



ИЗМЕРЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ С УЧЕТОМ СТАРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ФОТОМЕТРОВ

*Э.Ибрагимов, аспирант, К.Исмаилов, к.т.н.,
Национальное аэрокосмическое агентство,
Баку, Азербайджан*

Показано, что временная деградация основных характеристик интерференционных фильтров в трехволновых солнечных фотометрах диктует необходимость введения параметрической коррекции этого фактора. Показано, что известный двухпараметрический метод коррекции атмосферных факторов в трехволновых фотометрах с учетом деградации характеристик интерференционных фильтров трансформируется в двухпараметрическую коррекцию деградации фильтров с учетом нестабильности атмосферы.

Получены аналитические формулы для вычисления корректирующих параметров k_1 и k_2 , использование которых позволяет осуществить высокоточные измерения радиационных параметров Солнца.

Спутниковые бортовые спектрографы для атмосферных исследований перед использованием обязательно проходят калибровку и валидацию. Традиционно эти процедуры проводят с помощью наземных спектрометрических и фотометрических систем. Например, спутниковая аппаратура TOMS, предназначенная для измерения общего содержания озона в атмосфере, калибруется с помощью данных наземной сети озонметрических измерений Всемирной метеорологической организации, а результаты бортовых аэрозольных измерений, осуществляемых такими спектрометрическими приборами, как POLDER, MODIS, PARASOL, обычно калибруются на основе данных Всемирной сети аэрозольных измерений AERONET. Все это подчеркивает важность и актуальность создания новых технических решений задач повышения точности калибровки фотометрических устройств. Но со временем интерференционные фильтры стареют и деградируют. Их основные спектральные характеристики оказываются

MEASUREMENT OF SOLAR RADIATION TAKING INTO ACCOUNT THE AGING OF OPTICAL INTERFERENCE FILTERS

*E. Ibrahimov, PhD student, K. Ismailov, Cand. of
Technical Sciences, National Aerospace Agency, Baku,
Azerbaijan*

It is shown, that the temporal degradation of major characteristics of interference filters in three-wavelengths Sun photometers requires carrying out correction of this factor. It is also shown, that the well-known two-parametric method of correction of atmosphere factors in three-wavelengths photometers taking into account the degradation of characteristics of interference filters can be transformed to two-parametric correction of filters' degradation and atmospheric non-stabilities.

The analytical formulas for calculation of correcting parameters k_1 and k_2 are given, utilization of which makes it possible to carry out the high accuracy measurements of the Sun's radiation parameters.

Satellite on-board spectrographs for the atmosphere study are mandatorily calibrated and validated before being used. Traditionally these procedures are carried out using the ground spectrometric and photometric systems. For example, TOMS satellite equipment intended for the measurement of the total content of ozone in atmosphere is calibrated using the data of the ground network of ozone-metric measurements of the World Meteorological Organization and the results of on-board aerosol measurements carried out by such spectrometric devices as POLDER, MODIS, PARASOL are usually calibrated on the basis of the data of AERONET World Network of Aerosol Measurements. All these aspects stress the importance and topicality of the formation of new technical solutions concerning the tasks of increase of photometric devices calibration accuracy. But with the lapse of time interference filters have become out of date and degrade. Their major spectral characteristics turn



в сильной зависимости от температурных и временных факторов. Это явление превращает нестабильность элементов оптико-электронного тракта в дополнительный источник систематических погрешностей фотометрических измерений.

Например, как отмечено в работе [1], при типичном изменении температуры в оптоэлектронном канале фотометра типа MFRSR на 2°C в течение дня и на 5°C в течение года выходной сигнал этого устройства может дрейфовать из-за изменения основных характеристик интерференционного фильтра до 5%. При этом, несмотря на значительный дрейф спектральных потоков, достигающих 50%, результаты измеренных величин оптических толщин не выходили за пределы установленных порогов. Деградация свойств элементов проявляется в значительном увеличении дрейфовой составляющей сигнала.

Следует отметить, что в мировой практике фотометрирования решению вопроса корректировки результатов в связи с влиянием временной и температурной нестабильностей уделяется большое внимание. Разрабатываются всевозможные коррекционные процедуры результатов фотометрирования для минимизации влияния деградации основных характеристик элементов оптико-электронного тракта с учетом старения элементов. Замена устаревших типов интерференционных фильтров новыми по ряду объективных причин не всегда возможна.

Как сообщается в работе [2], аналогичные проблемы, связанные с временным и температурным дрейфом характеристик интерференционных фильтров, также возникали при эксплуатации фотометра CIMEL во Всемирной сети аэрозольных измерений AERONET. Авторы [2] рассматривали оптические интерференционные фильтры в качестве ограничительного фактора в отношении долговременной стабильности коэффициентов калибровки фотометра CIMEL. Деградация интерференционных фильтров происходила в следующем порядке: в среднем за год характеристики изменялись на 1-5%, а через двухлетний срок некоторые экземпляры фильтров деградировали намного сильнее. В таблице приведены результаты экспериментальных исследований дрейфа показателей интерференционных фильтров различных каналов фотометра CIMEL.

Как отмечено в работе [2], замена интерференционных фильтров на ионно-осажденные фильтры (фильтры №11) позволила значительно улучшить точностные характеристики интерференционных фильтров.

out to be in strong dependence on the temperature and temporal factors. This phenomenon transforms the non-stability of optical-electronic section elements into the additional source of systematic errors of photometric measurements.

For example, as it is outlined in the paper [1] upon the typical variation of temperature in the optical-electronic channel of MFRSR photometer by 2°C during the day and by 5°C during the year the output signal of this device can drift due to the variation of the major characteristics of interference filter up to 5%. Herewith, despite the considerable drift of spectral fluxes reaching 50% the results of measured optical depths did not fall outside the defined threshold values. Degradation of the elements properties is shown in the considerable increase of the signal drifting component.

It should be noted that in the world photometric practice great attention is paid to the solution of the problem of results correction concerning the influence of temporal and temperature non-stabilities. All possible correction procedures of the photometric measurement results are being developed in order to minimize the influence of degradation of the major characteristics of optical-electronic section elements taking into account the aging of elements. Replacement of the outdated types of interference filters with the new ones is not always possible for a number of objective reasons.

As it is reported in the paper [2], analogous problems connected with the temporal and temperature drift of the interference filter characteristics also occurred when operating the CIMEL photometer in AERONET World Network of Aerosol Measurements. Authors [2] considered the optical interference filters as the limiting factor with regard to the long-term stability of calibration coefficients of CIMEL photometer. Degradation of interference filters occurred in the following order: on average for a year characteristics have varied by 1-5% and in two years some models of filters have degraded much more. Results of the experimental study of interference filter parameters drift of different channels of CIMEL photometer are specified in the following table.

As it is outlined in the paper [2], the replacement of interference filters with ion-precipitated filters (filters No. 11) made it possible to improve considerably the accuracy characteristics of interference filters.



Вместе с тем, как видно из данных, приведенных в таблице, точностные характеристики интерференционных фильтров солнечных фотометров нельзя считать удовлетворительными и при разработке новых типов солнечных фотометров должны быть предусмотрены специальные меры по компенсации погрешностей, вызываемых нестабильностью характеристик интерференционных фильтров.

Мы предлагаем к рассмотрению новый способ компенсации влияния дрейфа характеристик интерференционного фильтра в трехволновом солнечном фотометре с двухпараметрической коррекцией, основанный на принципах, изложенных в работе [3].

Для дальнейшего изложения предлагаемого метода коррекции рассмотрим закон Бугера-Бера, который применительно к монохроматической длине волны λ имеет вид

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-m\tau_{\text{атм}}(\lambda)}, \quad (1)$$

где $I(\lambda)$ – интенсивность солнечного излучения на уровне Земли, на длине волны λ ; $I_0(\lambda)$ – величина Солнечной постоянной; m – оптическая воздушная масса; $\tau_{\text{атм}}(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферы.

С учетом (1) выходной сигнал гипотетического одноволнового фотометра может быть определен как

$$U(\lambda) = S(\lambda) \cdot I_0(\lambda) e^{-m\tau_{\text{атм}}(\lambda)}, \quad (2)$$

где $S(\lambda)$ – аппаратная функция фотометра, определяемая как

$$S(\lambda) = S_1(\lambda) \cdot S_2(\lambda),$$

где $S_1(\lambda)$ – аппаратная функция интерференционного фильтра; $S_2(\lambda)$ – аппаратная функция других

However, as it is seen from the data given in the table, the accuracy characteristics of interference filters of Sun photometers cannot be deemed satisfactory and the special measures must be provided for the compensation of errors caused by the non-stability of interference filter characteristics when developing the new types of Sun photometers.

We suggest considering the new method of the compensation of influence of interference filter characteristics drift in three-wavelength Sun photometer with two-parametric correction based on the principles set forth in the paper [3].

For the further description of the suggested correction method, let us consider Bouguer-Beer law which has the following form in respect to the monochromatic wavelength λ

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-m\tau_{\text{атм}}(\lambda)}, \quad (1)$$

where $I(\lambda)$ is the intensity of solar radiation at the Earth level and wavelength λ ; $I_0(\lambda)$ is the value of solar constant; m is the optical air mass; $\tau_{\text{атм}}(\lambda)$ is the optical atmosphere depth.

Taking into account (1) the output signal of hypothetic one-wavelength photometer can be estimated in the following manner:

$$U(\lambda) = S(\lambda) \cdot I_0(\lambda) e^{-m\tau_{\text{атм}}(\lambda)}, \quad (2)$$

where $S(\lambda)$ is the photometer instrument function estimated as

$$S(\lambda) = S_1(\lambda) \cdot S_2(\lambda),$$

where $S_1(\lambda)$ is the instrument function of interference filter; $S_2(\lambda)$ is the instrument function

Флуктуации величины V_0 в расчете на год, полученной в результате калибровки каналов по методу Ленгли
Fluctuation of V_0 value on annual basis obtained as the result of channels calibration using the Langely method

№ образца Sample No.	Сроки испытания, мес Test periods, months	Каналы, λ , нм / Channels, λ , nm							
		1020	940	870	670	500	440	380	340
2	5	-2	-1	2	2	3	-4	11	3
13	4	5	-31	2	0	Н/д N/a	2	23	11
13	10	10	5	10	11	Н/д N/a	15	20	15
32	5	4	6	7	2	2	4	26	5
11	7	-4	8	-1	0	0	0	-3	-2



конструктивных, оптических и электронных узлов фотометра.

В свою очередь, аппаратная функция интерференционного фильтра определяется как

$$S(\lambda) = S_0(t) \cdot S_0(\lambda_0 \pm \Delta\lambda), \quad (3)$$

где $S_0(t)$ – убывающая функция времени, отображающая физическое старение интерференционного фильтра; $S_0(\lambda_0 \pm \Delta\lambda)$ – колоколообразная функция пропускания с центральной длиной волны λ_0 и полушириной волны пропускания $\Delta\lambda$.

С учетом (2) и (3) имеем

$$U(\lambda) = S_0(t, \lambda_0) \cdot S_0(\lambda_0 \pm \Delta\lambda) \cdot I_0 \cdot e^{-m\tau_{\text{atm}}(\lambda)}. \quad (4)$$

Хорошо известно, что при осуществлении двухпараметрической коррекции в трехволновых фотометрах вводится на рассмотрение параметр z – функция промежуточного преобразования, определяемая как

$$z = \frac{U^{k_1}(\lambda_1) \cdot U^{k_2}(\lambda_3)}{U(\lambda_2)}. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) имеем

$$z = \frac{S_0^{k_1}(t, \lambda_{01}) \cdot S_0^{k_2}(t, \lambda_{03}) \cdot I_0^{k_1}(\lambda_1) \cdot I_0^{k_2}(\lambda_3)}{S_0(t, \lambda_{02}) \cdot I_0(\lambda_2)} \times e^{-m[\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)k_1 + \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)k_2 - \tau_{\text{atm}}(\lambda_2)]}. \quad (6)$$

Заметим, что при получении формулы (6) было учтено равенство

$$S_0(\lambda_{01} \pm \Delta\lambda) = S_0(\lambda_{02} \pm \Delta\lambda) = S_0(\lambda_{03} \pm \Delta\lambda) = 1.$$

Из формулы (6) становится ясным, что при выполнении следующих равенств параметр z оказывается функцией только k_1, k_2 и $I_0(\lambda_i); i = \overline{1, 3}$, то есть появляется возможность получения точных оценок триадных комбинаций $I_0(\lambda_i); i = \overline{1, 3}$:

$$S_0^{k_1}(t, \lambda_{01}) \cdot S_0^{k_2}(t, \lambda_{03}) = S_0(t, \lambda_{02}), \quad (7)$$

$$k_1 \tau_{\text{atm}}(\lambda_1) + k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3) = \tau_{\text{atm}}(\lambda_2). \quad (8)$$

При этом появляется возможность провести точные измерения $I_0(\lambda_i)$ путем предлагаемого способа коррекции деградации интерференционных фотометров, заключающегося в составлении и решении системы уравнений (7) и (8) в отношении коэффициентов коррекции k_1 и k_2 . Покажем предлагаемый вариант решения системы уравнений (7) и (8) относительно k_1 и k_2 . Из выражения (8) находим

of other construction, optical and electronic units of photometer.

In turn, the instrument function of interference filter is estimated as

$$S(\lambda) = S_0(t) \cdot S_0(\lambda_0 \pm \Delta\lambda), \quad (3)$$

where $S_0(t)$ is the time decreasing function describing the physical aging of interference filter; $S_0(\lambda_0 \pm \Delta\lambda)$ is the bell-shaped transmission function with the central wavelength λ_0 and half-width of transmission wave $\Delta\lambda$.

Taking into account (2) and (3) we have the following

$$U(\lambda) = S_0(t, \lambda_0) \cdot S_0(\lambda_0 \pm \Delta\lambda) \cdot I_0 \cdot e^{-m\tau_{\text{atm}}(\lambda)}. \quad (4)$$

It is well known that during two-parametric correction in three-wavelength photometers the parameter z (function of intermediate conversion) is introduced for consideration; this function is estimated as

$$z = \frac{U^{k_1}(\lambda_1) \cdot U^{k_2}(\lambda_3)}{U(\lambda_2)}. \quad (5)$$

Taking into account (4) and (5) we have the following

$$z = \frac{S_0^{k_1}(t, \lambda_{01}) \cdot S_0^{k_2}(t, \lambda_{03}) \cdot I_0^{k_1}(\lambda_1) \cdot I_0^{k_2}(\lambda_3)}{S_0(t, \lambda_{02}) \cdot I_0(\lambda_2)} \times e^{-m[\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)k_1 + \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)k_2 - \tau_{\text{atm}}(\lambda_2)]}. \quad (6)$$

It should be noted that when obtaining the formula (6) the following equality was taken into account:

$$S_0(\lambda_{01} \pm \Delta\lambda) = S_0(\lambda_{02} \pm \Delta\lambda) = S_0(\lambda_{03} \pm \Delta\lambda) = 1.$$

It is clear from the formula (6) that during the following equalities performance the parameter z turns out to be the function of only k_1, k_2 and $I_0(\lambda_i); i = \overline{1, 3}$ or in other words the possibility of accurate estimations of triad combinations $I_0(\lambda_i); i = \overline{1, 3}$ emerges:

$$S_0^{k_1}(t, \lambda_{01}) \cdot S_0^{k_2}(t, \lambda_{03}) = S_0(t, \lambda_{02}), \quad (7)$$

$$k_1 \tau_{\text{atm}}(\lambda_1) + k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3) = \tau_{\text{atm}}(\lambda_2). \quad (8)$$

Herewith, the possibility of carrying out the accurate measurements of $I_0(\lambda_i)$ emerges using the suggested method of the correction of



$$k_1 = \frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \frac{k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)}. \quad (9)$$

Учитывая выражение (9), в (7) получаем

$$S_0(t, \lambda_{01}) \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \frac{k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right] \cdot S_0^{k_2}(t, \lambda_{03}) = S_0(t, \lambda_{02}). \quad (10)$$

Логарифмируя выражение (10), получаем

$$\left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \frac{k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right] \ln S_0(t, \lambda_{01}) + k_2 \ln S_0(t, \lambda_{03}) = \ln S_0(t, \lambda_{02}). \quad (11)$$

Из выражения (11) получаем

$$k_2 = \frac{\ln S_0(t, \lambda_{02}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]}{\ln S_0(t, \lambda_{03}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]}. \quad (12)$$

С учетом выражений (9) и (12) получаем

$$k_1 = \frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \tau_{\text{atm}}(\lambda_3) \cdot \left\{ \frac{\ln S_0(t, \lambda_{02}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]}{\ln S_0(t, \lambda_{03}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]} \right\}. \quad (13)$$

interference photometer degradation which consists in the generation and solution of the combined equations (7) and (8) with regard to the correction coefficients k_1 and k_2 . Let us show the suggested variant of solution of the combined equations (7) and (8) relative to k_1 and k_2 . From the expression (8) we detect the following:

$$k_1 = \frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \frac{k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)}. \quad (9)$$

Taking into account the expression (9) in (7) we obtain the following:

$$S_0(t, \lambda_{01}) \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \frac{k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right] \cdot S_0^{k_2}(t, \lambda_{03}) = S_0(t, \lambda_{02}). \quad (10)$$

Taking the logarithm of the expression (10) we obtain the following:

$$\left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \frac{k_2 \tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right] \ln S_0(t, \lambda_{01}) + k_2 \ln S_0(t, \lambda_{03}) = \ln S_0(t, \lambda_{02}). \quad (11)$$

From the expression (11) we obtain the following:

Таким образом, в трехволновых фотометрах двухпараметрическая коррекция позволяет осуществить коррекцию таких дестабилизирующих факторов, как временная деградация интерференционного фильтра и временная нестабильность оптической толщины атмосферы.

Очевидно, что предлагаемый метод не обеспечивает селективную компенсацию отдельных составляющих частей оптической толщины атмосферы. Раздельная компенсация, например, аэрозоля и озона в солнечном фотометре может быть обеспечена путем перехода на четырехволновую структуру измерителя, что, безусловно, значительно увеличит объем необходимых измерительных работ при проведении предлагаемой процедуры коррекции.

Поэтому для измерения параметров солнечной радиации с помощью многоволнового солнечного фотометра необходимо проводить коррекцию всех дестабилизирующих факторов, для чего вполне пригоден дву- и многопараметрический метод коррекции, впервые предложенный в работе [3].

В результате проведенного исследования показано, что временная деградация основных характеристик интерференционных фильтров в трехволновых солнечных фотометрах диктует необходимость введения параметрической коррекции этого фактора.

Так же подтверждено, что известный двухпараметрический метод коррекции атмосферных факторов в трехволновых фотометрах с учетом деградации характеристик интерференционных фильтров трансформируется в двухпараметрическую коррекцию деградации фильтров, а также коррекцию результатов, вызванных нестабильностью атмосферы.

Были получены аналитические выражения для вычисления корректирующих параметров k_1 и k_2 , используемых в процедурах измерений радиационных параметров Солнца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer. Handbook. February, 2005. <http://www>.
2. **Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D. et al.** AERONET - A Federated Instrument Network and data Archive for Aerosol Characterization. Remote Sensing of Environment. 1998, v.66, p. 1-16.
3. **Асадов Х.Г., Сулейманов Ш.Т.** Синтез трехволновых скорректированных измерителей малых компонент атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне. - Метрология, 2007, №9, с. 3-7.

$$k_2 = \frac{\ln S_0(t, \lambda_{02}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]}{\ln S_0(t, \lambda_{03}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]} \quad (12)$$

Taking into account the expressions (9) and (12) we obtain the following:

$$k_1 = \frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} - \tau_{\text{atm}}(\lambda_3) \cdot \left\{ \frac{\ln S_0(t, \lambda_{02}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_2)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]}{\ln S_0(t, \lambda_{03}) - \ln S_0(t, \lambda_{01}) \cdot \left[\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_3)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_1)} \right]} \right\} \quad (13)$$

Thus, in three-wavelength photometers two-parametric correction makes it possible to correct such destabilizing factors as the temporal degradation of interference filter and temporal non-stability of atmosphere optical depth.

Obviously, the suggested method does not provide the selective compensation of individual components of atmosphere optical depth. For example, separate compensation of aerosol and ozone in Sun photometer can be provided by the transition to four-wavelength structure of measuring instrument which will undoubtedly and considerably increase the volume of the necessary measuring operations and works concerning the suggested correction.

Therefore, in order to measure the parameters of solar radiation using the multi-wave Sun photometer it is necessary to carry out the correction of all destabilizing factors and two- and multi-parametric method of correction suggested in the paper [3] for the first time is completely applicable for it.

As a result of carried out study, it is shown that the temporal degradation of major characteristics of interference filters in three-wavelength Sun photometers requires the parametric correction of this factor.

It is also confirmed, that well-known two-parametric method of correction of atmosphere factors in three-wavelength photometers taking into account the degradation of characteristics of interference filters can be transformed to two-parametric correction of filters' degradation and correction of the results caused by atmospheric non-stability.

The analytical expressions for the calculation of correcting parameters k_1 and k_2 used in the procedures of measurements of the Sun radiation parameters are obtained.