

Организация тестовых объектов такого типа требует проведения ряда подготовительных работ, а именно:

создания или поиска тестовых площадок размером не меньше $3l$, где l — линейное пространственное разрешение аппаратуры, и с проектным покрытием растительностью около 100 %;

выполнения полевого спектрометрирования объектов на протяжении всего сезона вегетации для оценки устойчивости локальных особенностей спектра отражения и определения наиболее подходящих периодов для выполнения спектральной калибровки;

разработки и опробования методик спектральной калибровки.

При существовании тестовых объектов, удовлетворяющих перечисленным требованиям, возможна разработка методик, исключающих атмосферную коррекцию, что позволит избежать погрешностей, связанных с недостатком данных по состоянию атмосферы или погрешностями самой модели переноса излучения.

Л и т е р а т у р а

1. Долженко А. П., Жиличкин А. Г., Коваленко В. П., Кондратов А. В., Смирнов С. В., Тихонычев В. В., Федорченко А. М., Худяков А. В. Подтверждение характеристик КК ДЗЗ «Ресурс-П» № 1 в процессе орбитальной эксплуатации с использованием системы валидации. [Электрон. ресурс]. http://www.ntsomz.ru/files/kondratov%20a._15.11.2013.pdf (дата обращения 15.08.2014 г.).

2. Пат. 2457435 РФ. Фотограмметрическая мира / И. Г. Журкин, Г. Г. Сычев, А. Т. Калинин // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 21.

3. Журкин И. Г., Сычев Г. Г., Грузинов В. С. Методика измерения разрешающей способности космических систем дистанционного зондирования с помощью искусственных объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 81—84.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613954. Программа для определения разрешающей способности «MIRA16 v.1» / Г. Г. Сычев, И. Г. Журкин // Программа для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2013. № 2. Ч. 2. С. 410—411.

5. Kawishwar P. Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion EO-1 Data / Int. Institute for Geo-Information Sci. Earth Observation. Master Thesis. Enschede, Netherlands, 2007.

6. Guanter L., Segl K., Sang B., Alonso L., Kaufmann H., Moreno J. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers // Opt. Express. 2009. V. 17. N. 14. P. 11594—11606.

7. P. S. Barry, J. Shepanski, C. Segal. Hyperion On-Orbit Validation of Spectral Calibration using Atmospheric Lines and an On-board System // Proc. SPIE. 2002. V. 4480. P. 231—235.

Дата принятия 21.11.2014 г.

551.550:519.26

Калибровка фотометрических систем атмосферных измерений с использованием нечетких множеств

Р. О. ГУСЕЙНОВА

Азербайджанский архитектурно-строительный университет,
Баку, Азербайджан, e-mail: renahuseynova55@gmail.com

Предложено усовершенствование метода калибровки солнечных фотометров при различных оптических воздушных массах. Получено аналитическое условие обеспечения стабильного проведения периодической калибровки этих фотометров с учетом случайных временных изменений атмосферного аэрозоля. Показан пример реализации калибровки на базе нечетких множеств.

Ключевые слова: солнечный фотометр, нечеткие множества, калибровка, атмосфера, аэрозоль.

The modification of the known method of calibration of sun photometers at different optical air masses is suggested. The analytical condition for providing the stable periodic calibration of sun photometers taking into account the random temporal variation of atmospheric aerosol is derived. The example for realization of fuzzy calibration of sun photometer is shown.

Key words: sun photometer, fuzzy sets, calibration, atmosphere, aerosol.

Точность проводимых атмосферных измерений в видимом диапазоне электромагнитных волн ограничивается воздействием атмосферного аэрозоля. Механизм воздействия аэрозоля на распространение оптического излучения достаточно разнообразен и включает такие свойства, как поглощение, отражение и рассеяние, которые приводят к суще-

ственной погрешности результатов измерений, проводимых наземными фотометрами. Для частичного устранения указанных погрешностей разработаны различные многоволновые методы [1].

Наиболее важным, с точки зрения классической теории измерительной техники, является метод по устранению вли-

нения атмосферного аэрозоля на результат калибровки фотометрических приборов. Для этого эталонные приборы калибруют в высокогорных лабораториях, расположенных вдали от материков (например на испытательной станции NASA на Гавайских островах), или проводят лабораторную калибровку с использованием различных ламп в качестве источников света. Для уменьшения действия случайных факторов, отрицательно влияющих на точность калибровки, ее необходимо проводить в максимально сжатые сроки, в пределах постоянной времени корреляции мешающего случайного фактора. Однако, если в применяемом методе предусматривается выполнение калибровки в течение длительного времени, то надо принять специальные меры по снижению действия случайного дестабилизирующего фактора — атмосферного аэрозоля. Для этого можно использовать нечеткие методы, позволяющие на базе имеющихся знаний разумно компенсировать влияние дестабилизирующего фактора.

В настоящей статье рассмотрен вопрос реализации с применением нечетких множеств известного метода калибровки солнечных фотометров [2], предусматривающего проведение атмосферных фотометрических измерений при двух значениях оптической воздушной массы.

Теория нечеткой логики, использующая понятие нечетких множеств, впервые была рассмотрена в 1965 г. Основной причиной появления новой теории стала потребность в математической обработке нечетких и приближенных рассуждений при описании сложных процессов, систем и объектов. Нечеткая логика является многозначной, что позволяет определить промежуточные значения для оценок (да — нет, истинно — ложно и т. д.). Теория нечеткой логики позволяет работать с неполной информацией либо с переменными параметрами высокой сложности.

Метод калибровки, предложенный в [2], заключается в проведении солнечно-фотометрических измерений при оптических воздушных массах m_1 , km_1 . Условно приняв аппаратную функцию фотометра за единицу, сигналы на выходе солнечного фотометра можно оценить как

$$I_1(\lambda, m_1) = CI_0(\lambda) \exp(-m_1 \tau_a(\lambda)); \quad (1)$$

$$I_1(\lambda, km_1) = CI_0(\lambda) \exp(-m_1 k \tau_a(\lambda)), \quad (2)$$

где $I_1(\lambda, m_1)$, $I_1(\lambda, km_1)$ — сигналы на выходе фотометра на длине волны λ ; C — коэффициент калибровки; $CI_0(\lambda)$ — солнечная постоянная на длине волны λ ; $\tau_a(\lambda)$ — оптическая толщина аэрозоля.

Оптическая толщина атмосферы определяется $\tau_a(\lambda)$. Если обе стороны выражения (1) возвести в степень k , то

$$I_1^k(\lambda, m_1) = C^k I_0^k(\lambda) \exp(-m_1 k \tau_a(\lambda)). \quad (3)$$

Разделим выражение (3) на (2) при постоянстве аэрозольного фактора:

$$\begin{aligned} I_1^k(\lambda, m_1) / I_1(\lambda, km_1) &= \\ &= C^k I_0^k(\lambda) / [CI_0(\lambda)] = [CI_0(\lambda)]^{k-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражения (4) получим

$$CI_0(\lambda) = {}^{k-1}\sqrt{I_1^k(\lambda, m_1) / I_1(\lambda, km_1)}.$$

Таким образом, при известных значениях $I_0(\lambda)$, k , $I_1(\lambda, m_1)$, $I_1(\lambda, km_1)$ можно вычислить коэффициент калибровки C .

Применение изложенного выше метода возможно, если в промежутке времени, прошедшем между измерениями при оптических воздушных массах m_1 , km_1 , оптическая толщина аэрозоля не изменилась, однако аэрозоль подвержен сезонным, месячным и дневным переменам, которые должны быть учтены. Предложим, что усовершенствования этого метода можно добиться при изменении выражения (2) следующим образом:

$$I_1(\lambda, km_1) = CI_0(\lambda) \exp[-m_1 k (\tau_a(\lambda) + \Delta\tau_a(\lambda))]. \quad (5)$$

В этом случае, разделив выражение (3) на (5), получим

$$I_1^k(\lambda, m_1) / I_1(\lambda, km_1) = [CI_0(\lambda)]^{k-1} \exp(m_1 k \Delta\tau_a(\lambda)). \quad (6)$$

Из выражения (6) найдем

$$CI_0(\lambda) = {}^{k-1}\sqrt{I_1^k(\lambda, m_1) / I_1(\lambda, km_1) \exp[-m_1 k \Delta\tau_a(\lambda) / (k-1)]}. \quad (7)$$

Из (7) определим нестабильность результата калибровки:

$$\Delta\tau_a(\lambda) m_1 k / (k-1) = C_0. \quad (8)$$

Тогда из (8) получим

$$k = C_0 / (C_0 - m_1 \Delta\tau_a(\lambda)). \quad (9)$$

Покажем, что при $C_0 = \text{const}$ коэффициент k является нечеткой величиной. В формуле (9) оптическая воздушная масса m_1 в фиксированный момент времени t_1 является постоянной величиной. Изменение оптической толщины атмосферного аэрозоля происходит по сложным природным закономерностям, большинство которых подвержены случайным колебаниям. Например, среднечасовая концентрация аэрозоля в атмосферном воздухе с 24:00 до 06:00 ч изменялась в пределах $(1,6-2,1) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. Наиболее высокая концентрация аэрозоля наблюдалась в 13:00 ч, затем концентрация медленно убывала. В промежутке времени 07:00—15:00 ч среднее значение концентрации достигало $3,2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, вечером оно уменьшалось до $2,2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ [3].

Согласно [4] в результате экспериментальных исследований аэрозоля было установлено, что в интервале времени 10:00—11:00 ч изменения оптической толщины характеризуются малыми значениями и часовыми вариациями. В интервале времени 11:00—16:00 ч происходит постепенный рост оптической толщины аэрозоля, а вечером наблюдается ее уменьшение. При этом оптическая толщина аэрозоля, измеренная на длинах волн 0,48 и 0,87 мкм, сильно различается, что вызвано временным ростом показателя Ангстрема в интервале времени 10:00—18:00 ч. Указанная выше тенденция дневного изменения оптической толщины аэрозоля подтверждена в [5].

Рассмотрим вопрос о разработке метода нечеткой калибровки солнечного фотометра в условиях сильной аэро-

зольной загруженности атмосферы. Работа нечеткого контроллера калибратора основана на предположении, что при соблюдении условия (8) аэрозольные шумы при проведении периодической калибровки фотометра будут учтены единым образом.

Примененный в калибраторе нечеткий контроллер имеет классическую структурную схему, представленную на рис. 1. Фаззификатор 1 предназначен для преобразования четких входных величин, база данных и знаний 4 служит для хранения нечетких правил, вычислений промежуточных результатов и постоянных величин, необходимых для проведения нечетких вычислений. Дефаззификатор 3 предназначен для обратного преобразования нечетких величин в четкие значения параметров. Работа нечеткого контроллера заключается в следующем. Фаззификатор 1 превращает исходные четкие значения k в нечеткие множества с использованием функций принадлежности треугольного вида. В базе данных 4 определяются функции принадлежности нечетких множеств, а в базе знаний содержатся правила нечеткого логического контроллера, являющиеся формализацией человеческой экспертизы. Предположим, что в момент t_1 фотометр работает при оптической воздушной массе m_1 . В этом случае в базе данных содержатся следующие правила:

$$\begin{aligned} &\text{увеличить } t_2, \text{ если } \Delta\tau_a(\lambda)m_1k/(k-1) < C_0 - \Delta C_0; \\ &\text{уменьшить } t_2, \text{ если } \Delta\tau_a(\lambda)m_1k/(k-1) > C_0 + \Delta C_0; \\ &t_2 = \text{const, если } \Delta\tau_a(\lambda)m_1k/(k-1) = C_0 \pm \Delta C_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где ΔC_0 — допустимый разброс C_0 .

При этом формирование выходного нечеткого управляющего сигнала определяется по правилу Мамдани [4], которое описано ниже.

На рис. 2 показана причинно-следственная диаграмма для построения системы нечеткого управления калибратором. Всевозможные сезонные, дневные или случайные изменения оптической толщины аэрозоля, в том числе вызванные его старением или увлажнением, могут привести к сужению или расширению центрального нижнего треугольника, характеризующего нормальные значения сигнала (изменения показаны точками). Ширина треугольников, показанных на оси t_2 , как и возможное расширение этих треугольников, задается разработчиком системы. Возможные расширения треугольников приводят к увеличению площади прямоугольника $ABCD$ до контура $A_1B_1C_1D_1$. Определим выходной сигнал системы нечеткого управления при возникновении случайных изменений аэрозольных параметров. Допустим, что из-за этих изменений относительное значение показателя k увеличится до 57 %. Следовательно, необходимо сформировать управляющий сигнал, т. е. изменить момент времени t_2 таким образом, чтобы удовлетворить условиям (10). С учетом уровней 0,5 и 0,25 пересечения вертикальной линии, проведенной из точки $I_0(\lambda) = 57\%$ центрального и правого треугольника, найдем необходимый сигнал управления в виде изменения t_2 (рис. 3).

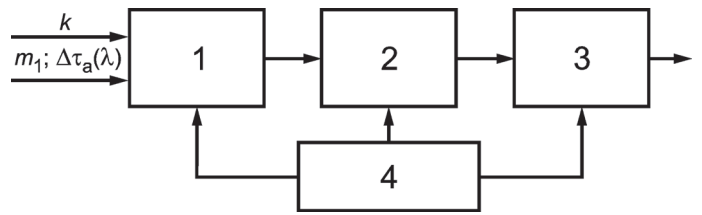


Рис. 1. Блок-схема нечеткого контроллера:

1 — преобразователь четких величин в нечеткие значения; 2 — формирователь нечеткого управления; 3 — преобразователь нечетких величин в четкие значения; 4 — базы данных и знаний

Чтобы вычислить сигнал управления, сначала определим площади вышеуказанных треугольников при $t_{22} - t_{21} = 0,2$; $t_{21} - t_{20} = 0,2$:

$$S_1 = 0,05 \text{ м}^2; S_2 = 0,05 \text{ м}^2.$$

Уравнение баланса имеет вид

$$D_1 S_1 = D_2 S_2 \text{ при } D_1 + D_2 = 20.$$

Следовательно система нечеткого управления должна увеличить t_{20} до t_{21} .

Закключение. В результате проведенного исследования предложено усовершенствование метода калибровки солнечных фотометров при различных оптических воздушных массах, получено аналитическое условие обеспечения стабильного проведения периодической калибровки указанных фотометров с учетом случайных временных изменений ат-

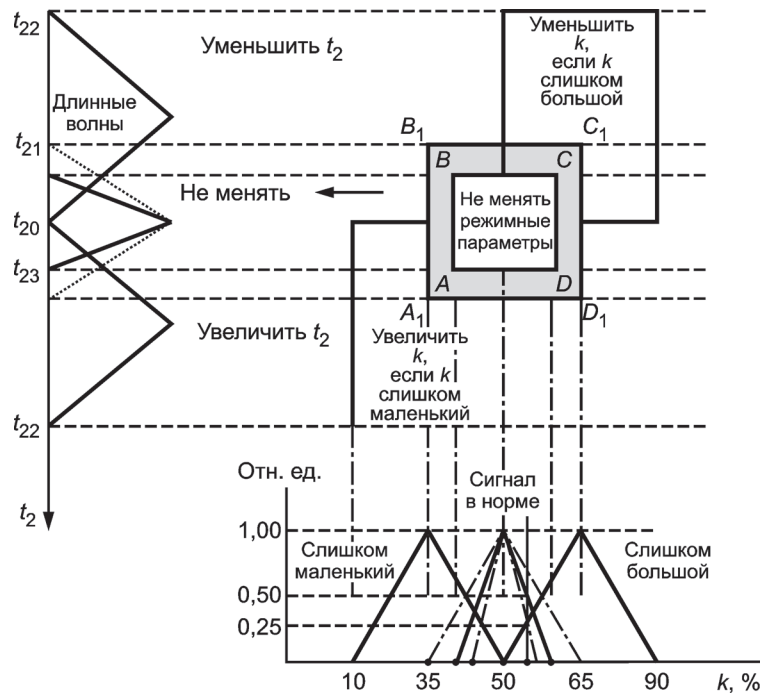


Рис. 2. Причинно-следственная диаграмма нечеткого управления калибратором

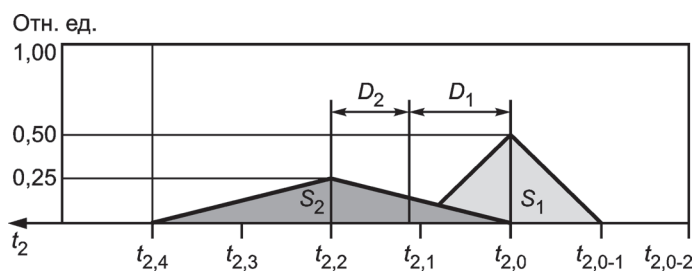


Рис. 3. Вычисление сигнала нечеткого процессора

мосферного аэрозоля, показан вариант реализации нечеткой калибровки солнечного фотометра.

Литература

1. Гущин Г. П., Новоселова Н. Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983.

2. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. New method for calibration of Sun Photometers // Chinese Opt. Lett. 2009. V. 7. N. 9. P. 760—763.

3. Backman J., Rizzo L. V., Hakala J., Nieminen T., Manninen H. E., Morais F., Aalto P. P., Siivola E., Carbone S., Hillamo R., Artaxo P., Virkkula A., Petaja T., Kulmala M. On the diurnal cycle of urban aerosols, black carbon and the occurrence of new particle formation events in springtime Sao Paulo, Brazil // Atmos. Chem. Phys. 2012. N. 12. P. 11733—11751.

4. Panchenko M. V., Sakerin S. M., Kabanov D. M., Terpugova S. A. Diurnal behavior of aerosol and water vapor in summer // Ninth ARM Sci. Team Meeting Proc. San Antonio, Texas, March 22—26, 1999.

5. Baxla S. P., Roy A. A., Gupta T., Tripathi S. N., Bandyopadhyaya R. Analysis of diurnal and seasonal variation of submicron outdoor aerosol mass and size distribution in Northern Indian City and its correlation to black carbon // Aerosol Air Quality Res. 2009. N. 9 (4). P. 458—469.

Дата принятия 02.10.2014 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.082.2

Малогабаритный меточный ядерно-магнитный расходомер для измерения быстроменяющихся расходов жидкости

В. В. ДАВЫДОВ, В. И. ДУДКИН, А. Ю. КАРСЕЕВ

С.-Петербургский государственный политехнический университет,
С.-Петербург, Россия, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Описан малогабаритный меточный ядерно-магнитный расходомер. Модернизированы основные элементы конструкции расходомера и схема регистрации сигнала ядерно-магнитного резонанса. Достигнута высокая точность измерения расхода жидкости при использовании эффекта параметрического резонанса и новой конструкции сосуда-анализатора. Разработана компактная схема для обработки полученной информации на базе микроконтроллера.

Ключевые слова: ядерно-магнитный резонанс, меточный ядерно-магнитный расходомер, линия нутации, отношение сигнал—шум.

The compact nuclear-magnetic label flowmeter is described. The basis elements of flowmeter construction and the NMR signal registration scheme have been modernized. Due to the new construction of vessel-analyzer and the use of parametric resonance effect a high accuracy of measurements of liquid flow in changing range is assured. A compact scheme of liquid flow information processing based on microcontroller has been developed.

Key words: nuclear magnetic resonance, nuclear-magnetic label flowmeter, nutation line, signal—noise ratio.

В настоящее время расходомеры широко применяют в различных областях науки, промышленности, энергетики и сфере услуг [1, 2]. В ряде случаев измерение расхода жидкости возможно только бесконтактными методами [3—6]. Среди бесконтактных измерителей расходомеры, принцип действия которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР), — наиболее перспективные приборы [5—7], особенно при измерениях небольших расходов жидкостей, —

обладают незначительным гидравлическим сопротивлением, вносимым в тракт движения жидкости [6, 8, 9]. Полное отсутствие контакта с исследуемой средой делает их незаменимыми при длительном измерении расхода агрессивных жидкостей, например кислоты и щелочи, а также биологических растворов, где требуется соблюдение условий стерильности [5—11].