

УДК 502/504(075)

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ МЮОННЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МАТРИЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ГОДОСКОПА УРАГАН

© 2021 г. В. Е. Чинкин^{1, 4, *}, В. Г. Гетманов^{1, 2}, А. Д. Гвишиани^{1, 2},
И. И. Яшин^{1, 3}, А. А. Ковыляева^{1, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: koladik@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

Предложен метод оценивания нормированных вариаций интенсивностей потоков мюонов для его использования в задачах распознавания локальных анизотропий. Введены нормированные аппаратные функции и использована скользящая двумерная фильтрация. Исследованы оценки нормированных вариаций интенсивностей на экспериментальных наблюдениях годоскопа УРАГАН.

DOI: 10.31857/S036767652103008X

ВВЕДЕНИЕ

Оценивание нормированных вариаций функций распределения интенсивностей потоков мюонов (ФРИПМ) является актуальной задачей для физики космических лучей и техники мюонной диагностики [1, 2]. Матричные наблюдения мюонного годоскопа УРАГАН [3] (МГ)—ФРИПМ $Y(i, j, Tk)$ определяются для $i = 1, \dots, N_1$, $j = 1, \dots, N_2$, $N_1 = 90$, $N_2 = 76$, T -шаг по времени, $k = 1, 2, \dots$ и могут считаться выходными для МГ. Индексы i, j задают азимутальные и зенитные углы $\varphi_i = \Delta\varphi(i - 1)$, $\vartheta_j = \Delta\vartheta(j - 1)$, $\Delta\varphi = 1^\circ$, $\Delta\vartheta = 4^\circ$. Входные ФРИПМ для МГ обозначаются как $Y_0(i, j, Tk)$.

МГ-наблюдения содержат особенности из-за различных вариантов модуляций потоков мюонов (ПМ). Первый вариант модуляций обуславливается конструкцией МГ, второй — метеовозмущениями, третий — зависимостью уровнем шумов в МГ-наблюдениях от зенитных углов.

В данной работе предложен метод оценивания нормированных вариаций функций интенсивностей ПМ на основе временных рядов матричных МГ-наблюдений для распознавания в них локальных анизотропий (ЛА).

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ НОРМИРОВАННЫХ ВАРИАЦИЙ ФРИПМ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ АНИЗОТРОПИЙ

Возможны четыре подхода к задаче распознавания ЛА. Первый подход подразумевает распознавание непосредственно на основе выходных ФРИПМ $Y(i, j, Tk)$, $k = 1, 2, \dots$. Однако, из-за значительных модуляций по сравнению с величинами ЛА, его реализация проблематична.

Второй подход предполагает оценивание ЛА на основе оценок $Y_0^\circ(i, j, Tk)$ с использованием $Y(i, j, Tk)$, $k = 1, 2, \dots$ и т.н. аппаратной функции (АФ) [4] $F(i, j, Tk)$. Входная ФРИПМ $Y_0(i, j, Tk)$ и выходная $Y(i, j, Tk)$, при условии линейности МГ, связываются на основе соотношения

$$Y(i, j, Tk) = F(i, j, Tk)Y_0(i, j, Tk), \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

В общем случае АФ $F(i, j, Tk) = F_0(i, j)F_w(j, Tk)$ представляет собой произведение функции $F_0(i, j)$, зависящей от конструкции МГ, и $F_w(j, Tk)$, моделирующей метеомодуляции. Оценки $Y_0^\circ(i, j, Tk)$ из (1) могут определяться путем решения обратной задачи. С учетом (1) получим

$$Y_0^\circ(i, j, Tk) = Y(i, j, Tk)/F^\circ(i, j), \quad k = 1, \dots, k_f, \quad (2)$$

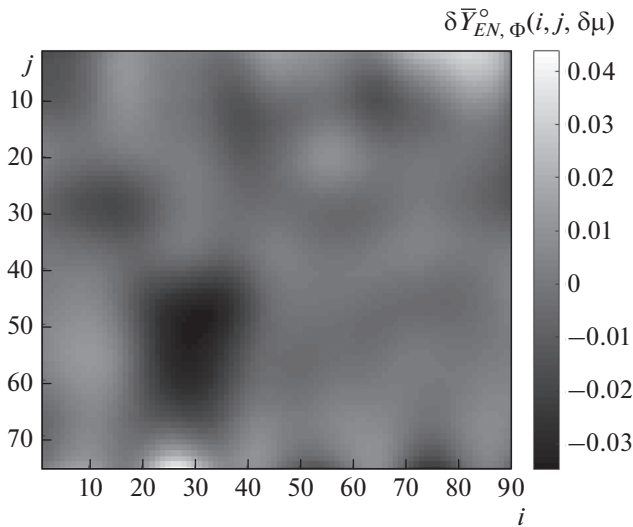


Рис. 1. 2D-изображение усредненной отфильтрованной оценки нормированных вариаций экспериментальной ФРИМП $\delta \bar{Y}_{EN,\Phi}^\circ(i, j, \delta\mu)$ с модуляционным понижением.

где $F^\circ(i, j)$ -оценка АФ. Из (2) следует, что точно-му оцениванию входной ФРИМП и распознаванию ЛА [5], препятствуют погрешности в оценках АФ $F^\circ(i, j)$, шумы в выходных ФРИМП и возможные малые значения ЛА.

Третий подход подразумевает введение эталонного и текущих временных участков, на которых вычисляются доверительные интервалы [6] для математических ожиданий МГ-наблюдений. Распознавание ЛА производится путем анализа расположений доверительных интервалов.

Четвертый подход альтернативен третьему. Распознавание на основе нормированных вариаций ФРИМП осуществим в два этапа. На первом – рассмотрим $Y(i, j, Tk)$, $k = 1, \dots, k_{f1}$ и модельную АФ в виде N_1, N_2 параметров $f_{0,ij}$. Математические ожидания случайных $Y_0(i, j, Tk)$ для телесных углов i, j обозначим как c_0 . ФРИМП и АФ определим с точностью до множителя. Введем нормированную АФ $F_N(i, j) = f_{ij}$ и функционал S_0 , где $f_{ij} = f_{0,ij}c_0$

$$S_0(f, Y) = \sum_{k=1}^{k_{f1}} \left(\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (Y(i, j, Tk) - f_{ij})^2 \right). \quad (3)$$

Параметры f_{ij}° найдем путем минимизации функционала S_0 (3)

$$\frac{\partial S(f, Y)}{\partial f_{ij}} = 0, \quad f_{ij}^\circ = \frac{1}{k_{f1}} \sum_{k=1}^{k_{f1}} Y(i, j, Tk), \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N_1, \quad j = 1, \dots, N_2.$$

На втором этапе запишем разность $\delta Y^\circ(i, j, Tk) = Y(i, j, Tk) - F_N^\circ(i, j)$, $k = k_{f1} + 1, \dots, k_{f1} + k_{f2}$. Величины шумов для $\delta Y^\circ(i, j, Tk)$ пропорциональны значениям АФ. Представим оценки нормированных вариаций выходных ФРИМП $\delta Y_N^\circ(i, j, Tk)$

$$\delta Y_N^\circ(i, j, Tk) = (Y(i, j, Tk) - F_N^\circ(i, j)) / F_N^\circ(i, j), \quad (5)$$

$$k = k_{f1} + 1, \dots, k_{f1} + k_{f2}.$$

Вычислим усредненную оценку нормированных вариаций ФРИМП

$$\delta \bar{Y}_N^\circ(i, j) = \frac{1}{k_{f2}} \sum_{k=k_{f1}+1}^{k_{f1}+k_{f2}} \delta Y_N^\circ(i, j, Tk). \quad (6)$$

Для снижения шумов в оценках (4), (5) и (6) применим скользящую двумерную фильтрацию [7]. С этой целью сформируем на прямоугольнике (N_1, N_2) систему аппроксимационных кусочно-линейных моделей размерности $(\Delta N_1, \Delta N_2)$ с шагами скольжения (N_{d1}, N_{d2}) и произведем их взвешенное усреднение. Результат фильтрации для $A_N^\circ(i, j)$ представим как $F_{N,\Phi}^\circ(i, j) = F_{N,\Phi}^\circ(\Delta N, N_d, i, j)$. При делении в (5) на $F_{N,\Phi}^\circ(i, j)$ для малых значений знаменателя возможны большие шумовые погрешности. Чтобы их снизить реализуем пороговую фильтрацию, результат которой обозначим, как $F_{N,\Phi1}^\circ(i, j) = F_{N,\Phi1}^\circ(\Delta N, N_d, i, j)$, и который получим на основе соотношений $F_{N,\Phi1}^\circ(i, j) = F_{N,\Phi}^\circ(i, j)$, если $F_{N,\Phi}^\circ(i, j) > f_0$, $F_{N,\Phi1}^\circ(i, j) = f_0$, если $F_{N,\Phi}^\circ(i, j) \leq f_0$, где f_0 – порог. Аналогично отфильтруем нормированные вариации выходных ФРИМП.

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ НОРМИРОВАННЫХ ВАРИАЦИЙ ФРИМП НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МГ-НАБЛЮДЕНИЯХ

Тестирование производилось на МГ-наблюдениях $Y_E(i, j, Tk)$, $k = 1, \dots, k_{f1} + k_{f2}$ взятых из [8]. Для индексов $k = k_{f1} + 1, \dots, k_{f1} + k_{f2}$ были сформированы модулирующие функции $\mu(i, j, Tk) = \mu(i, j)$ с прямоугольной областью ЛА

$$\begin{cases} \mu(i, j) = 1 - \delta\mu & i_1 \leq i \leq i_2 \wedge j_1 \leq j \leq j_2 \\ \mu(i, j) = 1 & \text{other wise} \end{cases}, \quad (7)$$

где $\delta\mu$ – величина понижения для области ЛА. Реализовывались произведения

$$Y_E(i, j, Tk, \mu) = Y_E(i, j, Tk)\mu(i, j), \quad (8)$$

$$k = k_{f1} + 1, \dots, k_{f2}.$$

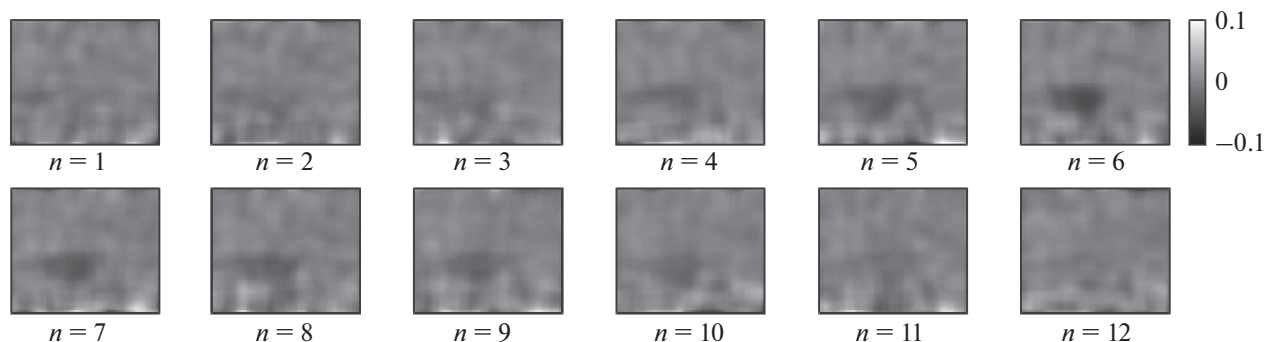


Рис. 2. 2D-изображения усредненных отфильтрованных оценок нормированных вариаций экспериментальных ФРИПМ $\delta \bar{Y}_{EN,\Phi}^\circ(i, j, \delta\mu(n))$ с модуляционными ЛА-понижениями.

С использованием (4) на основе $Y_E(i, j, Tk)$, $k = 1, \dots, k_{f1}$, находилась оценка нормированной АФ $F_{EN,\Phi}^\circ(i, j)$. Для $Y_E(i, j, Tk, \mu)$ и $F_{EN,\Phi}^\circ(i, j)$, $k = k_{f1} + 1, \dots, k_{f2}$ вычислялись $\delta Y_{EN,\Phi}^\circ(i, j, Tk, \mu)$, $k_{f1} = 20$, $k_{f2} = 20$, $\delta\mu = 0.03$, $i_1 = 20$, $i_2 = 40$, $j_1 = 40$, $j_2 = 65$. На рис. 1 представлено 2D-изображение $\delta \bar{Y}_{EN,\Phi}^\circ(i, j, \mu)$, с видимой областью ЛА-понижения. Вычислялись математические ожидания (м. о) и среднеквадратичные значения (СКЗ) для $\delta \bar{Y}_{EN,\Phi}^\circ(i, j, \mu)$ с $\delta\mu = 0 - \sigma_E^\circ = 1.327 \cdot 10^{-3}$; определялись м. о. и СКЗ для $\delta \bar{Y}_{EN,\Phi}^\circ(i, j, \mu)$ в области ЛА-понижения, получены $m_E^\circ(\delta\mu) = -0.0267$, $\sigma_E^\circ(\delta\mu) = 1.349 \cdot 10^{-4}$. Оценки $m_E^\circ(\delta\mu)$ были на порядок больше величины оценки m_E° .

Метод оценивания нормированных вариаций ФРИПМ тестировался на задаче распознавания последовательности областей ЛА-понижений. Были сформированы матрицы экспериментальных МГ-наблюдений $Y_E(i, j, Tk)$, $k = 1, \dots, k_{f1} + n_0 k_{f2}$, $n_0 = 12$. Для $k = 1, \dots, k_{f1}$ определялась оценка нормированной экспериментальной АФ $F_{EN,\Phi}^\circ(i, j)$. Образовывались интервалы с точками $k_{n1} \leq k \leq k_{n2}$, $k_{n1} = k_{f1} + 1 + (n - 1)k_{f2}$, $k_{n2} = k_{n1} + k_{f1} - 1$, $n = 1, \dots, n_0$; задавались по (7) функции $\mu(i, j, n)$, с $\delta\mu(n) = 0.005 + 0.005(n - 1)$, $n = 1, \dots, 6$, $\delta\mu(n) = 0.03 - 0.005(n - 7)$, $n = 7, \dots, n_0$, $i_1 = 20$, $i_2 = 40$, $j_1 = 20$, $j_2 = 45$. На рис. 2 представлены 2D-изображения последовательности $\delta \bar{Y}_{EN,\Phi}^\circ(i, j, \delta\mu(n))$; на кадрах с $n = 4-9$ отчетливо видны области понижения – затемнения с ЛА, которые соответствуют $\delta\mu \approx 0.02-0.03$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод оценивания нормированных вариаций ФРИПМ оказался эффективным и работоспособным. Исследование метода на экспериментальных МГ-наблюдениях показало, что оценки м. о. нормированных вариаций ФРИПМ для областей с ЛА на порядок превосходили оценки м. о. для областей без ЛА, что позволило сделать вывод о его благоприятных возможностях для распознавания ЛА. Распознавание последовательности ЛА-понижений уверенно реализовывалось для $\delta\mu = 0.02-0.03$.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 17-17-01215-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dorman L.I.* Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground. Springer, 2010.
2. *Астапов И.И., Барбашина Н.С., Борог В.В. и др.* Мюонная диагностика магнитосферы и атмосферы Земли. М.: Изд-во МИФИ. 2014.
3. *Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* // Adv. Space Res. 2015. V. 56. No. 12. P. 2693.
4. *Лебедева В.В.* Экспериментальная оптика. 4-ое издание. М.: Изд-во физ. фак-та МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005.
5. *Гетманов В.Г., Шутенко В.В., Яшин И.И.* // Измерит. техн. 2019. № 2. С. 45; *Getmanov V.G., Shutenko V.V., Yashin I.I.* // Meas. Tech. 2019. V. 62. No. 2. P. 147.
6. *Добровольский М.Н., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 706; *Dobrovolsky M.N., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 647.
7. *Getmanov V.G., Sidorov R.V., Dobrovolsky M.N. et al.* // Pattern Recogn. Image Analysis. 2020. V. 30. No. 3. P. 460.
8. <http://www.nevod.mephi.ru>.

Method for estimating variations in muon flux intensities based on time series of matrix observations of the URAGAN hodoscope

V. E. Chinkin^{a, d, *}, V. G. Getmanov^{a, b}, A. D. Gvishiani^{a, b}, I. I. Yashin^{a, c}, A. A. Kovylyayeva^{a, c}

^a*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

^b*Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia*

^c*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, 115409 Russia*

^d*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

**e-mail: koladic@gmail.com*

A method for estimating variations in muon flux intensities is proposed for use in local anisotropy recognition problems. Normalized hardware functions and sliding two-dimensional filtering are introduced. Estimates of intensity variations are studied using experimental observations of the URAGAN hodoscope.