

Е.В. Зубков, Ю.К. Любимов, С.И. Шамаев

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ АНОМАЛИЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ ПО СИГНАЛАМ ЛАЗЕРНОГО АЭРОЗОНДИРОВАНИЯ

Получены характеристики эффективности распознавания возмущений реальной морской среды с помощью лазерного аэрозондирования. Значения признаков возмущений в градиентном и спектральном представлениях импульсов обратного рассеяния исчисляются с помощью логических процедур. Рассматривается алгоритм распознавания образов, использующих метод потенциальных функций (ядерных оценок) с контролем адекватности представления класса. Приводятся результаты распознавания возмущений в реальной морской среде с помощью предложенного алгоритма.

Введение

Разнообразие гидрофизических процессов, развивающихся в морской среде, широкий диапазон их пространственных и временных масштабов чрезвычайно осложняют задачу классификации процессов при проведении дистанционных наблюдений.

Необходимость обнаружения и классификации гидрофизических процессов связана с проблемой мониторинга Мирового океана в целях решения различных задач научного и прикладного характера.

Развитие в морской среде гидрофизического процесса сопровождается возникновением области возмущений, проявляющихся в изменчивости гидрофизических характеристик. Признаки возмущений не имеют каких-либо универсальных форм и меняются в зависимости от множества факторов.

Информацию о характеристиках возмущений содержат сигналы обратного рассеяния при зондировании морской среды лазерными [1], либо морской поверхности радиолокационными [2] и оптическими (при подсветке поверхности) средствами [3]. Поскольку изменчивость характеристик волнения морской поверхности вторична по отношению к процессам, развивающимся в морской толще, то, используя сигналы лазерного зондирования в диапазоне «окна прозрачности», несущие информацию о состоянии области предполагаемого развития гидрофизического процесса, непосредственно не подверженной влиянию атмосферы, можно рассчитывать на более высокие характеристики распознавания.

Слой повышенной концентрации рассеивателей в области сезонного термоклина, обладающий тонкой структурой, как показала практика исследований, выступает в качестве индикатора возмущений. При этом изменяется как положение рассеивающего слоя по глубине, так и его структура, что отражается на огибающей импульсов обратного Ми-рассеяния на несмещенной частоте лазерного зондирующего излучения.

В данной работе обнаружение искомого класса возмущений связано с распознаванием образа в виде многомерного вектора в пространстве формализованных признаков. Предложенный алгоритм основывается на положениях теории распознавания образов (см., например, [4]). Значения признаков исчисляются на основании логических процедур, оперирующих с характеристиками импульсов обратного рассеяния (ИОР). При этом используются градиентное и спектральное представления ИОР [5, 6].

Насколько известно авторам, на момент выполнения данной работы (1988–1989 гг.) задача распознавания образа гидродинамического процесса с использованием градиентных и спектральных характеристик сигналов лазерного аэрозондирования ранее не рассматривалась.

I. МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ

1. Основная схема

Пусть $A = \{x_i\}$, $i = 1, \dots, N$ – эталонное (обучающее) множество признаковых векторов, принадлежащих известному классу, например «фоновому» («фоновое», т.е. невозмущенное состояние среды). По этой информации восстанавливается образ данного класса, который за-

тем используется для построения решающего правила. При этом предусмотрен контроль адекватности восстановления.

Принцип представления (восстановления) класса $K(A)$ по заданному выборочному множеству $A = \{\mathbf{x}_i\}$ в пространстве признаков методом потенциальных функций (ядерных оценок) состоит в том, что функция плотности концентрации $f_k = (\mathbf{x})$ точек в R^n (n – мерное евклидово пространство) аппроксимируется выражением

$$\hat{f}_k(\mathbf{x}) = C \sum_{i=1}^N \frac{1}{h_i^n} \varphi\left(\frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}}{h_i}\right), \quad (1)$$

где C – нормирующая константа, например $C = 1/N$; $\varphi(\mathbf{x})$ – ядерная функция окна сглаживания, например

$$\varphi(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{1}{2} \|\mathbf{x}\|^2\right), \quad (2)$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма в пространстве R^n ; $\{h_i\}$ – подходящая система параметров окон сглаживания.

Функция $\hat{f}_k(\mathbf{x})$ (образ класса $OK(A)$) принимается за меру близости точки \mathbf{x} к классу $K(A)$ и используется для классификации любого заданного вектора признаков \mathbf{x} .

2. Декорреляция и сферирование

Использовать круглое окно сглаживания (2) целесообразно лишь после применения преобразования декорреляции и нормирования к обучающему множеству A . Для этого все векторы – как множества A , так и множества K , подлежащего распознаванию, подвергаются ортогональному преобразованию декорреляции и сферирования. Запишем это в виде оператора преобразования

$$\mathbf{x} := D^{-1/2} \Pi^T \mathbf{x}, \quad (3)$$

чтобы не вводить новых обозначений для координат \mathbf{x} .

Здесь матрица декорреляции Π такова, что

$$\Pi^T C_A \Pi = D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Столбцы матрицы Π являются ортогональными собственными векторами ковариационной матрицы C_A множества A , рассматриваемого как случайная векторная выборка с собственными значениями у матрицы C_A $\lambda_1, \dots, \lambda_n$.

Преобразование сферирования осуществляется матрицей

$$D^{-1/2} = \begin{pmatrix} \lambda_1^{-1/2} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \lambda_n^{-1/2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

После преобразования (3) ковариационная матрица множества $A = \{\mathbf{x}_i\}$ становится единичной (а его гиперэллипсоид инерции – гиперсферой).

3. Оптимальная система окон

При построении меры близости (1) был применен следующий алгоритм выбора оптимальной системы параметров окон h_i . Для каждой точки $\mathbf{x}_i \in A$ можно определить некоторую величину h , с которой максимизируется мера близости вида (1) точки \mathbf{x}_i к множеству $A - O\mathbf{x}_i$ с параметром h , не зависящим от индекса суммирования, где $O\mathbf{x}_i$ – некоторая малая окрестность точки \mathbf{x}_i , содержащая, быть может, только одну точку множества A , а именно \mathbf{x}_i . Эта величина h вычисляется как решение уравнения

$$\frac{d}{dh} p(\mathbf{x}_i, A - O\mathbf{x}_i, h) = 0, \quad (6)$$

где $p(\cdot)$ – мера близости с постоянным параметром h :

$$p(\mathbf{x}_i, A - O\mathbf{x}_i, h) = \frac{C}{h^n} \sum_{\mathbf{x}_j \in O\mathbf{x}_i} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2h^2}\right). \quad (7)$$

Здесь $p(\mathbf{x}_i, A - O\mathbf{x}_i, h) \rightarrow 0$ как при $h \rightarrow 0$, так и при $h \rightarrow \infty$, значит эта функция обладает максимальным значением на полуоси $(0, \infty)$. После упрощений уравнение (6) приводится к виду

$$h^2 = f(h^2) \equiv \frac{\sum_{\mathbf{x}_j \in O\mathbf{x}_i} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2 \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2h^2}\right)}{n \sum_{\mathbf{x}_j \in O\mathbf{x}_i} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2h^2}\right)}. \quad (8)$$

Итерационный процесс

$$h_{k+1}^2 = f(h_k^2), \quad (9)$$

как правило, быстро сходится к некоторому значению h_i^* , реализующему $\max_h p(\mathbf{x}_i, A - O\mathbf{x}_i, h)$. В качестве начального приближения h_0 можно взять расстояние от \mathbf{x}_i до ближайшей к ней другой точки множества A .

Очевидно, что максимизация суммы (7) достигается, в основном, за счет тех ее слагаемых, которые соответствуют точкам \mathbf{x}_j , ближайшим к \mathbf{x}_i (исключая «слишком близкие»), т.е. h_i^* есть локально-оптимальный параметр окна для окрестности точки \mathbf{x}_i . Это и служит основанием для принятия и экспериментального исследования следующей меры близости с оптимальной в указанном смысле системой окон:

$$p_{opt}(\mathbf{x}_0, A) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{(h_i^* \sqrt{2\pi})^n} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i\|^2}{2h_i^{*2}}\right). \quad (10)$$

Ориентировочная оценка радиуса ρ_δ окрестности $O\mathbf{x}_i$, основанная на приближенном значении плотности точек в нормальной совокупности, может быть записана в виде

$$\rho_\delta = \frac{1,2 \sigma \sqrt{n}}{\sqrt[n]{N}} \cong \frac{1,2 r_{cp}}{\sqrt[n]{N}}, \quad (11)$$

где $r_{cp} \cong \sqrt{M(\|\mathbf{x}\|^2)} = \sigma \sqrt{n}$ – средний радиус рассматриваемой нормальной выборки из N точек множества $A \in R^n$.

4. Определение границы класса

С целью получения трехзначного ответа в решающих правилах распознавания произвольной признаковой точки необходимо определить границу или граничную полосу («Δ-границу»)

класса $K(A)$. Границей $\Gamma(A)$ класса $K(A)$ назовем множество

$$\Gamma(A) = \left\{ \mathbf{x} \in R^n, p_{opt}(\mathbf{x}, A) = \alpha \max_i p_{opt}(\mathbf{x}_i, A) \right\}, \quad (12)$$

где $0 < \alpha < 1$.

Величина α является свободным параметром алгоритма. Опыт показал, что в большинстве случаев его приходится выбирать не из математических соображений, а из априорных сведений о возможной частоте аномальных образований, о цене риска пропуска аномалий и т.д.

5. Адекватность представления класса

Система окон должна обеспечивать адекватность аппроксимации класса $K(A)$ функцией $p(\mathbf{x}, A, \{h_i\})$. Цель обеспечения адекватности – избежать двух типов неадекватности представления класса:

а) отождествления класса $K(A)$ с самим множеством A при слишком малых окнах (когда любые два множества становятся «абсолютно разделимыми»);

б) расплывания класса при слишком больших окнах, когда все образы классов становятся неразделимыми.

Существует несколько способов оценки адекватности. Почти все они содержат элементы субъективного выбора, и поэтому необходима совокупность независимых способов для объективизации выбора.

1) Оценка адекватности методом случайного возмущения множества. Для данной системы окон $H = \{h_1, \dots, h_N\}$ определяется величина (мера неадекватности 1-го типа):

$$\varepsilon(H) = \frac{\sum_{i=1}^N |p(\mathbf{x}_i, A, H) - p(\mathbf{x}_i, \tilde{A}, H)|}{\sum_{i=1}^N p(\mathbf{x}_i, A, H)} \quad (13)$$

или

$$\nu(H) = \frac{\sum_{i=1}^N |L(\mathbf{x}_i, A, H) - L(\mathbf{x}_i, \tilde{A}, H)|}{\sum_{i=1}^N |L(\mathbf{x}_i, A, H)|}, \quad (14)$$

где

$$L(\mathbf{x}_i, A, H) = \ln p(\mathbf{x}_i, A, H); \quad (15)$$

A – «возмущенное» множество A , в котором координата x_i^k точки \mathbf{x}_i заменяется на $\tilde{x}_i^k = x_i^k + \varepsilon_i^k$, где ε_i^k – случайная величина, распределенная по нормальному закону с параметрами $M(\varepsilon_i^k) = 0$ и

$$\sigma(\varepsilon_i^k) = \rho_\delta \frac{l_k}{\left(\sum_{j=1}^N l_j^2 \right)^{1/2}}, \quad (16)$$

где $l_k = \max_i x_i^k - \min_i x_i^k$.

Рассмотрим меру $\nu(H)$ как функцию от некоторого коэффициента α :

$$\nu(\alpha) = \nu(\alpha h_1^*, \dots, \alpha h_N^*), \quad (17)$$

где $\alpha > 0$, а $\{h_i^*\}$ – набор оптимальных окон.

Аппроксимацию $p(\mathbf{x}_i, A, H)$ класса $K(A)$ можно считать адекватной, если она построена по набору окон $H = \{h_1^0, \dots, h_N^0\}$, удовлетворяющему условию: $h_i^0 = \alpha_{\min} h_i^*$, $i = 1, \dots, N$, где α_{\min} – минимальное значение α , при котором выполняется условие $v(\alpha) < \varepsilon_{\Pi}$, ε_{Π} – некоторый порог неадекватности, например $\varepsilon_{\Pi} = 0,1$.

2) Критерий сходимости меры близости при увеличении количества точек множества A .

Если рассматривать процесс увеличения объема множества, то для последовательности множеств $A_1 \subset A_2 \subset \dots \subset A_l \subset \dots$ должна иметь место сходимость любой последовательности значений меры близости

$$p(\mathbf{x}_i, A_1, H), p(\mathbf{x}_i, A_2, H), \dots, p(\mathbf{x}_i, A_l, H), \dots,$$

для любой точки $\mathbf{x}_i \in A_k$, $k = 1, 2, \dots$, если система окон H свободна от неадекватности 1-го типа. Сходимость должна иметь место при любом случайном выборе начального множества A и случайном присоединении к нему новых точек.

Этот метод требует исследования для выработки алгоритма принятия решения о наличии или отсутствии сходимости и для нахождения показателей неадекватности 2-го типа.

3) Визуальная операторская оценка адекватности (качества восстановления класса по выборочному множеству) с помощью построения графиков одномерных или двумерных сечений функции $p(\mathbf{x}, A, H)$.

В данной задаче использовались элементы всех этих способов оценки адекватности представления фонового класса.

II. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ СОВОКУПНОСТЬ ПРИЗНАКОВ

Алгоритмы вычисления значений признаков

Использовался n -мерный ($n = 12$) вектор признаков, сформированный на основе градиентного и спектрального представлений сигнала обратного рассеяния. Система признаков учитывает динамику процесса, адаптируясь к его априорно неизвестной фазе. Ниже приводятся алгоритмы исчисления их значений на основе логических процедур (табл. 1, 2), где использованы следующие обозначения: n – порядковый номер составляющей вектора признаков; ∇U – градиент амплитуды сигнала по глубине, нормированный по начальной амплитуде импульса обратного рассеяния (ИОР):

$$\nabla U(k) = [U(k+1) - U(k)]/U(1), \quad (18)$$

$k = I, II, III, IV, V$ – номер фиксированного горизонта глубин (временного канала $k = I, \dots, \kappa$) при дискретизации ИОР по шкале времени; t_i – время, отсчитываемое от начала i -го галса, выполняемого авиалидаром при полете по схеме пространственно совпадающих галсов; $i = 1, \dots, (I-2)$, где I – общее число пространственно совпадающих галсов; $\bar{\eta}_s$ – нормированная по полной энергии ИОР величина спектральной энергии в s -м частотном интервале

$$\bar{\eta}(s) = W(s)/W_0, \quad (19)$$

где $W(s)$ – энергия импульса в s -м частотном интервале ($s = 1, \dots, S$); $\Delta F_s = \Delta F/S = N\Delta f$ (рабочая полоса частот: $\Delta F = S\Delta F_s = SN\Delta f = L\Delta f$); Δf – интервал дискретизации спектра;

$$W(s) = \sum_{n=1}^N P_s(n) \Delta f, \quad (20)$$

где $P_s(n)$ – значения спектральной плотности мощности в интервале частот $F_s - F_{s-1}$.

Полная энергия импульса

$$W_m = \sum_{l=1}^L P(l) \Delta f. \quad (21)$$

$f(B)$ – значение истинности булевского выражения B (см. ниже); $f(B) = 1$ при $B = \text{true}$; $f(B) = 0$ при $B = \text{false}$.

Таблица 1

Номер признака (n)	Алгоритм исчисления значения признака Π_n	
	Градиентные признаки	
1 ÷ 4	$\Pi_n = \sum_{i=1}^{l-2} \left[f\left(\nabla \bar{U}_k(t_i) > \nabla \bar{U}_k(t_{i+1}) \wedge \nabla \bar{U}_k(t_{i+1}) < \nabla \bar{U}_k(t_{i+2})\right) + f\left(\nabla \bar{U}_k(t_i) \leq \nabla \bar{U}_k(t_{i+1}) \wedge \nabla \bar{U}_k(t_{i+1}) \geq \nabla \bar{U}_k(t_{i+2})\right) \right].$	
5	$\Pi_5 = \sum_{i=1}^{l-2} \left[f\left(\nabla \bar{U}_{III}(t_i) > \nabla \bar{U}_{IV}(t_i) \wedge \nabla \bar{U}_{III}(t_{i+1}) < \nabla \bar{U}_{IV}(t_{i+1})\right) + f\left(\nabla \bar{U}_{III}(t_{i+1}) \leq \nabla \bar{U}_{IV}(t_{i+1}) \wedge \nabla \bar{U}_{III}(t_{i+2}) \geq \nabla \bar{U}_{IV}(t_{i+2})\right) \right].$	

Таблица 2

Номер признака $n = s + 4$	Алгоритм исчисления значения признака Π_n	
	Спектральные признаки	
6 ÷ 11	$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } \bar{\eta}_s(t_1) < \bar{\eta}_s(t_2): \\ \Pi_n = f\left[\bar{\eta}_s(t_1) < \bar{\eta}_s(t_2)\right] + f\left[\bar{\eta}_s(t_2) > \bar{\eta}_s(t_3)\right] + f\left[\bar{\eta}_s(t_3) < \bar{\eta}_s(t_4)\right] + f\left[\bar{\eta}_s(t_4) > \bar{\eta}_s(t_5)\right]. \\ \text{При } \bar{\eta}_s(t_1) \geq \bar{\eta}_s(t_2): \\ \Pi_n = f\left[\bar{\eta}_s(t_1) \geq \bar{\eta}_s(t_2)\right] + f\left[\bar{\eta}_s(t_2) \leq \bar{\eta}_s(t_3)\right] + f\left[\bar{\eta}_s(t_3) \geq \bar{\eta}_s(t_4)\right] + f\left[\bar{\eta}_s(t_4) \leq \bar{\eta}_s(t_5)\right]. \end{array} \right.$	
12	$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } \bar{\eta}_1(t_1) > \bar{\eta}_1(t_2): \\ \Pi_{12} = f\left[\bar{\eta}_1(t_1) > \bar{\eta}_1(t_2)\right] + f\left[\bar{\eta}_1(t_2) < \bar{\eta}_1(t_3)\right] + f\left[\bar{\eta}_1(t_3) > \bar{\eta}_1(t_4)\right] + f\left[\bar{\eta}_1(t_4) < \bar{\eta}_1(t_5)\right]. \\ \text{При } \bar{\eta}_1(t_1) \leq \bar{\eta}_1(t_2): \\ \Pi_{12} = f\left[\bar{\eta}_1(t_1) \leq \bar{\eta}_1(t_2)\right] + f\left[\bar{\eta}_1(t_2) \geq \bar{\eta}_1(t_3)\right] + f\left[\bar{\eta}_1(t_3) \leq \bar{\eta}_1(t_4)\right] + f\left[\bar{\eta}_1(t_4) \geq \bar{\eta}_1(t_5)\right]. \end{array} \right.$	

Для градиентных признаков 1 ÷ 4 (см. табл. 1) порядковый номер $n = k - 1$ ($k > 0$). Значения ∇U и $\bar{\eta}$ – результат усреднения по выборке зондирующих импульсов. Значения признаков исчисляются для каждой тройки последовательных галсов. Максимальное значение признака в нашем случае равно трем. Признаки 1 ÷ 4 исчисляются для каждой пары соседних горизонтов глубин. Порядковый номер спектрального признака $n = s + 4$ ($s = 2 \div 7$). Максимальное значение спектрального признака равно четырем.

III. ФОРМИРОВАНИЕ «ФОНОВОЙ» И «СИГНАЛЬНОЙ» ВЫБОРОК

Формирование «сигнальной» и «фоновой» выборок осуществлялось в различных районах акватории, существенно различающихся по своим гидрологическим характеристикам. «Сигнальная» выборка формировалась при полетах авиалидара в режиме пространственно совпадающих галсов. «Фоновая» – при выполнении сетки галсов.

Поскольку случайные процессы, описывающие поведение гидрофизических характеристик (ГФХ), неэргодичны и корреляция ГФХ в вертикальном столбе существенно выше, чем в плоскости [7], то такой метод формирования «фоновой» выборки означал заведомое усложнение условий распознавания.

Полный массив подготовленных данных содержал 60 «точек» «сигнальной» (N_c) и 2800 «точек» «фоновой» выборок (N_ϕ). Под «точкой» подразумевается определенный пространственный интервал усреднения сигнала.

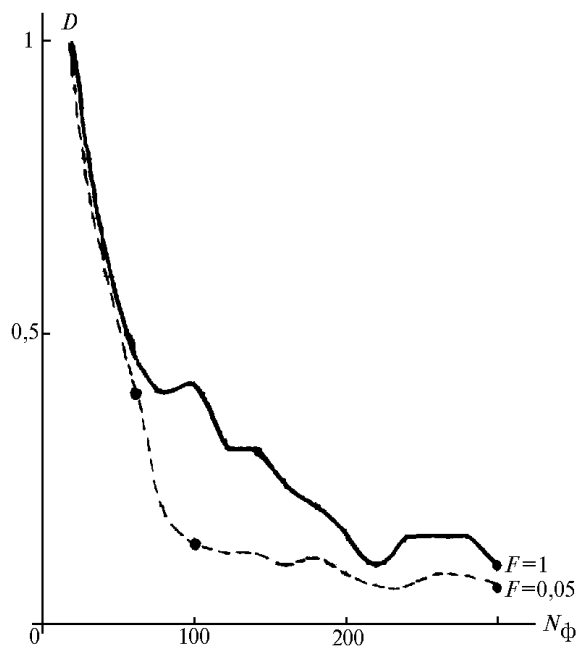
IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Просчитывалось несколько вариантов задачи распознавания. В зависимости от выбранного варианта в качестве обучающей использовались как «сигнальная», так и «фоновая» выборки. На печать выводились индикаторные массивы, где каждый вектор признаков (точка пространства R^n) классифицировался либо как не принадлежащий обучающему множеству

(«аномалия») – тогда значение индикатора равно «1», либо как принадлежащий ему – значение индикатора равно «3». Маргинальным точкам, лежащим на границе обучающего множества, приписывалось значение индикатора, равное «2». При распознавании на уровне ложных тревог $F = 0,1$ точки «1» и «2» отнесены к «аномальному» множеству. При уровне ложных тревог $F = 0,05$ маргинальные точки не включаются в область «аномалии».

Результаты распознавания «сигнальной» выборки при обучающей «фоновой» показали высокие значения частоты правильной классификации (в пределе – вероятности правильного обнаружения). В ряде случаев эти значения резко колеблются при обновлении «фоновой» выборки. Первое обстоятельство свидетельствует об эффективности выбранной системы признаков. Второе означает, что вполне вероятны, как и следовало ожидать, «фоновые» ситуации, схожие с «сигнальными» в условиях сильной мелкомасштабной изменчивости морской среды в горизонтальной плоскости.

Следует также отметить, что выбранное признаковое множество приводит к устойчивым результатам распознавания, если выполняются условия стационарности случайных процессов, описывающих поведение характеристик морской среды. Однако одна и та же «точка» может быть подвержена одновременному воздействию нескольких разномасштабных гидрофизических процессов. Поэтому наилучший объем выборки соответствует участку, на котором справедливо квазистационарное приближение. Очевидно, что он может меняться в зависимости от типа акватории и конкретных гидро- и метеоусловий. С точки зрения пространственного масштаба выборка из 20 значений признаков векторов вполне приемлема, однако недостаточна для формирования четкой границы множества в многомерном признаковом пространстве. Однако увеличение объема обучающей (в данном случае «фоновой») выборки и удаление от границ области квазистационарного приближения приводит к «расплыванию» границ обучающего множества, куда попадает все большее количество точек «сигнальной» выборки.



Зависимость результатов распознавания от объема обучающей «фоновой» выборки $D = f(N_\phi)$

Сказанное подтверждается рисунком, где представлены полученные зависимости частоты правильной классификации «сигнальной» выборки (3×20 значений вектора признаков) относительно обучающей «фоновой», объем которой меняется с шагом в 20 значений в пределах от 20 до 300. Сплошная линия соответствует уровню ложных тревог $F = 0,1$; штриховая – уровню $F = 0,05$.

Другой вариант задачи – распознавание полного массива «фона» (2800 значений), который ввиду ограничений со стороны оперативной памяти ЭВМ был разбит на отдельные сегменты, поочередно загружаемые на счет. Как следует из табл. 3 (два правых столбца), существует надежная разделяемость ($D = 0,75$ при $F = 0,1$) представительной «фоновой» выборки относительно «сигнального» множества.

Результаты распознавания

N сегментов	Число точек			$D = N_1/N \quad F = 0,05$	$D = (N_1 + N_2)/N \quad F = 0,1$
	N (общее)	N_1 («1» аномалия)	N_2 («2» граничная)		
4	320	189	29	0,59	0,68
5	«	224	28	0,7	0,79
6	«	226	18	0,71	0,76
7	«	196	28	0,61	0,7
8	«	256	23	0,8	0,87
9	«	205	32	0,64	0,74
10	«	185	53	0,58	0,74
11	«	192	31	0,6	0,7
12	240	169	18	0,7	0,78
				\bar{D}	
Σ	2800	1842	260	0,66	0,75

V. ВЫВОДЫ

1. Представленные результаты приложения методов теории распознавания образов к задаче классификации гидрофизических процессов по сигналам лазерного аэрозондирования показывают, что, несмотря на эффекты многократного рассеяния, а также искажения сигнала, возникающие при двукратном прохождении лазерного импульса через случайную морскую поверхность, можно рассчитывать на достаточно высокие характеристики распознавания.

2. В рассматриваемом варианте проведения эксперимента использованная 12-мерная система отличительных признаков обеспечила частоту правильного распознавания $\bar{D} = 0,75$ при частоте ложных тревог $F = 0,1$.

3. Выбор пространственно-временных интервалов определения признаков играет важную роль в задаче распознавания в силу нестационарного характера возмущений, развивающихся в неоднородной морской среде.

Работа выполнена в 1989–1991 гг. на основе данных, полученных в ходе совместного эксперимента с авиалидаром «Чайка» Института общей физики АН СССР и ЦНПО «Комета» в 1985 г. [1, 5].

1. Аброскин А.Г., Бункин А.Ф., Власов Д.В. и др. // Труды ИОФ АН СССР. М.: Наука, 1986. С. 23–29.
2. Большаков А.Н., Пиотух В.Б. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Автоматизированные системы управления производствами и разработками. 1993. Вып. 1–2. С. 32–37.
3. Бондур В.Г., Борисов Б.Д. и др. // Труды 9-го Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1987. С. 292–296.
4. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. С. 411.
5. Бункин Ф.В., Власов Д.В., Зубков Е.В. и др. // Статистические методы и системы обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды: Тезисы докл. Минск: Бел. гос. ун-в., НИИПФП им. А.Н. Севченко, 1989. С. 149–151.
6. Zubkov E. V., Bunkin A. F. // BRAS Physics/Supplement. Physics of Vibrations. 1995. V. 59. N 3. P. 165–172.
7. Степанов В.Н. Океаносфера. М.: Мысль, 1983. 270 с.

Центральный научно-исследовательский институт «Комета»,
Москва

Поступила в редакцию
10 сентября 1996 г.

E. V. Zubkov, Yu. K. Lubimov, S. I. Shamaev. **Method of Recognition of Sea Medium Disturbances from Airborne Laser Returns.**

The efficiency characteristics of sea medium disturbances recognition from airborne lidar returns are obtained. Logical procedures were used in calculation of the disturbances values in gradient and spectral forms. The pattern recognition algorithm based on potential functions (kernel estimations) method with control of class representation adequacy is treated. The results of the disturbances recognition in realistic sea medium, obtained by the algorithm, are presented.