

УДК 528.852

МОНИТОРИНГ ОБЛАЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПО ДАННЫМ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ*

А. А. Бучнев, В. П. Пяткин

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6
E-mail: baa@ooi.sccc.ru
pvp@ooi.sccc.ru*

Рассматривается процесс построения векторных полей перемещений облачных образований в атмосфере по серии последовательных изображений, полученных с геостационарных спутников. Процесс основан на поиске максимума коэффициента взаимной корреляции между объектами-эталоном, найденными на текущем изображении серии, и положением этих эталонов на следующем изображении серии. При этом эталон, кроме преобразования переноса, может также подвергаться преобразованиям поворота и масштабирования. Для повышения точности вычислений использована интерполяция пикселей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг, геостационарные спутники, облачные образования, обработка изображений, корреляционный анализ.

Введение. Одной из актуальных задач космического мониторинга является определение пространственных перемещений облачных образований в атмосфере по разновременным изображениям, получаемым с геостационарных спутников Земли.

Согласно [1] одним из способов определения пространственных перемещений объектов по разновременным спутниковым изображениям является метод, основанный на нахождении максимумов коэффициента взаимной корреляции. В [2] аналогичный подход рассматривается в качестве метода распознавания образов, известного как корреляционное сопоставление. В обоих случаях корреляция используется как средство поиска эквивалентов объекта-эталона, представленного в виде изображения $w(x, y)$ размера $J \times K$, на изображении $f(x, y)$ размера $M \times N$; предполагается, что $J \leq M$ и $K \leq N$. Коэффициент взаимной корреляции

$$\gamma(x, y) = \frac{\sum_s \sum_t [f(x + s, y + t) - f_m(x, y)][w(s, t) - w_m]}{(JK - 1)\sigma_w\sigma_f}. \quad (1)$$

Здесь w_m — среднее значение пикселей в эталоне w ; f_m — среднее значение элементов изображения f в области, покрываемой эталоном. В знаменателе (1) используется произведение стандартных отклонений σ_w пикселей эталона w и σ_f пикселей изображения f в области, покрываемой эталоном.

В общем случае размеры и ориентация объекта-эталона, найденного на очередном изображении в серии изображений, на последующем изображении могут иметь другие значения. Нормированное относительно изменений амплитуд выражение (1) не является таковым относительно поворота или изменений размеров (масштабирования) эталона. В [2] отмечается, что «Нормировка относительно размеров связана с пространственным масштабированием, что само по себе связано с весьма трудоемкими вычислениями. Нормировка относительно поворота является еще более трудной задачей...». Иногда для решения

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-07-00085).

задачи сопоставления (совмещения) изображений с учетом масштабирования и поворота эталона используются менее точные по сравнению с (1), но более простые с вычислительной точки зрения критерии (например, в [3] и ряде других работ используется сумма абсолютных значений разностей соответствующих компонент изображений).

Согласно [4] поиск позиций найденных эталонов (определение смещений) на следующем изображении серии может быть реализован одним из трех методов: определением максимума коэффициента взаимной корреляции в пространственной области, определением максимума коэффициента взаимной корреляции в частотной области на основе быстрого преобразования Фурье и нахождением минимума суммы квадратов расстояний. Упомянутый источник также не предполагает при поиске смещений каких-либо преобразований эталона за исключением преобразования переноса.

В предлагаемой работе определение смещений эталонов производится на основе вычисления максимума коэффициента взаимной корреляции в пространственной области в соответствии с формулой (1). При этом эталон может подвергаться преобразованию, состоящему из масштабирования, поворота и переноса. Далее приведен соответствующий алгоритм и представлены результаты вычислительных экспериментов на изображениях, полученных с космического аппарата (КА) METEOSAT-8. Эти результаты свидетельствуют как о необходимости учета масштабирования и поворота эталона, так и о приемлемом времени соответствующих вычислений.

Решение задачи состоит из следующих основных шагов:

— поиск на текущем изображении W квадратных объектов-эталонов, основанный на достижении максимума контраста либо максимума энтропии; центр эталона совпадает с центром квадрата;

— поиск позиций найденных эталонов на последующем изображении F , основанный на достижении максимального значения коэффициента взаимной корреляции;

— построение векторных полей пространственных перемещений объектов в соответствии с найденными позициями.

Поиск эталонов. Поиск эталонов осуществляется по методике, предложенной в [4], согласно которой предусматриваются эталоны двух типов: главные и вторичные. Позиции главных эталонов совпадают с концами векторов перемещений эталонов из предыдущего изображения (для первого изображения серии главных эталонов нет).

Поиск вторичных эталонов размера $Targ_Size$ производится в узлах сетки с размером $Grid_Size$. Размер квадратной области с центром в узлах сетки для поиска эталонов задается параметром $Targ_Search$. Допустимое минимальное расстояние между эталонами управляется параметром $Targ_Dist$. Оптимальной позицией для эталона внутри области поиска считается та, в которой достигается максимум значения управляющего параметра Par — контраста либо энтропии. При поиске эталонов внутри области размера $Targ_Search$ используются локальные средние и стандартные отклонения, вычисленные по окрестности размера 3×3 . Контраст находится как разность максимального и минимального значений локальных средних. Кроме перечисленных параметров, определяющих «физические» характеристики, при поиске эталонов используются параметры, оценивающие «изменчивость» изображения внутри области, покрываемой эталоном: Min_St_Dev — минимальное значение локального стандартного отклонения, Num_Gr_SD — минимальное количество пикселей со стандартным отклонением, большим Min_St_Dev .

Определение смещений эталонов. Смещение определяется для каждого из K_Targs найденных эталонов. Поиск новой позиции эталона производится внутри квадратной области размера $Search_Size$. Центр области поиска совпадает с исходной позицией эталона. Новой позицией эталона считается та, в которой достигается максимальное значение коэффициента взаимной корреляции $Corr$. В процессе сканирования области поиска эталон подвергается преобразованиям масштабирования и поворота. Масштаб и угол поворота

эталона задаются следующими параметрами: $Scale_Min$ и $Scale_Max$ — минимальное и максимальное значения масштаба эталона; $Scale_Delta$ — приращение масштаба эталона; $Angle_Beg$ и $Angle_End$ — начальный и конечный углы поворота эталона (в градусах) соответственно; $Angle_Delta$ — приращение угла поворота эталона (в градусах).

Если s , $Scale_Min \leq s \leq Scale_Max$, — текущий масштаб эталона, φ , $Angle_Beg \leq \varphi \leq Angle_End$, — текущий угол поворота эталона, то при применении преобразований масштабирования и поворота координаты (x, y) пикселей эталона переходят в координаты выходного образа $(x', y') = (x, y)T$, где T — матрица преобразования:

$$T = s \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Известно (например, [1]), что применение прямого преобразования с матрицей (2) к объектам с дискретными координатами приводит к тому, что пиксел с координатами (x', y') может лежать между пикселями выходного образа. Использование техники назначения результату преобразования ближайшего соседа пикселя с координатами (x', y') не является решением вопроса из-за возможного появления пустот в выходном образе. Простейшим (в идейном смысле) методом является распределение значения входного пикселя между несколькими выходными. В этом методе пикселы рассматриваются как квадраты и часть площади входного пикселя, которая покрывает выходной, используется в качестве весового коэффициента. Ясно, что в реализации техника подобного рода достаточно громоздка. Более простой альтернативой является обратное преобразование: если из каких-то дополнительных соображений известны координаты (x', y') пикселей выходного образа, то соответствующие им координаты пикселей эталона $(x, y) = (x', y')T^{-1}$.

Такая схема позволяет избежать появления пустот в выходном образе. Но здесь, также как и в прямом преобразовании, пиксел эталона, координаты которого получены с использованием матрицы T^{-1} , может лежать между другими пикселями. Следовательно, возникает проблема интерполяции пикселей эталона, особенности использования которой будут описаны далее.

Приведем более подробное изложение реализованной вычислительной схемы. Применяя к координатам вершин квадратного эталона с центром в начале координат прямое преобразование (2) для текущих значений s и φ , получим координаты (округленные до ближайшего соседа) преобразованного квадрата. Далее к полученному квадрату применяется процедура, аналогичная методу сканирующих строк в заполнении многоугольников [5]. Первым шагом является сортировка вершин квадрата по возрастанию координаты y . Результатом ее является набор координат (x_1, y_{\min}) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_{\max}) , где $y_{\min} \leq y_2 \leq y_3 \leq y_{\max}$. Тогда преобразованный квадрат занимает $r = y_{\max} - y_{\min} + 1$ строк. Для каждой сканирующей строки y_s , $1 \leq s \leq r$, вычисляются (округленные до ближайших целых) координаты точек ее пересечения с ребрами квадрата (x_s^b, y_s) , (x_s^e, y_s) . В строке y_s преобразованный квадрат занимает $k_s = x_s^e - x_s^b + 1$ пикселей. Для каждого из k_s пикселей с координатами (x_s^i, y_s) , $x_s^b \leq x_s^i \leq x_s^e$, с использованием матрицы T^{-1} находятся (округленные до ближайших целых) соответствующие координаты исходного квадрата. Таким образом, преобразованный квадрат полностью определяется количеством строк r , начальными координатами (x_s^b, y_s) каждой строки, количеством пикселей k_s в строке и координатами соответствующих пикселей исходного квадрата. Напомним, что все координаты задаются относительно нуля. Одновременно здесь же вычисляется площадь S (количество пикселей) преобразованного квадрата.

Дальнейшие действия поочередно выполняются по отношению к каждому из найденных эталонов. Пусть (x_n, y_n) — координаты (центр) текущего эталона. Преобразованный ранее квадрат прибавлением к координатам пикселей значений (x_n, y_n) переносится в

центр эталона на текущем изображении W , определяя тем самым преобразованный эталон. В массив `pix_1` заносятся соответствующие пиксели w изображения W , подсчитывается их сумма и в конце находится среднее значение w_m . Затем элементы массива `pix_1` меняются на $w' = w - w_m$, суммируются квадраты величин w' и определяется стандартное отклонение σ_w .

Далее на изображении F для каждой допустимой позиции (x^f, y^f) внутри области размера `Search_Size` с центром в (x_n, y_n) выполняются следующие действия. Преобразованный ранее квадрат прибавлением к координатам (x_s^b, y_s^b) значений (x^f, y^f) переносится на изображение F . В массив `pix_2` заносятся соответствующие пиксели f изображения F , подсчитывается их сумма и в конце вычисляется среднее значение f_m . Затем элементы массива `pix_2` меняются на $f' = f - f_m$, суммируются квадраты величин f' и находится стандартное отклонение σ_f . Производится свертка массивов `pix_1` и `pix_2`, которая делится на произведение $(S - 1)\sigma_w\sigma_f$. Отсюда определяется значение коэффициента корреляции $\gamma(x^f, y^f)$ в позиции (x^f, y^f) . Если значение $\gamma(x^f, y^f)$ больше текущего значения коэффициента корреляции γ_t , то производится присвоение $\gamma_t = \gamma(x^f, y^f)$ и запоминаются координаты (x^f, y^f) позиции нового максимума коэффициента корреляции.

По окончании обработки всех `K_Targs` эталонов производится переход к новой паре значений масштаба s и угла поворота φ , определяющих новую пару матриц преобразований T и T^{-1} .

Далее из найденных `Npos` позиций могут быть выделены `Npos_C` позиций, для которых значения коэффициентов `Corr` не меньше порогового значения `Thres_Corr`, а длина векторов смещений больше значения параметра `Min_Length`. Именно эти `Npos_C` позиций (по умолчанию `Npos_C = Npos`) участвуют в последующих операциях: отображении векторов смещений и определении новых эталонов.

Результаты вычислительных экспериментов, выполненных на персональном компьютере с процессором AMD Athlon(tm) XP 3200+, приведены в табл. 1. В качестве исходного изображения W взято изображение с геостационарного КА METEOSAT-8 в оптическом диапазоне (длина волны 620 нм), полученное 15.03.2006 г. в 11 ч 30 мин. Следующим изображением F является изображение того же канала через 15 мин. Поиск эталонов производился с использованием следующих параметров:

$$\begin{aligned} \text{Targ_Size} &= 15, & \text{Grid_Size} &= 32, & \text{Targ_Search} &= 40, \\ \text{Targ_Dist} &= 30, & \text{Min_St_Dev} &= 30, & \text{Num_Gr_SD} &= 110. \end{aligned}$$

Выделен `K_Targs = 3461` эталон. При определении коэффициентов корреляции значение `Scale_Delta = 0,1`. Значение параметра `Angle_Delta = 3^\circ`. В табл. 1 собраны данные о количестве позиций `Npos` с ненулевыми векторами смещений, минимальном и максимальном значениях коэффициента корреляции, времени выполнения программы, а также значений `Npos_C` для `Thres_Corr` 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 при длине векторов смещений `Min_Length > 3`.

Таблица 1

Scale_Min	Scale_Max	Angle_Min	Angle_Max	Npos	Min_Corr	Max_Corr	Time, s	Thres_Corr				
								0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,0	1,0	0	0	2878	0,292	0,995	2	1173	1149	1105	966	616
0,8	1,2	-45	45	2903	0,413	0,995	62	1221	1201	1163	1037	668
0,8	1,2	-90	90	2904	0,466	0,995	124	1227	1208	1166	1038	668
0,8	1,2	0	357	2904	0,466	0,995	240	1232	1214	1171	1044	672

Анализ данных таблицы показывает, что наиболее существенные изменения по сравнению с первой строкой, относящейся к тождественному преобразованию, находятся во второй строке (диапазон изменения угла поворота эталона $[-45^\circ, 45^\circ]$). Последующие строки, связанные с более широкими диапазонами изменения угла поворота, содержат лишь незначительные уточнения. Вероятно, это связано с малым интервалом времени между изображениями.

Интерполяция значений пикселей. Рассмотрим теперь особенности интерполяции значений пикселей эталонов. Согласно [1] интерполяция необходима, так как преобразованная дискретная сетка точек входного изображения, вообще говоря, не совпадает больше с дискретной сеткой выходного изображения, и наоборот. Основой интерполяции является теорема об отсчетах. Эта теорема утверждает, что цифровое изображение полностью представляет собой непрерывное изображение при условии, что выполнены требования об отсчетах.

Интерполяция значений пикселей является разделимым преобразованием. Следовательно, необходимо решить только одномерную задачу интерполяции. Полученный результат позволяет решить и двумерную задачу (и даже задачу интерполяции большей размерности).

Пусть (x, y) — некоторые координаты внутри единичного квадрата с вершинами $(0, 0)$ и $(1, 1)$ (фактически $0 \leq x, y < 1$ — дробные части координат (X, Y) , полученных при выполнении геометрических преобразований эталона: $X = \text{int}(X) + x$, $Y = \text{int}(Y) + y$). Пусть $P = \{p_{00}, p_{10}, p_{01}, p_{11}\}$ — набор пикселей эталона в вершинах единичного квадрата (верхний левый, верхний правый, нижний левый, нижний правый пиксели соответственно). Тогда значение $p(x, y)$ пикселя, которое будет участвовать в вычислении коэффициента корреляции, при линейной интерполяции по двум координатам (билинейной интерполяции) определяется по классической формуле [2]:

$$p(x, y) = (1 - x)(1 - y)p_{00} + (1 - x)yp_{01} + x(1 - y)p_{10} + xyp_{11}.$$

Биквадратная интерполяция (по 9 пикселям) находится из следующего выражения:

$$p(x, y) = \frac{1}{4} (1, x, x^2) M P M^T (1, y, y^2)^T,$$

где

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}$$

— матрица коэффициентов;

$$P = \begin{pmatrix} p_{-1,-1} & p_{-1,0} & p_{-1,1} \\ p_{0,-1} & p_{0,0} & p_{0,1} \\ p_{1,-1} & p_{1,0} & p_{1,1} \end{pmatrix}$$

— матрица пикселей; T — символ транспонирования.

Для бикубической интерполяции (по 16 пикселям) используем построенный в [1] интерполяционный многочлен

$$p(x, y) = \frac{1}{2304} (1, x_c, x_c^2, x_c^3) M P M^T (1, y_c, y_c^2, y_c^3)^T,$$

где $x_c = x - 0,5$; $y_c = y - 0,5$;

$$M = \begin{pmatrix} -3 & 27 & 27 & -3 \\ 2 & -54 & 54 & -2 \\ 12 & -12 & -12 & 12 \\ -8 & 24 & -24 & 8 \end{pmatrix};$$

$$P = \begin{pmatrix} p_{-2,-2} & p_{-2,-1} & p_{-2,0} & p_{-2,1} \\ p_{-1,-2} & p_{-1,-1} & p_{-1,0} & p_{-1,1} \\ p_{0,-2} & p_{0,-1} & p_{0,0} & p_{0,1} \\ p_{1,-2} & p_{1,-1} & p_{1,0} & p_{1,1} \end{pmatrix}.$$

Заметим, что для целей симметрии в этом случае координаты дискретной сетки были сдвинуты на $1/2$ (начало координат находится в центре сетки размера 4×4 пиксела), что дает возможность более корректно учитывать влияние соседних пикселей.

Анализ данных вычислительных экспериментов позволяет сделать следующие выводы. Прежде всего, при слишком маленьких значениях масштаба эталона (например, $0,5$ — уменьшение в 2 раза) получаются слишком большие значения минимальных коэффициентов корреляции. Объясняется это тем, что уменьшение масштаба соответствует уменьшению пространственного разрешения, что согласно свойствам преобразования Фурье приводит к уменьшению ширины спектра изображения эталона, т. е. высокочастотные составляющие эталона подавляются. Но алгоритм поиска эталонов, основанный на поиске областей с большой дисперсией, как раз предполагает наличие в изображении эталона высокочастотных элементов. С другой стороны, слишком большие значения масштаба, кроме существенных затрат времени вычислений, не приводят к каким-либо положительным результатам. Для масштабов эталона представляются оптимальными значения в диапазоне $0,9-1,1$. Результаты являются гораздо более устойчивыми к изменению значений угла поворота эталонов. Здесь диапазон значений определяется только допустимым временем вычислений.

В табл. 2 приведены данные, полученные с использованием геометрических преобразований эталонов со следующими параметрами:

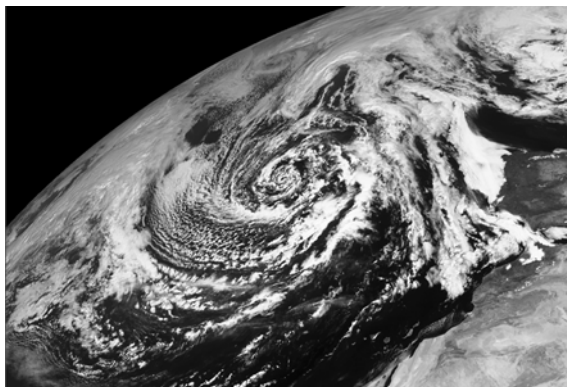
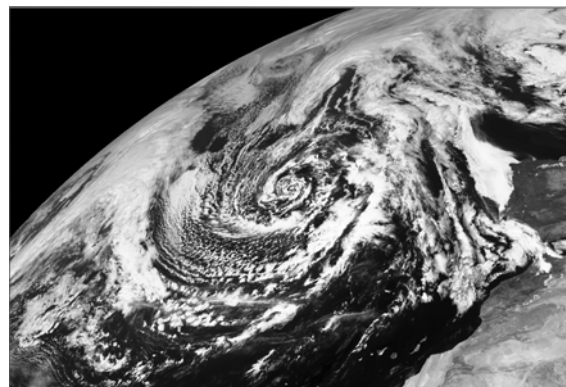
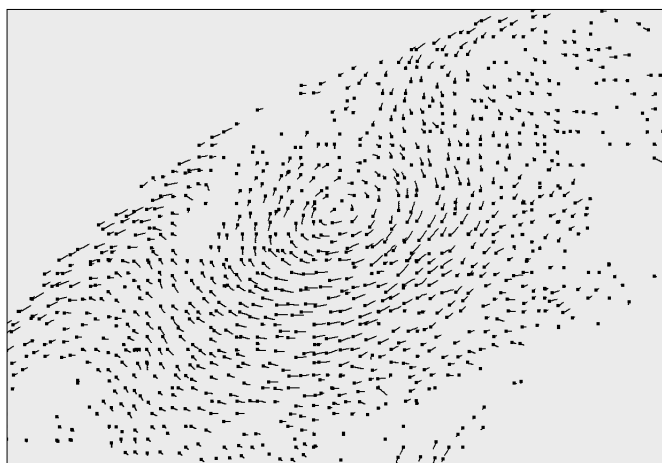
$$\text{Scale_Min} = 0,9, \quad \text{Scale_Max} = 1,1, \quad \text{Scale_Delta} = 0,1,$$

$$\text{Angle_Min} = -45, \quad \text{Angle_Max} = 45, \quad \text{Angle_Delta} = 3$$

и различными типами интерполяций: 0 — тождественное преобразование, 1 — округление до ближайшего целого, 2 — билинейная, 3 — биквадратная и 4 — бикубическая.

Таблица 2

Interpol	Npos	Min_Corr	Max_Corr	Time, s	Thres_Corr			
					0,5	0,7	0,8	0,9
0	3479	0,353	0,998	3	3351	1939	1675	1139
1	3507	0,450	0,999	301	3438	2045	1790	1210
2	3515	0,491	0,998	307	3467	2044	1828	1282
3	3524	0,490	0,998	309	3468	2037	1813	1263
4	3505	0,500	0,998	310	3453	2047	1816	1248

*Рис. 1**Рис. 2**Рис. 3*

Результаты с использованием билинейной интерполяции на первый взгляд лучше, чем, например, с бикубической интерполяцией. Вероятно, это объясняется известными недостатками билинейной интерполяции (появление в спектре преобразованного сигнала ложных высоких частот) [1]. С учетом небольшой разницы в затратах времени вычислений предпочтительнее бикубическая интерполяция.

Перемещения облачных образований в атмосфере иллюстрируют рис. 1–3. Показан процесс перемещения вихря. Векторное поле построено по пяти последовательным изображениям в оптическом диапазоне. На рис. 1 приведен первый кадр последовательности изображений, на рис. 2 — последний кадр. Соответствующее векторное поле представлено на рис. 3.

Заключение. Предложенные в данной работе методы преобразования эталонов, состоящие из масштабирования, поворота и переноса вместе с процедурами интерполяции пикселей эталонов, являются новыми для повышения достоверности результатов поиска позиций объектов при перемещении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jähne В.** Digital Image Processing. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 607 p.
2. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. /Под ред. П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

-
3. **Забелин В. А., Пяткин В. П.** Идентификация контрольных точек в аэрокосмических изображениях // Математические и технические проблемы обработки изображений. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1980. С. 50–59.
 4. **MSG** Meteorological Products Extraction Facility. Algorithm Specification Document. N EUM/MSG/SPE/022. EUMETSAT. 2004. Is. 2.6.
 5. **Фоли Дж., вэн Дэм А.** Основы интерактивной машинной графики: Пер. с англ. Т. 2. М.: Мир, 1985. 368 с.

Поступила в редакцию 4 мая 2009 г.
