

Методика пересчета спектров теплового излучения атмосферы различного спектрального разрешения для взаимного сопоставления измерений бортовых инфракрасных фурье-спектрометров

Д. А. Козлов¹, Ю. М. Тимофеев², А. В. Поляков²,
И. А. Козлов¹, В. Дёлер, Д. Ортель, Д. Шпенкух

¹ ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия
E-mail: dima_kozlov@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Представленная методика пересчёта спектров теплового излучения атмосферы предназначена для проведения взаимного сопоставления измерений бортовых ИК-спектрометров различного спектрального разрешения. Данная задача возникает как при интеркалибровке современных фурье-спектрометров температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли (аппаратура IASI, CrIS, ИКФС-2), так и при проведении различных климатических исследований с использованием спектральных измерений, разделённых значительным временным промежутком (десятки лет). В частности, значительный интерес представляет сопоставление измерений фурье-спектрометров ИКФС-2 (КА «Метеор-М» № 2, 2014 г. запуска) и SI-1 (КА «Метеор» № 28, 1977 г. запуска), имеющих различные диапазоны оптической разности хода в регистрируемых интерферограммах, функции аподизации и сетки выходных спектральных отсчётов. На примере сопоставления измерений фурье-спектрометров ИКФС-2 и SI-1 рассмотрено поэтапное преобразование измерений прибора с более высоким спектральным разрешением к спектральным данным прибора с меньшим разрешением. Для оценки погрешности пересчёта использовались опорные спектры ИКФС-2 и SI-1, рассчитанные методом line-by-line для одной из стандартных моделей атмосферы с учётом аппаратных функций приборов. В результате сравнения опорного спектра ИКФС-2, пересчитанного к параметрам спектральных данных SI-1 по разработанной методике, с опорным спектром SI-1 получено, что погрешность пересчёта не превышает уровень радиометрического шума приборов.

Ключевые слова: бортовой инфракрасный фурье-спектрометр, спектральное разрешение, аподизация, аппаратная функция, сопоставление измерений, ИКФС-2, SI-1, IASI

Одобрена к печати: 12.12.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-52-60

Введение

Измерения спектров уходящего теплового ИК-излучения проводятся уже более 50 лет с целью реализации различных дистанционных методов измерений параметров атмосферы и поверхности (Кондратьев, Тимофеев, 1970, 1978). Первые космические эксперименты были посвящены определению температуры поверхностей океанов, вертикальным профилям температуры и влажности атмосферы (Hanel, Conrath, 1969; Wark, Hilleary, 1969). Эти измерения проводились со средним спектральным разрешением ($\sim 5 \text{ см}^{-1}$) в сравнительно небольшом числе спектральных каналов (Бурцев и др., 1983; Пахомов и др., 1971). С течением времени с целью повышения информативности дистанционных измерений (точности и вертикального разрешения) спектральное разрешение и число каналов измерений увеличились более чем на порядок. В результате современные зарубежные и отечественные фурье-спектрометры температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли имеют спектральное разрешение порядка $0,5 \text{ см}^{-1}$ и число каналов до 10 тысяч (Успенский, Рублев, 2013; Smith et al., 2009).

При проведении сопоставления измерений инфракрасных спектрометров, имеющих различные параметры и характеристики (спектральное разрешение, сетка спектральных

отсчётов, форма аппаратной функции), возникает задача приведения измерений одного прибора к параметрам спектральных данных другого прибора. Например, данная задача возникает при интеркалибровке ИК-спектрометров температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли на основе сопоставления совместных синхронных измерений. К таким приборам, в настоящий момент функционирующим на орбите, относятся дифракционный спектрометр AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), фурье-спектрометры IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), CrIS (Cross-track Infrared Sounder), ИКФС-2 (Головин и др., 2013, 2017; Завелевич и др., 2012; Поляков и др., 2016). Другое применение — сопоставление измерений приборов, разделённых значительным временным промежутком (десятки лет), выполняемое в рамках климатических исследований. Например, совместный анализ измерений фурье-спектрометра ИКФС-2 (КА «Метеор-М» № 2, на орбите с 2014 г.) и прибора SI-1 (метеоспутники «Метеор-28/29», 1977, 1979 гг. (Закатов и др., 1979; Kempe et al., 1980)) позволяет изучать происшедшие за сорок лет изменения климата.

В *таблице* приведены параметры выходных спектральных данных современных космических ИК-зондировщиков, используемых в России и за рубежом, а также фурье-спектрометра SI-1.

Параметры выходных спектральных данных
фурье-спектрометров IASI, CrIS, ИКФС-2 и SI-1

	IASI	CrIS	ИКФС-2	SI-1
Спектральный диапазон, см ⁻¹	LW: 645–1210 MW: 1210–2000 SW: 2000–2760	LW: 650–1095 MW: 1210–1750 SW: 2155–2550	LW: 660–1209,5 MW: 1210,2–2000,5	400,47–1606,05
Число каналов	8461	1305	2701	579
Шаг спектральной сетки, см ⁻¹	0,25	LW: 0,625 MW: 1,25 SW: 2,5	LW: 0,35 MW: 0,70	2,086
MPX* в интерферограмме (MPD), см	2,0	LW: 0,8 MW: 0,4 SW: 0,2	1,667	0,2
Функция аподизации	функция Гаусса	(1) Хэмминг (2) Блэкман-Харрис	функция Гаусса	функция Хаппа-Гензеля
Ширина аппаратной функции (FWHM), см ⁻¹	0,5	(1) 1,82/(2·MPD) (2) 2,274/(2·MPD)	LW: 0,7 MW: 1,4	5,0

*MPX — максимальная оптическая разность хода в измеряемых интерферограммах.

Настоящая статья посвящена методике пересчёта (приведения) измерений бортовых ИК-фурье-спектрометров, имеющих различные параметры выходных спектральных данных. Детально процедура пересчёта рассмотрена на примере преобразования спектров ИКФС-2 к измерениям прибора SI-1.

Исходные данные

Исходными данными для пересчёта являются калиброванные спектры уровня 1С, измеренные двумя приборами и подлежащие сопоставлению. При этом очевидно, что спектры прибора с более высоким спектральным разрешением пересчитываются к спектрам прибора с более низким разрешением. Ввиду различия рабочих спектральных диапазонов результаты сопоставления могут быть получены в интервале волновых чисел, общем для двух приборов. Использование данных уровня 1С подразумевает, что особенности формы аппаратной функции фурье-спектрометра (Instrument Line Shape, ILS(v, v_0)), зависящей от волнового числа входного излучения вследствие эффекта самоаподизации измеряемых интерферограмм, скорректированы на предшествующем этапе обработки. Подробнее алгоритмы коррекции

самоаподизации изложены в работах (Desbiens et al., 2006; Tournier et al., 2002). Таким образом, аппаратная функция обоих приборов $ILS(v)$ подразумевается не зависящей от волнового числа входного излучения v_0 и определяется лишь диапазоном изменения оптической разности хода (ОРХ) и применяемой функцией аподизации. Наконец, для всех фурье-спектрометров характерна равномерная сетка спектральных отсчётов (с фиксированным шагом по шкале волновых чисел), что позволяет реализовать эффективную процедуру пересчёта с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

Методика пересчёта

Пусть $S_1(v_n)$ — спектр прибора с более высоким спектральным разрешением, определённый на сетке из N спектральных отсчётов с шагом Δv_1 (все обозначения с индексом «1» соответствуют первому прибору, с индексом «2» — второму). Тогда соответствующая данному спектру интерферограмма может быть представлена в виде:

$$I_1(x_k) = \text{rect}\left(\frac{x_k}{2MPD_1}\right) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} S_1(v_n) \cos(2\pi v_n x_k) \Delta v_1. \quad (1)$$

Здесь x_k — шкала отсчётов по ОРХ с шагом Δx ; MPD — максимальная разность хода. После переаподизации интерферограммы и ограничения диапазона ОРХ значением MPD_2 получим:

$$I_2(x_k) = I_1(x_k) \frac{A_2(x_k)}{A_1(x_k)} \text{rect}\left(\frac{x_k}{2MPD_2}\right). \quad (2)$$

Здесь $A_{1,2}(x)$ — функции аподизации двух приборов. Тогда пересчитанный спектр, соответствующий параметрам второго прибора, может быть записан в виде:

$$S_2(v_m) = 2 \sum_{k=0}^{K-1} I_2(x_k) \cos(2\pi v_m x_k) \Delta x. \quad (3)$$

Здесь v_m — шкала M спектральных отсчётов второго прибора. При вычислениях шаг выборки по оптической разности хода Δx должен удовлетворять теореме Котельникова для исключения эффекта переналожения спектров: $\Delta x < (2v_{\max})^{-1}$, где v_{\max} — максимальная частота (волновое число) в исходном спектре $S_1(v_n)$. Подставляя выражения (1) и (2) в выражение (3), получим окончательный результат для пересчёта исходного спектра $S_1(v_n)$, измеренного прибором «1», к параметрам спектральных данных прибора «2»:

$$S_2(v_m) = 2\Delta v_1 \cdot \Delta x \sum_{k=0}^{K-1} \left[\sum_{n=0}^{N-1} S_1(v_n) \cos(2\pi v_n x_k) \right] \frac{A_2(x_k)}{A_1(x_k)} \cos(2\pi v_m x_k). \quad (4)$$

Здесь диапазон ОРХ x_k ограничен максимальной разностью хода прибора «2», имеющего меньшее спектральное разрешение.

Следует отметить, что перед использованием выражения (1) целесообразно предварительно умножить исходный спектр $S_1(v_n)$ на полосовой фильтр, сглаживающий разрывы на краях спектрального диапазона. Например, может быть использован фильтр Ферми следующего вида:

$$f_k = \frac{1}{[1 + a_1 \exp(1 + p_1 - k)] \cdot [1 + a_2 \exp(k - N + p_2)]}, \quad k = 1 \dots N.$$

Применение фильтра необходимо для уменьшения осцилляций, возникающих на краях спектра в процессе пересчёта. Значения параметров a и p подбираются экспериментально.

Использование выражения (4) для вычисления $S_2(v_m)$ является наглядным, однако для пересчёта массива спектров целесообразно применение алгоритмов быстрого преобразования Фурье. В качестве примера ниже рассмотрена процедура пересчёта спектра ИКФС-2 для сопоставления с измерениями прибора SI-1.

Пересчёт спектров ИКФС-2 для сопоставления с измерениями прибора SI-1

На *рис. 1* представлены исходные спектры, измеренные фурье-спектрометрами ИКФС-2 и SI-1 и подлежащие сопоставлению. Измерения проводились 13 февраля 1979 г. (SI-1/Meteor29) и 14 февраля 2017 г. (ИКФС-2) для безоблачных условий в тропиках над Атлантическим океаном (около 3° ю.ш. и 25° з.д.) около 10:00 по местному времени.

В процедуре пересчёта можно выделить следующие этапы:

1) пересчёт спектров ИКФС-2 в пространство интерферограмм:

$$I_1(x_k) = IFFT \{S_1(v_n)\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_1(v_n) \cdot \exp\left\{i \frac{2\pi nk}{N}\right\}; \quad (5)$$

2) «обрезание» интерферограмм ИКФС-2 по ОРХ до значения МРХ прибора SI-1, исключение аподизации ИКФС-2 (функция Гаусса) и последующее применение аподизации прибора SI-1 (функция Хаппа-Гензеля, см. *таблицу* и *рис. 2*):

$$I_2(x_k) = I_1(x_k) \cdot \text{rect}\left\{\frac{x_k}{2MPD_{SI}}\right\} \frac{0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{\pi x_k}{MPD_{SI}}\right)}{\exp\left(-2\pi^2 s_{IKFS}^2 x_k^2\right)}; \quad s_{IKFS} = \frac{FWHM_{IKFS}}{2\sqrt{2 \ln 2}}; \quad (6)$$

3) пересчёт полученных интерферограмм обратно в спектральную область:

$$S_2(v_n) = FFT \{I_2(x_k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} I_2(x_k) \cdot \exp\left\{i \frac{2\pi nk}{N}\right\}; \quad (7)$$

4) пересчёт полученных спектров на выходную спектральную сетку прибора SI-1:

$$S_2(v_m) = \sum_{n=0}^{N-1} S_2(v_n) \cdot \text{sinc}\left\{\frac{\pi(v_m - v_n)}{\Delta v_n}\right\}. \quad (8)$$

При этом вычисления (8) эффективно проводить с помощью матричного умножения:

$$S_2^{out} = IM \cdot S_2, \quad IM = \text{sinc}\left\{\frac{\pi(V_2^T - V_1)}{\Delta v_n}\right\}, \quad (9)$$

$$\text{где } V_1 = \begin{pmatrix} v_1^{(1)} & v_2^{(1)} & \dots & v_N^{(1)} \\ v_1^{(1)} & v_2^{(1)} & \dots & v_N^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^{(1)} & v_2^{(1)} & \dots & v_N^{(1)} \end{pmatrix} \left. \vphantom{\begin{pmatrix} v_1^{(1)} & v_2^{(1)} & \dots & v_N^{(1)} \\ v_1^{(1)} & v_2^{(1)} & \dots & v_N^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^{(1)} & v_2^{(1)} & \dots & v_N^{(1)} \end{pmatrix}} \right\} M \text{строк}; \quad V_2 = \begin{pmatrix} v_1^{(2)} & v_2^{(2)} & \dots & v_M^{(2)} \\ v_1^{(2)} & v_2^{(2)} & \dots & v_M^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^{(2)} & v_2^{(2)} & \dots & v_M^{(2)} \end{pmatrix} \left. \vphantom{\begin{pmatrix} v_1^{(2)} & v_2^{(2)} & \dots & v_M^{(2)} \\ v_1^{(2)} & v_2^{(2)} & \dots & v_M^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_1^{(2)} & v_2^{(2)} & \dots & v_M^{(2)} \end{pmatrix}} \right\} N \text{строк}.$$

Здесь $v^{(1)}$ — промежуточная сетка спектральных отсчётов; $v^{(2)}$ — выходная сетка спектральных отсчётов SI-1; IM — интерполяционная матрица.

Альтернативным способом получения спектра $S_2(v_m)$ является вычисление БПФ интерферограммы $I_2(x_k)$, дополненной нулевыми значениями до длины 2^N , где N — достаточно большое (например, $N = 20$), с последующей линейной интерполяцией спектральных отсчётов S_2 на выходную сетку v_m спектральных отсчётов S_2 . Так или иначе, пересчёт спектральных измерений с использованием выражений (5)–(9) осуществляется примерно на два порядка быстрее, чем с (1)–(4).

Следует отметить, что вычисления согласно выражениям (5)–(9) необходимо проводить отдельно для длинноволнового (LW) и средневолнового (MW) поддиапазонов ИКФС-2, принимая особые предосторожности при их сшивке на стыке поддиапазонов вблизи 1210 см^{-1} для уменьшения погрешностей пересчёта.

Результирующий спектр, измеренный прибором ИКФС-2 и пересчитанный к параметрам спектральных данных SI-1, представлен на *рис. 3* (в терминах яркостных температур).

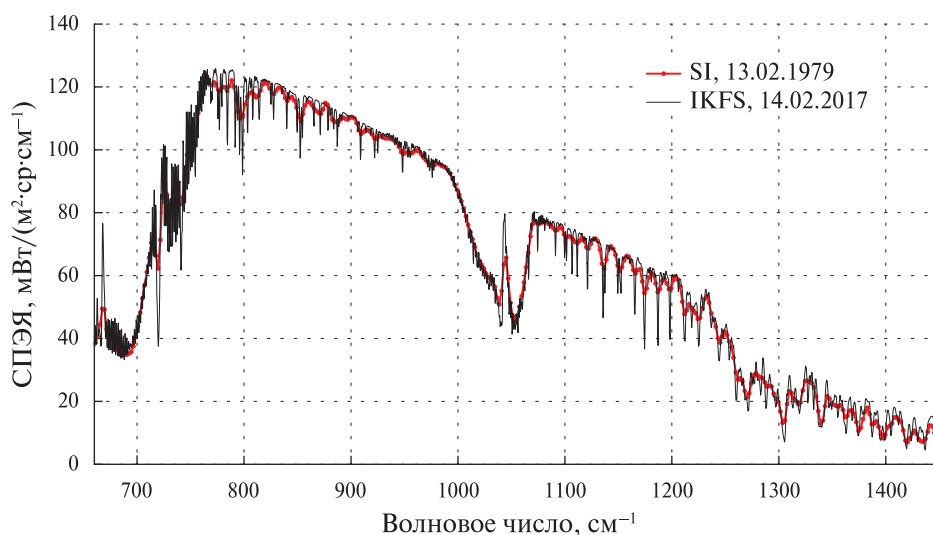


Рис. 1. Исходные спектры ИКФС-2 и SI-1, подлежащие сопоставлению

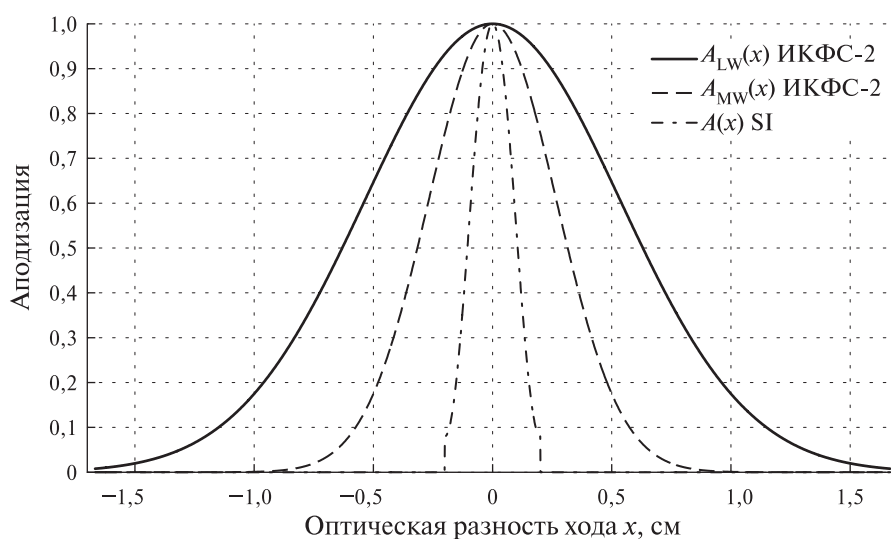


Рис. 2. Функции аподизации, применяемые для фурье-спектрометров ИКФС-2 и SI-1

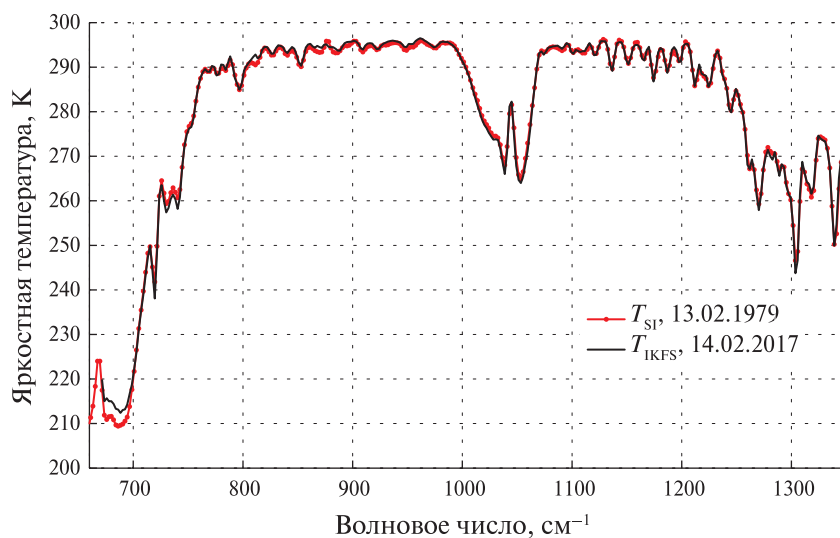


Рис. 3. Спектр ИКФС-2 в терминах яркостной температуры, пересчитанный к параметрам спектральных данных SI-1 для возможности сопоставления

Оценка погрешности пересчёта спектральных данных

Для оценки погрешности пересчёта использовался спектр высокого спектрального разрешения, вычисленный для стандартной модели атмосферы US_Standard (McClatchey et al., 1972) в спектральном диапазоне $400\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ с шагом $0,005\text{ см}^{-1}$, который затем сворачивался с аппаратными функциями рассматриваемых фурье-спектрометров:

$$L_{conv}(v) = \int L_{hi_res}(v') ILS(v - v') dv'$$

Спектры $L_{conv}(v_m)$, вычисленные для IASI, ИКФС-2 и SI-1, использовались в качестве эталонных при оценке погрешности пересчёта.

В результате было получено, что погрешность пересчёта спектра IASI к параметрам спектральных данных прибора ИКФС-2 не превышает $2\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$ (или $0,005\text{ К}$ в терминах яркостной температуры) во всём спектральном диапазоне ИКФС-2 $5\text{--}15\text{ мкм}$. В свою очередь, погрешности пересчёта спектров IASI и ИКФС-2 к параметрам спектральных данных прибора SI-1 не превышают $50\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$. Наличие всплеска погрешности пересчёта спектра ИКФС-2 к SI-1 вблизи 1210 см^{-1} (до $100\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$) обусловлено стыком LW- и MW-поддиапазонов ИКФС-2, имеющих различные функции аподизации и шаг спектральной сетки.

Следует отметить, что среднеквадратическое значение (СКЗ) шума в спектрах, определяемое как корень квадратный из диагонали ковариационной матрицы шума, зависит от применяемой функции аподизации. В частности, коэффициенты пересчёта пороговой спектральной яркости $NESR$ в неаподизированных спектрах ИКФС-2 к спектрам ИКФС-2 с гауссовой аподизацией определяются выражением:

$$\frac{NESR_{гаусс}(v)}{NESR_{неапод}(v)} = \frac{1}{\sqrt{2MPD \cdot 2s\sqrt{\pi}}}$$

и равны $0,532$ и $0,376$ для LW- и MW-поддиапазонов соответственно (здесь $s = FWHM / 2\sqrt{2\ln 2}$ — параметр гауссоиды). Коэффициент пересчёта СКЗ-шума в неаподизированных спектрах ИКФС-2 после их приведения к параметрам спектральных данных прибора SI-1 равен $0,218$. Таким образом, радиометрический шум ИКФС-2, для неаподизированных спектров равный $0,15\text{--}0,2\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$ в LW-поддиапазоне, в аподизированных спектрах равен $80\text{--}100\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$, а в спектрах, приведённых к спектрам SI-1, не превышает $30\text{--}35\text{ мВт}/(\text{м}^2\cdot\text{ср}\cdot\text{см}^{-1})$.

Заключение

Представленная методика взаимного пересчёта спектров теплового излучения атмосферы, измеренных фурье-спектрометрами различного спектрального разрешения, предназначена для решения следующих актуальных задач:

- проведение интеркалибровки современных фурье-спектрометров (IASI, CrIS, ИКФС-2) на основе сопоставления совместных синхронных измерений;
- проведение различных климатических исследований с использованием спектральных измерений приборов, разделённых значительными временными промежутками.

Разработанная методика использует алгоритмы быстрого преобразования Фурье и позволяет производить эффективный пересчёт больших массивов спектральных данных, подлежащих сопоставлению, при этом погрешность пересчёта спектров мала по сравнению с уровнем радиометрического шума, характерным для существующей аппаратуры.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 17-05-00768).

Литература

1. Бурицев А. И., Пахомов Л. А., Успенский А. Б., Ветлов И. П., Плохенко Ю. В., Соловьев В. И. Температурное зондирование атмосферы с ИСЗ «Метеор-2» // Метеорология и гидрология. 1983. № 10. С. 11–20.
2. Головин Ю. М., Завелевич Ф. С., Никулин А. Г., Козлов Д. А., Монахов Д. О., Козлов И. А., Архипов С. А., Целиков В. А., Романовский А. С. Бортовые инфракрасные фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25–37.
3. Головин Ю. М., Завелевич Ф. С., Козлов Д. А., Козлов И. А., Монахов Д. О., Никулин А. Г., Успенский А. Б., Рублев А. Н., Кухарский А. В. Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: результаты эксплуатации на борту метеоспутника «Метеор-М» № 2 // Исследование Земли из космоса. 2017. № 4. С. 88–100.
4. Завелевич Ф. С., Головин Ю. М., Мащицкий Ю. П., Никулин А. Г., Козлов Д. А., Монахов Д. О., Козлов И. А., Болмосов И. В., Архипов С. А., Целиков В. А., Романовский А. С. Информационные характеристики летного образца аппаратуры ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 291–300.
5. Закатов Д. П., Кемпе Ф., Пахомов Л. А. Спектрометр-интерферометр на ИСЗ «Метеор» // Дистанционное зондирование атмосферы со спутников «Метеор». Л.: Гидрометеоиздат, 1979. С. 3–10.
6. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 410 с.
7. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 280 с.
8. Пахомов Л. А., Тимофеев Ю. М., Шкляревский В. Г., Покровский О. М. Опыт термического зондирования на искусственном спутнике Земли «Метеор» // Метеорология и гидрология. 1971. № 11. С. 5–8.
9. Поляков А. В., Тимофеев Ю. М., Виролайнен Я. А., Успенский А. Б., Завелевич Ф. С., Головин Ю. М., Козлов Д. А., Рублев А. Н., Кухарский А. В. Спутниковый атмосферный зондирующий ИКФС-2. 1. Анализ измерений спектров уходящего излучения // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 71–78.
10. Успенский А. Б., Рублев А. Н. Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 4–15.
11. Desbiens R., Genest J., Tremblay P., Bouchard J. P. Correction of instrument line shape in Fourier transform spectrometry using matrix inversion // Applied Optics. 2006. V. 45. No. 21. P. 5270–5280.
12. Hanel R., Conrath B. Preliminary results from the Interferometer Experiment on Nimbus III // Science. 1969. V. 165. No. 3899. P. 1258–1260.
13. Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H. Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28 // Acta Astronautica. 1980. V. 7 (12). P. 1403–1416.
14. McClatchey R. A., Fenn R. A., Selby J. E. A., Volz F. E., Garing J. S. Optical properties of the atmosphere. 3rd ed. AFCRL, 1972. 108 p.
15. Smith W., Revercomb H., Bingham G., Larar A., Huang H., Zhou D., Li J., Liu X., Kireev S. Technical note: Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultra-spectral IR sounding of the lower atmosphere // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. No. 9. P. 5563–5574.
16. Tournier B., Blumstein D., Cayla F. R. IASI level 0 and 1 processing algorithms description // Intern. TOVS Study Conf. ITSC-XII. Lorne, Victoria, Australia, Feb. 2002.
17. Wark D. Q., Hilleary D. T. Atmospheric temperature: successful test of remote probing // Science. 1969. V. 165. No. 3899. P. 1256–1258.

Recalculation of outgoing atmospheric spectra measured by infrared Fourier transform spectrometers with different spectral resolution

D. A. Kozlov¹, Yu. M. Timofeev², A. V. Polyakov²,
I. A. Kozlov¹, W. Doehler, D. Oertel, D. Spaenkuch

¹ SSC Keldysh Research Centre, Moscow 125438, Russia
E-mail: dima_kozlov@mail.ru

² Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia
E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Recalculation algorithm for intercomparison of atmospheric spectra with different spectral resolution is presented. It is intended to compare measurements (level 1c data) of infrared Fourier transform spectrometers with different spectral resolution, apodizations and spectral grids. Firstly, the algorithm is dedicated to the routine intercalibration of IKFS-2 and IASI instruments (IASI is used as a reference). Secondly, it is planned to be used for climate investigations based on IKFS-2 (Meteor-M No. 2, 2014) and SI-1 (Meteor-28/29, 1977 and 1979) measurements. Used as an example of IKFS-2 to SI-1 spectral conversion, detailed step-by-step algorithm description is provided. To estimate recalculation error, line-by-line spectra for standard atmosphere convolved with IKFS-2 and SI-1 instrument line shape was used. The difference between modelled IKFS-2 spectra converted to SI-1 spectral data parameters and modelled SI-1 spectra does not exceed radiometric noise level of the instruments. Finally, the issues of conversion error and radiometric noise in converted spectra are also discussed.

Keywords: infrared Fourier transform spectrometer, spectral resolution, apodization, instrument line shape, intercomparison, IKFS-2, SI-1, IASI

Accepted: 12.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-52-60

References

1. Burtsev A. I., Pakhomov L. A., Uspenskiy A. B., Vetlov I. P., Plokhenko Yu. V., Soloviev V. I., Temperaturnoe zondirovanie atmosfery s ISZ "Meteor-2" (Temperature sounding of the atmosphere from Meteor-2 satellite), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1983, No. 10, pp. 11–20.
2. Golovin Yu. M., Zavelevich F. S., Nikulin A. G., Kozlov D. A., Monakhov D. O., Kozlov I. A., Arkhipov S. A., Tselikov V. A., Romanovsky A. S., Bortovye infrakrasnye Furie-spectrometry dlya temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli (Spaceborne infrared Fourier transform spectrometers for temperature-humidity sounding of the Earth's atmosphere), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 6, pp. 25–37.
3. Golovin Yu. M., Zavelevich F. S., Kozlov D. A., Kozlov I. A., Monakhov D. O., Nikulin A. G., Uspenskiy A. B., Rublev A. N., Kukharskiy A. V., Infrakrasnyi Furie-spectrometr IKFS-2: rezul'taty ekspluatatsii na bortu meteosputnika "Meteor-M2" (Infrared Fourier transform spectrometer IKFS-2: flight results on board Meteor-M2 satellite), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 88–100.
4. Zavelevich F. S., Golovin Yu. M., Matsitskiy Yu. P., Nikulin A. G., Kozlov D. A., Monakhov D. O., Kozlov I. A., Bolmosov I. V., Arkhipov S. A., Tselikov V. A., Romanovsky A. S., Informatsionnye kharakteristiki letnogo obraztsa apparatury IKFS-2 (Performance of IKFS-2 instrument flight model), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 291–300.
5. Zakatov D. P., Kempe F., Pakhomov L. A., Spectrometr-interferometr na ISZ "Meteor" (Spectrometer-interferometer on board Meteor satellite), *Distantsionnoe zondirovanie atmosfery so sputnikov "Meteor"*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, pp. 3–10.
6. Kondrat'ev K. Ya., Timofeev Yu. M., *Termicheskoe zondirovanie atmosfery so sputnikov* (Thermal sounding of the atmosphere from satellites), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 410 p.
7. Kondrat'ev K. Ya., Timofeev Yu. M., *Meteorologicheskoe zondirovanie atmosfery iz kosmosa* (Meteorological sounding of the atmosphere from space), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 280 p.

8. Pakhomov L. A., Timofeev Yu. M., Shklyarevskiy V. G., Pokrovskiy O. M., Opyt termicheskogo zondirovaniya na iskusstvennom sputnike Zemli «Meteor» (Experience of thermal sounding on Meteor satellite), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1971, No. 11, pp. 5–8.
9. Polyakov A. V., Timofeev Yu. M., Virolainen Ya. A., Uspenskiy A. B., Zavelevich F. S., Golovin Yu. M., Kozlov D. A., Rublev A. N., Kukharskiy A. V., Sputnikovyi atmosferyni zondirovshchik IKFS-2. 1. Analiz izmereniy spektrov ukhodyashchego izlucheniya (Satellite atmospheric sounder IKFS-2: analysis of measured spectra), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 5, pp. 71–78.
10. Uspenskiy A. B., Rublev A. N., Sovremennoe sostoyanie i perspektivy sputnikovogo giperspektral'nogo atmosfernogo zondirovaniya (Current status and prospects of satellite hyperspectral atmospheric sounding), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 6, pp. 4–15.
11. Desbiens R., Genest J., Tremblay P., Bouchard J. P., Correction of instrument line shape in Fourier transform spectrometry using matrix inversion, *Applied Optics*, 2006, Vol. 45, No. 21, pp. 5270–5280.
12. Hanel R., Conrath B., Preliminary Results from the Interferometer Experiment on Nimbus III, *Science*, 1969, Vol. 165, No. 3899, pp. 1258–1260.
13. Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H., Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28, *Acta Astronautica*, 1980, Vol. 7 (12), pp. 1403–1416.
14. McClatchey R. A., Fenn R. A., Selby J. E. A., Volz F. E., Garing J. S., Optical properties of the atmosphere (Third edition), *AFCRL*, 1972, 108 p.
15. Smith W., Revercomb H., Bingham G., Larar A., Huang H., Zhou D., Li J., Liu X., Kireev S., Technical note: Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultra-spectral IR sounding of the lower atmosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, No. 9, pp. 5563–5574.
16. Tournier B., Blumstein D., Cayla F. R., IASI level 0 and 1 processing algorithms description, *International TOVS Study Conference — XII*, Lorne, Victoria, Australia, 2002.
17. Wark D. Q., Hilleary D. T., Atmospheric Temperature: Successful Test of Remote Probing, *Science*, 1969, Vol. 165, No. 3899, pp. 1256–1258.