универсальность предложенного метода калибровки позволяет использовать его для повышения показателей точности любых оптических измерителей линейных размеров различных объектов, использующих в качестве измерительного преобразователя линейный массив светочувствительных элементов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.

1. Kruger A., Krajewski W.F. Two-dimensional video disdrometer: A description // J. Atmos. Ocean. Technol. 2002. V. 19, N 5. P. 602–617.

2. Mocholi Belenguer F., Martinez-Millana A., Mocholi Salcedo A., Milián Sánchez V., Josefa Palomo Anaya M. Disdrometer performance optimization for use in urban settings based on the parameters that affect the measurements // Symmetry. 2020. V. 12, N 2. P. 303. DOI: 10.3390/sym12020303.

3. Löffler-Mang M., Joss J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors // J. Atmos. Ocean. Technol. 2000. V. 17, N 2. P. 130–139.

4. Barthazy E., Goke S., Schefold R., Hogg D. An optical array instrument for shape and fall velocity measurements of hydrometeors // J. Atmos. Ocean. Technol. 2004. V. 21, N 9. P. 1400–1416.

5. Kal'chikhin V.V., Kobzev A.A., Korol'kov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of the rate of fall of rain drops in measurements of their parameters by an optical rain gauge // Meas. Tech. 2017. V. 59, N 11. P. 1175–1180.

6. Newman A.J., Kucera P.A., Bliven L.F. Presenting the Snowflake Video Imager (SVI) // J. Atmos. Ocean. Technol. 2009. V. 26, N 2. P. 167–179. DOI: 10.1175/2008JTECHA1148.1.

7. Garrett T.J., Fallgatter C., Shkurko K., Howlett D. Fall speed measurement and high-resolution multi-angle photography of hydrometeors in free fall // Atmos. Meas. Tech. 2012. N 5. P. 2625–2633.

8. Connolly P.J., Flynn M.J., Ulanowski Z., Choulaton T.W., Gallagher M.W., Bower K.N. Calibration of the cloud particle imager probes using calibration beads and ice crystal analogs: the depth of field // J. Atmos. Ocean. Technol. 2007. V. 24, N 11. P. 1860–1879. DOI: 10.1175/JTECH2096.1.

9. Lanzinger E., Theel M., Windolph H. Rainfall amount and intensity measured by the Thies Laser Precipitation Monitor. Research gate, January 2006 [Electronic resource]. URL: <https://researchgate.net/publication/229048951> (last access: 21.07.2021).

10. Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение калибровочных характеристик оптико-электронного измерителя атмосферных осадков // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 449–455; Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korol'kov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of calibration parameters of an optoelectronic precipitation gage // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 432–437.

11. Литвинов И.В. Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 154 с.

12. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е. Оптимизация процедуры калибровки оптико-электронного измерителя атмосферных осадков // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 7. С. 535–538.

13. *Способ* калибровки оптического измерителя осадков: Пат. 2617033. РФ, МПК, G 01 W 1/14. Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А.; Ин-т мониторинга климатических и экологических систем; Сибаналитприбор. № 2016108180; Заявл. 09.03.2016. Оpubл. 19.04.2017, Бюл. № 8.
14. *Способ* поэлементной калибровки оптического измерителя линейных размеров: Пат. 269874. РФ, МПК, G 01 W 1/14. Кальчихин В.В., Кобзев А.А.; Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. № 2018145140; Заявл. 18.12.2018. Оpubл. 29.08.2019. Бюл. № 25.

V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, A.A. Tikhomirov, D.E. Filatov. Element by element calibration method for the optoelectronic precipitation gage.

A review of methods for calibrating optical raingauges is carried out. The disadvantages of the existing calibration methods of the optoelectronic raingauge OPTIOS are analyzed and the ways to eliminate them are proposed. The original patented method for calibrating the optical raingauge is described in detail, which makes it possible to increase the accuracy of determining the dimensions of hydrometeors by taking into account the effective size of each photosensitive element of the linear sensor. A conclusion is made about the reliability of the proposed calibration method, which makes it possible to use the method to improve the accuracy of any optical meters of linear dimensions of various objects using a linear array of photosensitive elements as a measuring transducer.