

В. А. Бобков, А. В. Казанский, М. А. Морозов, А. А. Щебенкова

(Владивосток)

**РЕЛАКСАЦИОННО-КОНТУРНЫЙ АЛГОРИТМ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРОВ МОРСКИХ ТЕЧЕНИЙ
ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ
И ЕГО СИНОПТИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ***

Предложен гибридный алгоритм для определения векторов течений на морской поверхности по последовательности спутниковых изображений, который основан на контурном методе и методе релаксационной разметки. Оценки векторов течений, полученные с помощью релаксационно-контурного алгоритма, с использованием синоптической техники показывают его преимущество перед чисто контурным методом. Сравнение этих оценок с полученными вручную (операторным методом) и данными акустического доплеровского профилирования скоростей (Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP) дает хорошее согласие.

Введение. В работе [1] предложен контурный метод определения скоростей течений на морской поверхности по спутниковым ИК-изображениям. Предложенный метод прошел весьма ограниченную экспериментальную проверку, показавшую тем не менее перспективность предложенного подхода. Дальнейшие исследования показали, что контурный метод позволяет строить правильные векторы течений (ВТ) даже на слабых информативных контрастах (что обеспечивает ему преимущество перед широко известным и единственным автоматическим методом максимума перекрестной корреляции (МПК)), но при этом порождается большое количество ошибочных. В экспериментах была выявлена высокая чувствительность контурного метода к выбору целого ряда настроечных параметров. Если выбирать эти параметры таким образом, чтобы построить как можно больше правильных векторов, то наряду с ними будет получено очень много ошибочных (рис. 1, *a*, слабые ограничения). Ужесточение параметров алгоритма сокращает количество как ошибочных, так и правильных векторов (рис. 1, *b*, сильные ограничения). Тем самым появляется необходимость в применении дополнительной процедуры направленной отбраковки ошибочных векторов, позволяющей сохранить как можно больше правильных. Такая процедура должна

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 01-01-00365, № 01-07-90225).

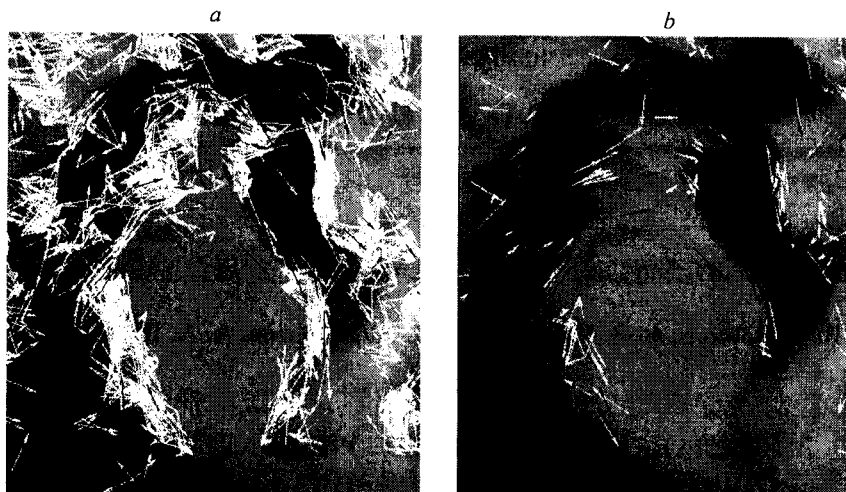


Рис. 1. Векторы течений, полученные для антициклона Японского моря операторным (черные) и контурным (белые) методами при слабых (а) и сильных (б) ограничениях

использовать некоторое характерное различие между правильными и ошибочными ВТ. В нашем случае направления и величины правильных векторов в соседних точках не могут быть сильно отличающимися, т. е. должны быть согласованными. Напротив, ошибочные векторы имеют, как правило, хаотичные величины и направления. Для отбраковки ошибочных векторов по этому признаку необходим учет более широкого контекста, включающего множество смежных векторов течений. В качестве аппарата согласования нами применяется релаксационная разметка [2] – метод понижения неопределенности для процессов, выходными данными которых является набор объектов с приписанными им вероятностными атрибутами.

Данная работа содержит результаты экспериментального исследования контурного алгоритма, описание процедуры релаксационной разметки и результатов верификации гибридного релаксационно-контурного алгоритма с выбором оптимальных настраиваемых параметров. Приводятся результаты сравнения его работы с операторным методом и данными контактных измерений (ADCP).

Контурный алгоритм и его настраиваемые параметры. Дается краткое описание контурного алгоритма, необходимое для понимания смысла его настраиваемых параметров (см. далее опции алгоритма). Основная идея контурного алгоритма состоит в выделении размытых контуров как изолиний (базовых изотерм) с не менее чем двумя смежными изолиниями (пучок изотерм) и последующем прослеживании перемещения локальных особенностей (маркеров) похожих участков контуров на двух изображениях. В контексте контурного алгоритма маркер определяется как точка максимальной кривизны на линии пучка изотерм. При этом используются все изотермы, имеющиеся на изображении и проходящие по всем границам между пикселями с отличающимися значениями. Базовая изотерма пучка интерполируется кубическим сплайном. Вычисляются все максимумы кривизны с фильтрацией точек максимума для выделения маркеров с атрибутами, пригодными для дальнейшего распознавания (значение кривизны, наличие контекста определенной длины и др.). Далее производится поиск маркеров на втором

изображении и построение векторов перемещений, соединяющих похожие по атрибутам маркеры. Векторы также фильтруются по признаку подобия контекстов маркеров на разных изображениях. Результатом применения алгоритма служит набор векторов, представляющих возможное перемещение маркера.

Опции контурного алгоритма, размерность (в скобках приведены значения, использованные в примере):

1. Шаг сетки. Используется как для визуализации сетки, так и для задания размеров площадки при релаксации (см. далее), пиксели (16).

2. Допустимое отклонение опорной полилинии. Используется для построения опорной полилинии на основе ступенчатой изолинии как максимальное допустимое отклонение от нее, пиксели (0,6).

3. Максимальный размер отрезка опорной полилинии. При ее построении отрезки не могут превышать эту величину во избежание нежелательных эффектов при построении сплайна, пиксели (4).

4. Максимальный допустимый разрыв. Используется для выделения участков изолиний, расположенных в местах контрастов. Регулирует непрерывность геометрического контекста, пиксели (5).

5. Величина перепада. Тангенс максимальной крутизны рельефа. Рассчитывается по квадратной площадке вокруг точки. Сторона квадрата равна $2n + 1$, где n – размер базиса для расчета перепада. Рассматриваются все квадраты с размером базиса от 1 до n . Берется максимальное значение тангенса (0,4).

6. Размер базиса для расчета перепада. Размер площадки для определения перепада, пиксели (2).

7. Длина геометрического контекста. Измеряется по обе стороны от маркера, пиксели (4).

8. Кривизна. Определяется в точке экстремума контура (0,2).

9. Максимальное перемещение. Максимальная дистанция поиска перемещения маркера, пиксели (20).

10. Максимальная разница уровней. Разница между изолиниями при поиске перемещения, отсчеты (1).

11. Минимальное подобие (геометрических контекстов маркеров). Вычисляется как $1/(1 + p)$, где p – среднее расстояние между приведенными полилиниями геометрического контекста, так что вторая полилиния сдвигается, чтобы ее центр (точка маркера) совпадал с центром первой полилинии (0,6).

Метод релаксационной разметки. Для того чтобы наилучшим образом использовать сильные стороны контурного метода, требуется проведение некоторого вида объективного анализа векторов для отбраковки ошибочных, в качестве которого выбрана релаксационная разметка, являющаяся методом понижения неопределенности для процессов, выходные данные которых есть набор объектов с приписанными им вероятностными атрибутами (или весовыми коэффициентами). Пусть имеется набор объектов, идентификация которых неоднозначна. Очень часто существует возможность использовать отношения между этими объектами для уменьшения или снятия неоднозначности. Релаксационная разметка применена в [3] к результатам работы метода максимума перекрестной корреляции (соответствующий гибридный метод был назван релаксационно-корреляционным) в задаче определения течений по спутниковым изображениям. Далее приводится схема с необходимыми для контурного алгоритма модификациями.

Выходными данными контурного метода является набор векторов, каждому из которых приписывается значение степени подобия геометрических контекстов маркеров, находящихся в начальной точке вектора на первом изображении и в конечной точке на втором. Метод релаксационной разметки применяется для фильтрации выходного набора векторов перемещения контурного метода. Метка – общий термин, используемый в технике релаксации. В нашем случае меткой является вектор, выходящий из точки (маркера). В связи с тем, что метод релаксационной разметки эффективен для набора векторов, выходящих из одной точки, в случае контурного алгоритма было принято решение разбить входное изображение регулярной сеткой на ячейки и формально сгруппировать векторы, начала которых входят в ячейку (при этом в процессе релаксационного отбора учитываются только истинные позиции векторов). Тогда каждой ячейке приписывается набор меток – кандидатов в векторы перемещения. Для каждой метки, принадлежащей выбранной ячейке, вычисляется значение согласования с метками смежных ячеек в соответствии с набором ограничений, выражающих физические аспекты решаемой проблемы.

Обозначим через I_{ij} j -вектор, выходящий из i -й точки, $1 \leq j \leq x$ (x – количество векторов, выходящих из i -й точки). Обозначим через p_{ij} вероятность, приписываемую вектору I_{ij} . Начальные значения p_{ij} выбираются равными степени подобия геометрических контекстов маркеров. Введем фиктивный вектор I_{i0} , означающий отказ от решения в этой ячейке. За вероятность, приписываемую фиктивному вектору, примем разность между единицей и максимальной вероятностью в наборе векторов i -й точки: $p_{i0} = 1 - \max(p_{ij})$, где $1 \leq j \leq x$, x – количество векторов, принадлежащих i -й ячейке. Индекс i_0 означает вектор, представляющий случай отказа от решения. Исходя из формулы, вероятность, равная 1, определяет, что решение найдено и такая ячейка в дальнейшем не обрабатывается. Проводим нормализацию исходного набора вероятностей i -й точки: $p_{ij}^0 = p_{ij} / \sum_r p_{ir}$, где $1 \leq j \leq x$, $1 \leq r \leq x$. Каждый

шаг итеративного процесса релаксации состоит из следующих действий:

- вычисление согласованности каждой метки с соседними (из данной и смежных ячеек);
- вычисление поддержки каждой метки, исходя из всех связанных с ним значений согласованности, каждое из которых зависит от текущей вероятности, приписанной меткам данной и соседних ячеек;
- обновление вероятности каждой метки в зависимости от ее поддержки.

Из самых общих соображений, которые обычно используются при эффективном анализе полей, следует, что направление и величина векторов перемещения выходящих соседних точек не могут быть сильно отличающимися. Обозначим j -й вектор, выходящий из j -й соседней точки I_{hj} . Согласованность пропорциональна функции различия векторов I_{ik} и I_{hj} :

$$\gamma(i, k; h, j) = \cos \Theta(i, k; h, j) \left(1 - \frac{||I_{ik}| - |I_{hj}||}{\max(|I_{ik}|, |I_{hj}|)} \right), \quad (1)$$

где $\Theta(i, k; h, j)$ – угол между векторами I_{ik} и I_{hj} ; $\max(|I_{ik}|, |I_{hj}|)$ – длина более длинного вектора, а второй множитель описывает относительное различие длин векторов.

Согласованность также зависит от расстояния d_{ih} между точками m_i и m_h . Эта часть согласованности может быть задана как

$$\beta(i, h) = \exp(-d_{ih}/d_0), \quad (2)$$

где d_{ih} – расстояние между i -й и h -й точками; d_0 – эмпирическая константа спада, характеризующая неоднородность потока. Далее, определим разбиение точек на соседние и несоседние так, что точка m_h будет называться соседней по отношению к точке m_i , если расстояние между ними меньше либо равно некоему расстоянию R , которое вполне приемлемо выбрать как $R = 2d_0$, исключая тем самым из рассмотрения точки со слишком малыми весами ($< e^{-2}$). Полный коэффициент согласования векторов определяется с использованием (1), (2) как

$$g(i, k; h, j) = \gamma(i, k; h, j)\beta(i, h). \quad (3)$$

На основе (3) вычисляется нормализованная поддержка вектора l_{ik} на n -й итерации:

$$S_{ik}^n = \frac{1}{C \left| \max_r (\tilde{S}_{ir}^n) \right|} \tilde{S}_{ik}^n = \frac{1}{C \left| \max_r (\tilde{S}_{ir}^n) \right|} \sum_{h \neq i} \sum_j g(i, k; h, j) p_{hj}^n. \quad (4)$$

Здесь $\left| \max_r (\tilde{S}_{ir}^n) \right|$ – максимальное значение поддержки, найденное в наборе векторов i -й ячейки, а $C > 1$ – константа, определяющая скорость сходимости процесса.

Последний шаг состоит в изменении значения вероятности каждого вектора i -й ячейки с учетом (4):

$$p_{ik}^{n+1} = \frac{p_{ik}^n (1 + S_{ik}^n)}{\sum_r p_{ir}^n (1 + S_{ir}^n)}. \quad (5)$$

Поскольку $S_{i0}^n = 0$, p_{i0} изменяется только при выполнении этой последней процедуры нормализации. Если константа релаксации C велика, величина $|S_{ik}^n|$ мала и процесс сходится медленнее. С другой стороны, если C близко к 1 и S_{ik}^n приближается к -1 , некоторые p_{ik}^n быстро обновляются. Кратко итерационный процесс можно описать так: если метка имеет относительно большую поддержку соседних меток, вероятность ее выбора в качестве вектора перемещений увеличивается, в противном случае вероятность уменьшается. После определенного числа шагов релаксационного процесса за вектор перемещения ячейки принимается метка с максимальной вероятностью. Если максимальная вероятность меньше либо равна вероятности отказа от решения (приписанной фиктивному вектору), перемещение в данной ячейке не может быть вычислено и соответствующий вектор не может быть построен.



Рис. 2. Векторы течений (белые), как на рис. 1, но получены РК-алгоритмом

Гибридный алгоритм, в котором к набору векторов, построенному контурным или корреляционным алгоритмом, применяется релаксационная разметка, назовем релаксационно-контурным или релаксационно-корреляционным алгоритмом соответственно.

Сравнение результатов с помощью синоптической техники. Для получения и сравнения результатов использовались: а) пара изображений,

полученных с метеорологического спутника Земли NOAA/AVHRR в канале 11 мкм за 11–12 апреля 1993 г. по юго-западной части Японского моря (см. рис. 1, *a, b* и рис. 2); б) соответствующие данные ADCP, собранные 3–4 апреля (рис. 3, *b*). Векторы течений, полученные контурным методом со слабыми ограничениями (см. опции вышеописанного алгоритма и табл. 1), содержат подавляющее большинство ВТ, образованных операторным методом (см. рис. 1, *a*). Однако в процессе релаксации часто отбираются другие ВТ. Это делает необходимым специальную процедуру сравнения результатов, полученных разными методами. Далее изложены результаты сравнения работы релаксационно-контурного алгоритма с данными, полученными операторным методом и контактными измерениями течений [4]. Для сравнения привлекается синоптическая техника, основной принцип которой состоит в пересчете ВТ в параметры синоптических объектов (вихрей, струй течений и стримеров). Полученная модельная функция тока может использоваться для

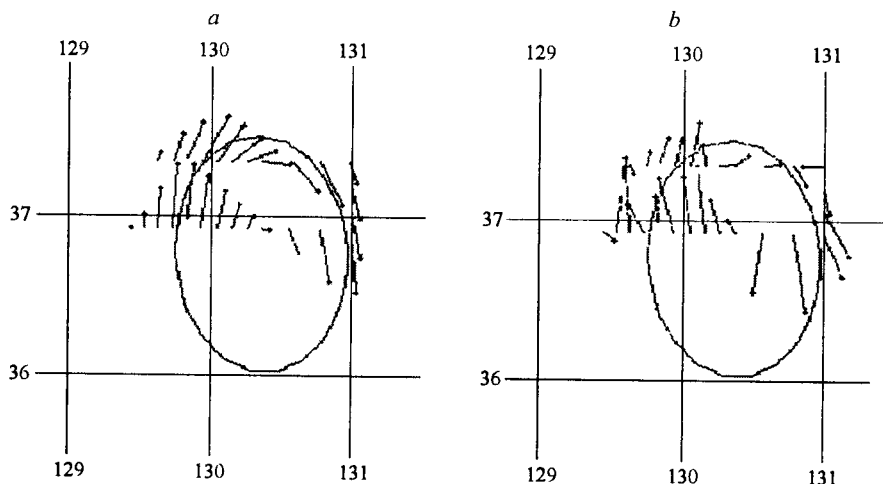


Рис. 3. Результаты сравнения модельных векторов течений, полученных операторным методом на профилях ADCP (*a*), с данными ADCP (*b*)

П а р а м е т р ы р е л а к с а ц и и

Константа сходимости C	Константа спада d_0	Максимальное расстояние R	Количество итераций
1,5	25	50	15

восполнения отсутствующих измерений, а ее параметры сравниваться непосредственно вместо локальных измерений скоростей течений.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что все струйные течения обладают свойством когерентности в том смысле, что их поле скоростей можно представить переносом векторов течений с соответствующим масштабированием по линиям тока с помощью описанной далее синоптической техники. Исследованные нами с помощью этой техники несколько случаев поперечных профилей скоростей течений показали, что они имеют простую треугольную форму. На этом основании для аппроксимации поля течений можно предложить модельную функцию тока следующего вида (обеспечивающую треугольную форму профилей скорости после дифференцирования):

$$h = D\eta(r), \quad (6)$$

где $\eta(r) = 1 - ar^2$ для $0 < r \leq R$; $\eta(r) = b(R + P - r)^2$ для $R < r < R + P$; $\eta(r) = 0$ для $r \geq R + P$ с очевидными зависимостями

$$a = 1/[R(R + P)], \quad b = 1/[P(R + P)].$$

Здесь D – полная динамическая высота; r – радиальное расстояние; R и P – ширина потока по обеим сторонам от линии максимума скорости V_{\max} . В случае эллиптического вихря r (а также R и P) масштабируется по формуле

$$r = \{ \varepsilon [(x - x_0)\cos\alpha + (y - y_0)\sin\alpha]^2 + \\ + [-(x - x_0)\sin\alpha + (y - y_0)\cos\alpha]^2 \}^{1/2}, \quad (7)$$

где x_0 и y_0 – координаты центра вихря; ε – его эксцентриситет; α – угол наклона большой полуоси к меридиану. При этом течение направлено вдоль изолиний функции тока $h(r)$ (динамическая топография), а его скорость $V(r)$ [$V_{\max} = V(R) = 2(g/f)D/(R + P)$] вычисляется по геострофическому закону:

$$V(r) = -(g/f)\partial h(r)/\partial n, \quad (8)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $f = 1,47 \cdot 10^{-4} \sin\varphi$ [с^{-1}] – угловая скорость вращения Земли (приведенная к широте φ для учета ускорения Кориолиса); динамическая высота $h(r)$ определена в (6) с учетом масштабирования (7); n – нормаль к линии тока [м]. Таким образом, $\partial h(r)/\partial n$ – безразмерная величина, а размерность скорости дает коэффициент g/f . Заметим, что представление функции тока через динамические высоты имеет

Параметры модельной функции тока, оцененные по данным операторного метода

Координаты центра		Эксцентриситет \sqrt{e}	α , град	R , км	P , км	Динамическая высота D , см
x_0	y_0					
36,77° N	130,38° E	0,67	2	54	26	18,3

Примечание. Значения R и P приводятся по большой полуоси эллипса.

дополнительное преимущество – возможность прямого усвоения измерений спутниковых альтиметров.

В этой работе параметры модельного поля течений вихря оценивались по данным, определенным операторным методом (табл. 2), которые, в свою очередь, были верифицированы по данным ADCP (см. рис. 3, *a, b*). По главному сравниваемому параметру – максимальной скорости течения V_{\max} – достигнуто хорошее соответствие (в пределах инструментальной точности измерений): 45 см/с для ВТ, построенных операторным методом, против 50 см/с для данных ADCP. Далее, ВТ, полученные РК-методом, сравнивались с ВТ, построенными операторным методом на этой же модельной функции (погрешность аппроксимации). Максимальная скорость течения для РК-метода оказалась такой же, как и у операторного метода (примерно 45 см/с).

Среднеквадратичное отклонение скоростей (Δ), построенных релаксационно-контурным методом, при сравнении с усвоенными в модели данными ADCP равно 16 см/с. Это вполне сопоставимо с $\Delta = 17,3$ см/с для ВТ, полученных операторным методом (погрешность аппроксимации). Отметим, что Δ между ВТ, полученными операторным методом, и данными ADCP составляет 16,7 см/с.

Заключение. Результаты, полученные с помощью релаксационно-контурного алгоритма, показывают его преимущество перед чисто контурными оценками векторов течений (сравнить рис. 1, *b* и рис. 2). Другой вывод состоит в том, что РК-алгоритм не уступает по точности операторному методу. Однако потенциал контурного метода он раскрывает не до конца, потому что сам по себе метод релаксационной разметки имеет ряд существенных недостатков. В частности, из рис. 2 видно, что даже после его работы остается некоторое количество ошибочных ВТ. Следует, конечно, учитывать, что от ошибок (как правило, негрубых) не застрахован даже опытный оператор. Оператор, например, никогда не будет строить векторы, направленные против движения. Это происходит потому, что в расчет принимаются синоптическая схема течений, видимая на изображении, и законы геострофики. Алгоритм лишен такого знания, поэтому заключительное редактирование результатов человеком обязательно для всех автоматических методов.

Необходимо отметить и другие недостатки применения метода релаксационной разметки в алгоритмах определения скорости течений по спутниковым изображениям. В ситуациях со сдвиговыми течениями даже очень близкие (в поперечном направлении) ВТ могут сильно отличаться по величине, а в ситуациях с резким изменением направления течений – по направлению. Возможно также сочетание обеих ситуаций (вихри, меандры течений). Все это может приводить к отсеиванию правильных ВТ. Кроме того, в нашем

примере заметно отсутствие ВТ (в местах, где имеются операторные ВТ) даже при «слабых» ограничениях на параметры РК-алгоритма (см. рис. 1). Эти векторы появляются при еще большем ослаблении ограничений (главным образом уменьшении длины геометрического контекста), но тогда метод релаксационной разметки уже не справляется с фильтрацией ошибок – он отсеивает слишком много правильных ВТ, оставляя ошибочные.

Перспективным способом устранения отмеченных недостатков обоих видов (избыточная фильтрация правильных и недостаточная – ошибочных ВТ) представляется согласование ВТ, получаемых контурным методом при самых слабых ограничениях на параметры, по модельной функции тока (внося тем самым синоптическое знание в работу контурного алгоритма). Роль РК-алгоритма состоит при этом в получении первичного модельного поля течений. Разработка такого составного синоптико-релаксационного контурного алгоритма должна составить предмет дальнейшей работы по совершенствованию контурного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобков В. А., Казанский А. В., Морозов М. А.** Выделение размытых контуров на примере определения скорости течений по спутниковым изображениям // Автометрия. 2001. № 2. С. 3.
2. **Rosenfeld A., Hummel R. A., Zucker S. W.** Scene labeling by relaxation operations // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1976. SMC-6, N 6. P. 420.
3. **Wu Q. X.** Computing velocity fields from sequential satellite images // Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment (Ch. 2.4) /Eds. I. S. F. Jones, Y. Sugimory, R. W. Stewart. Tokio: Seibtsu Kenkyusha, 1993. P. 40.
4. **Ro J. R., Alexanin A., Kazansky A.** Synoptic approach to estimation of sea surface current fields from sequential satellite images: Improved technique and validation study // Journ. Korean Soc. Remote Sensing. 1997. 3, N 3. P. 203.

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru*

*Поступила в редакцию
24 апреля 2002 г.*