

УДК 519.219 : 519.237.5

О. А. Степанов  
(Санкт-Петербурге)

**ОПТИМАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ  
УТОЧНЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА  
В КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ О ПОЛЕ В ВИДЕ КАДРА**

В рамках теории оптимального стохастического оценивания решается задача уточнения координат объекта в корреляционно-экстремальной навигационной системе при поступлении информации о поле в виде кадра. Анализируется возможность использования предложенного подхода для решения задач уточнения координат по данным многолучевого эхолота и на основе сопоставления картографического и радиолокационного изображений береговой черты.

**Введение.** Одна из отличительных особенностей задач совмещения реализаций процессов и полей, с которыми приходится иметь дело при проектировании корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС), заключается в их нелинейном характере [1—3]. Это и определило распространение на начальных этапах развития таких систем эвристических алгоритмов совмещения, направленных на минимизацию различных критериев, характеризующих меру близости между совмещаемыми реализациями и, как правило, непосредственно не связанных с ошибкой определения координат, уточнение которых является одной из основных задач разработки КЭНС [4—10]. Наибольшее применение получили алгоритмы, основанные на максимизации взаимно-корреляционных функций между совмещаемыми реализациями [4—6, 9, 11, 12]. В дальнейшем при разработке КЭНС, в которых предполагается поступление информации о поле в отдельных точках (КЭНС с точечным зондированием), развитие получили более тонкие методы, основанные на использовании теории оптимального нелинейного оценивания [1—3, 13]. Применение этих методов позволило разрабатывать алгоритмы, направленные на непосредственную минимизацию среднеквадратической ошибки определения координат объекта.

В КЭНС, использующих информацию о поле в виде кадра, аналогичные методы до настоящего времени не получили развития. Здесь при обсуждении возможности применения теории оптимального оценивания обычно ограничиваются рассмотрением линеаризованного варианта задачи. В этом случае алгоритм оценивания сводится к алгоритму фильтра Калмана при векторном характере измерений [1, с. 267; 2] или к процедурам типа метода наименьших квадратов [14]. Однако на практике методы, основанные на линеаризации, оказываются неэффективными. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть возможность использования теории оптимального стохастического оценивания при разработке алгоритмов применительно к системам, в которых предполагается, что информация о поле задана в виде кадра. Предлагаемая работа и посвящена данной проблеме.

**Постановка задачи в рамках теории оптимального оценивания.** Итак, предположим, что имеется информация о координатах объекта, заданная в некоторой прямоугольной системе координат в виде

$$\begin{aligned}x_c &= x - \Delta x, \\y_c &= y - \Delta y,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $x, y$  — истинные координаты объекта;  $x_c, y_c$  — координаты объекта, вырабатываемые навигационной системой (НС), показания которой необходимо уточнить;  $\Delta x, \Delta y$  — ошибки навигационной системы.

Пусть, кроме того, имеется набор измерений поля  $\psi(x, y)$  в виде кадра, который запишем как [15]

$$z_i = \psi(x, y, i) + \xi_i, \quad i = \overline{1, k},\tag{2}$$

где  $\psi(x, y, i)$  — функция, определяющая правило вычисления значений поля (правило построения карты) в узловых точках кадра, расположение которых относительно  $x, y$  считается известным;  $\xi_i$  — суммарная ошибка карты и измерителя поля. Здесь предполагается сквозная нумерация компонент вектора измерений.

Суть задачи заключается в уточнении показаний навигационной системы по измерениям (2).

Заметим, что в КЭНС с точечным зондированием измерения, как правило, носят скалярный характер, а накопление информации о поле, обеспечивающее уточнение обеих координат объекта, осуществляется за счет его движения. Достоинство КЭНС с кадровым поступлением информации заключается в том, что в принципе обеспечивается возможность уточнения обеих координат по единичному измерению за счет его векторного характера.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}\Delta &= (\Delta(1), \Delta(2))^T = (\Delta x, \Delta y)^T, \\z &= (z_1, \dots, z_k)^T, \\\xi &= (\xi_1, \dots, \xi_k)^T.\end{aligned}$$

Будем считать, что заданы гауссовы плотности распределения независимых между собой векторов  $\xi, \Delta$  в виде

$$\begin{aligned}f(\Delta) &= N(\Delta; 0, P_0), \\f(\xi) &= N(\xi; 0, R_i).\end{aligned}\tag{3}$$

Полагаем также, что  $x, y$  представляют собой случайные величины с математическим ожиданием  $x_c, y_c$  и плотностью распределения, соответствующей плотности распределения ошибок НС  $\Delta$ . Здесь для плотности распределения гауссова вектора  $a$  с математическим ожиданием  $\bar{a}$  и матрицей ковариаций  $A$  используется обозначение

$$f(a) = N(a; \bar{a}, A).$$

Подставляя выражение (1) в соотношение (2), задачу уточнения координат в этом случае можно свести к задаче оценивания ошибок НС  $\Delta$  по измерениям вида

$$z_i = \chi_i(\Delta) + \xi_i,\tag{4}$$

где  $\chi_i(\Delta) = \psi(x_c - \Delta x, y_c - \Delta y, i)$ ,  $i = \overline{1, k}$ . Из теории оптимального нелинейного оценивания известно, что оценка, минимизирующая величину ее среднеквадратической ошибки (СКО), определяется как [3]

$$\hat{\Delta} = \int \Delta f(\Delta/z) d\Delta, \quad (5)$$

где  $f(\Delta/z)$  — апостериорная плотность, т. е. плотность, условная к набору измерений  $z$ . Для этой плотности справедливо представление

$$f(\Delta/z) = \frac{f(\Delta)f(z/\Delta)}{c},$$

в котором  $c$  — нормирующая константа;

$$f(z/\Delta) = N(z; \chi(\Delta), R_\varepsilon), \quad (6)$$

$$\chi(\Delta) = (\chi_1(\Delta), \dots, \chi_k(\Delta))^T.$$

В соотношении (5) интеграл понимается в бесконечных пределах, а дифференциал векторов — как произведение дифференциалов их компонент. Помимо оценок в рамках данной постановки может быть определена также апостериорная матрица ковариаций ошибок в виде

$$P = \int (\Delta - \hat{\Delta})(\Delta - \hat{\Delta})^T f(\Delta/z) d\Delta. \quad (7)$$

Эта матрица весьма важна в практике навигационных приложений, поскольку она характеризует текущую точность оценивания, соответствующую данному набору измерений  $z$ .

Таким образом, в рамках предложенной постановки задача проектирования алгоритма сводится к разработке процедур вычисления интегралов (5), (6). При исследовании точности и анализе эффективности разрабатываемых алгоритмов привлекают безусловную матрицу ковариаций, вычисляемую как

$$G = \iint (\Delta - \hat{\Delta})(\Delta - \hat{\Delta})^T f(\Delta, z) d\Delta dz, \quad (8)$$

где  $f(\Delta, z) = f(\Delta)f(z/\Delta)$  — совместная плотность распределения векторов  $z$  и  $\Delta$ . Диагональные элементы этой матрицы характеризуют величину минимальной СКО, которая соответствует оптимальной процедуре оценивания в среднем по всему ансамблю измерений  $z$ . Обычно на практике для вычисления матрицы  $G$  привлекается метод Монте-Карло, использование которого приводит к приближенному соотношению

$$G = \frac{1}{L} \sum_{p=1}^L \varepsilon_p (\varepsilon_p)^T, \quad (9)$$

где  $\varepsilon = (\Delta_p - \hat{\Delta}_p(z_p))$ . Здесь  $\Delta_p, z_p$  — реализации векторов с совместной плотностью распределения  $f(\Delta, z)$ .

Для целей приближенной оценки точности может быть использовано неравенство Рао — Крамера, которое для данной задачи записывается как [16]

$$G \geq J^{-1},$$

где

$$J = \iint \frac{\partial \ln f(\Delta, z)}{\partial \Delta} \left( \frac{\partial \ln f(\Delta, z)}{\partial \Delta} \right)^T f(\Delta, z) d\Delta dz.$$

В рассматриваемом случае с использованием результатов работы [16] можно показать, что для матрицы  $J$  справедливо приближенное соотношение

$$J = P_0^{-1} + \int \frac{\partial \chi^T(\Delta)}{\partial \Delta} \left( \frac{\partial \chi^T(\Delta)}{\partial \Delta} \right)^T f(\Delta) d\Delta. \quad (10)$$

Заметим, что в отличие от работы [16], в которой отыскивается матрица, характеризующая нижнюю границу точности оценивания в среднем для всего ожидаемого ансамбля реализаций поля, здесь с помощью матрицы  $J$  устанавливается нижняя граница точности в условиях фиксированной карты.

Построение алгоритма. Задача построения алгоритма в рамках предложенной постановки, по сути, сводится к выбору такой аппроксимации апостериорной плотности, которая, с одной стороны, порождает экономичные в вычислительном отношении процедуры вычисления оценки и матрицы ковариаций (5), (6), а с другой — обеспечивает точность, близкую к потенциальной [13]. Последнее означает, что элементы матрицы  $G^*$ , определяемой с помощью соотношения типа (8), в котором оптимальная оценка заменяется субоптимальной, близки к соответствующим элементам матрицы  $G$ .

С учетом изложенного используем аппроксимацию апостериорной плотности в области  $\Omega$  наиболее вероятных значений  $\Delta$

$$\Omega = (\Delta : |\Delta x| < 3\sigma_0, |\Delta y| \leq 3\sigma_0) \quad (11)$$

в виде

$$f(\Delta/z) = \sum_{\nu=-m}^m \sum_{\mu=-m}^m \alpha^{\mu\nu} \delta(\Delta x - \Delta x^{\mu\nu}) \delta(\Delta y - \Delta y^{\mu\nu}), \quad (12)$$

где

$$\alpha^{\mu\nu} = \tilde{\alpha}^{\mu\nu} / \left( \sum_{\nu=-m}^m \sum_{\mu=-m}^m \tilde{\alpha}^{\mu\nu} \right),$$

$$\tilde{\alpha}^{\mu\nu} = f(\Delta = \Delta^{\mu\nu}) f(z/\Delta = \Delta^{\mu\nu}), \quad (13)$$

$$\Delta^{\mu\nu} = (\Delta x^{\mu\nu}, \Delta y^{\mu\nu}),$$

$\delta(\cdot)$  — дельта-функция.

Соотношение (11) записано в предположении, что в (3)  $P_0$  — диагональная матрица с элементами  $\sigma_0^2$ , стоящими на диагонали. В выражении (13) при вычислении ненормированных весов  $\tilde{\alpha}^{\mu\nu}$  используются соотношения (3), (6).

Нетрудно заметить, что аппроксимация (12) приводит к следующим выражениям для оценок и матриц ковариаций:

$$\hat{\Delta} = \sum_{\nu=-m}^m \sum_{\mu=-m}^m \alpha^{\mu\nu} \Delta^{\mu\nu}, \quad (14)$$

$$P = \sum_{\nu=-m}^m \sum_{\mu=-m}^m \alpha^{\mu\nu} \Delta^{\mu\nu} (\Delta^{\mu\nu})^T - \hat{\Delta} \hat{\Delta}^T. \quad (15)$$

Алгоритм, порожденный аппроксимацией (12), называется методом сеток, поскольку выбранная аппроксимация приводит к сеточным методам вычисления интегралов. Достоинство предложенного алгоритма заключается в его простоте. По сути, процедура вычисления сводится к обычному взвешиванию координат точек узлов. Кроме того, простым увеличением числа узлов сетки вычислительные ошибки определения интегралов могут быть практически сведены к нулю. Это позволяет при достаточно большом числе узлов сетки

рассматривать предложенный алгоритм как алгоритм оптимального оценивания.

Решение задачи уточнения координат места по данным многолучевого эхолота. Рассмотрим применение изложенных методов для решения задачи уточнения координат места с использованием поля рельефа дна и данных многолучевого эхолота, с помощью которого можно получать измерительную информацию о глубине одновременно в нескольких точках [17]. Будем считать, что информация о поле рельефа дна задана для некоторого участка в виде значений поля в узлах равномерной сетки координат. Изолинии участка поля, используемого в дальнейшем, изображены на рис. 1. Функция  $\chi_i(\Delta)$  в этом случае будет задаваться следующим образом:

$$\chi_i(\Delta) = \psi(x_c - \Delta - dx_i, y_c - \Delta - dy_i), \quad (16)$$

где  $dx_i, dy_i$  определяют отстояние  $i$ -го и центрального лучей, а для вычисления значений функции  $\psi(\cdot)$  в произвольной точке привлекается алгоритм интерполяции, основанный, например, на применении двумерных параболических сплайнов.

Представим ошибку  $\xi_i$  в виде

$$\xi_i = c + v_i, \quad (17)$$

где  $c, v_i$  — постоянная и флуктуационная составляющие ошибки  $\xi_i$ , с дисперсиями  $r_c^2$  и  $r_v^2$  соответственно. Считая, что  $v_i$  — независимые между собой случайные величины, с учетом принятой модели (17) запишем:

$$R_\xi = r_c^2 I + r_v^2 E, \quad (18)$$

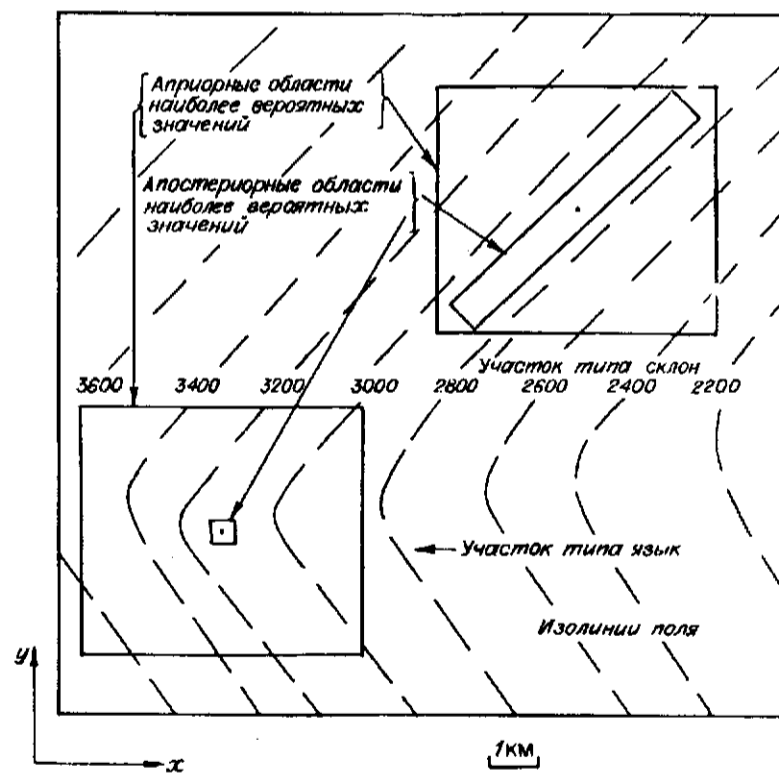


Рис. 1. К задаче уточнения координат с использованием многолучевого эхолота

где  $I$  — матрица, состоящая из единиц;  $E$  — единичная матрица. Из выражения (18) вытекает, что

$$R_i^{-1} = \left( E - \frac{r_c^2}{(kr_c^2 + r_v^2)} I \right) / r_v^2. \quad (19)$$

Таким образом, для ненормированных весов будет справедливо следующее соотношение:

$$\tilde{\alpha}^{uv} = \exp \left\{ -0,5 \left[ (\Delta^{uv})^T P_0^{-1} \Delta^{uv} + \left[ \sum_{i=1}^k (z_i - \chi_i(\Delta^{uv}))^2 - \frac{r_c^2}{(kr_c^2 + r_v^2)} \left[ \sum_{i=1}^k (z_i - \chi_i(\Delta^{uv})) \right]^2 \right] / r_v^2 \right] \right\}. \quad (20)$$

Заметим, что при  $r_c^2 = 0$  третье слагаемое здесь обращается в нуль, что упрощает процедуру вычисления весов.

Для того чтобы проиллюстрировать возможность использования изложенного подхода для решения задачи уточнения координат по данным многолучевого эхолота, были разработаны моделирующие программы, реализующие алгоритмы вычисления оценок и матриц ковариаций согласно выражениям (14), (15), в которых веса определяются с использованием соотношений (13), (20). Кроме того, при моделировании определялись матрицы  $G$  и  $J^{-1}$  в соответствии с выражениями (9), (10).

При выполнении расчетов предполагалось, что  $\sigma_0 = 1$  км,  $r_c = r_v = 1$  % от  $H_{cp}$  при  $H_{cp} \approx 3000$  м. Решались два методических примера. Для одного из них предполагалось, что эхолот имеет три луча с расстоянием по горизонтали между «озвучиваемыми» участками 0,7 км. Расположение лучей задавалось вдоль оси  $X$ . Во втором примере считалось, что эхолот предоставляет информацию в виде кадра с числом лучей  $3 \times 3$  и расстоянием по горизонтали также 0,7 км. Вычисления проводились для двух точек, первая из которых расположена над склоном, а вторая — над так называемым «языком». При проведении моделирования число реализаций в методе Монте-Карло принималось  $L = 20$ . Проводимые расчеты показали, что для принятых уровней ошибок при  $m \geq 50$  результаты вычислений практически не менялись. Время вычислений для одной реализации при  $k = 3 \times 3$  не превышало 30 с при использовании персонального компьютера с процессором Intel 80386. Сопоставление осредненных по всем реализациям текущих матриц ковариаций  $P$  с матрицей  $G$ , рассчитываемой с использованием соотношения (9), а также матриц  $G$  и  $J^{-1}$ , показало их хорошее совпадение. Последнее обстоятельство означает, что в рассматриваемом примере оптимальная оценка достигает своей нижней границы. Совпадение же осредненных матриц ковариаций  $P$  с матрицей (9) свидетельствует о том, что вырабатываемые в алгоритме текущие характеристики точности соответствуют их действительным значениям. В целом погрешность определения координат в рассматриваемых примерах колебалась в пределах 30—50 м. Существенно, что для участка типа склон уточнялась лишь одна составляющая, перпендикулярная генеральному направлению изолиний поля. Этот факт проявлялся также и в том, что эллипс ошибок, формируемый с использованием известных соотношений для соответствующих текущих матриц ковариаций, имел ориентацию, близкую к характеру изменения изолиний.

Решение задачи уточнения координат места путем совмещения картографического и радиолокационного изображений береговой черты. Ясно, что изложенный подход может быть применен не только при уточнении координат места с использованием полей, но также и при любых других источниках корректирующей информации в случае, когда измерения носят векторный характер, а их зависимость от оцениваемых координат нелинейна. Покажем,

в частности, что предложенные алгоритмы могут быть использованы при определении координат в задаче, основанной на сопоставлении информации о береговой черте, представленной в картографической базе данных, и радиолокационных измерений набора дальностей до береговой черты в направлении фиксированных значений пеленгов, поступающих от радиолокатора. По сути, здесь речь идет об уточнении координат на основе совмещения изображений специального вида (рис. 2).

Предположим, что информация о береговой черте задана набором точек  $y_j, x_j, j = \overline{1, M}$ , в системе координат с центром в точке  $x_c, y_c$ . Запишем имеющиеся измерения дальностей и пеленгов:

$$z_i = \rho(\Delta x, \Delta y, q_i) + \Delta \rho_i, \quad (21)$$

$$q_i^\Pi = q_i + \Delta q_i, \quad (22)$$

где  $\rho(\Delta x, \Delta y, q_i)$  — функция, с помощью которой вычисляется дальность до береговой черты от точки с координатами  $\Delta x, \Delta y$  вдоль фиксированного значения пеленга  $q_i$ ;  $\Delta \rho_i, \Delta q_i$  — погрешности измерения дальностей и пеленгов, причем последние порождены в основном погрешностью курсоуказателя, которую за время одного обращения антенны локатора можно считать постоянной.

Введем обозначения:

$$q = (q_1, \dots, q_k)^T,$$

$$\Delta q = (\Delta q_1, \dots, \Delta q_k)^T,$$

$$\Delta \rho = (\Delta \rho_1, \dots, \Delta \rho_k)^T.$$

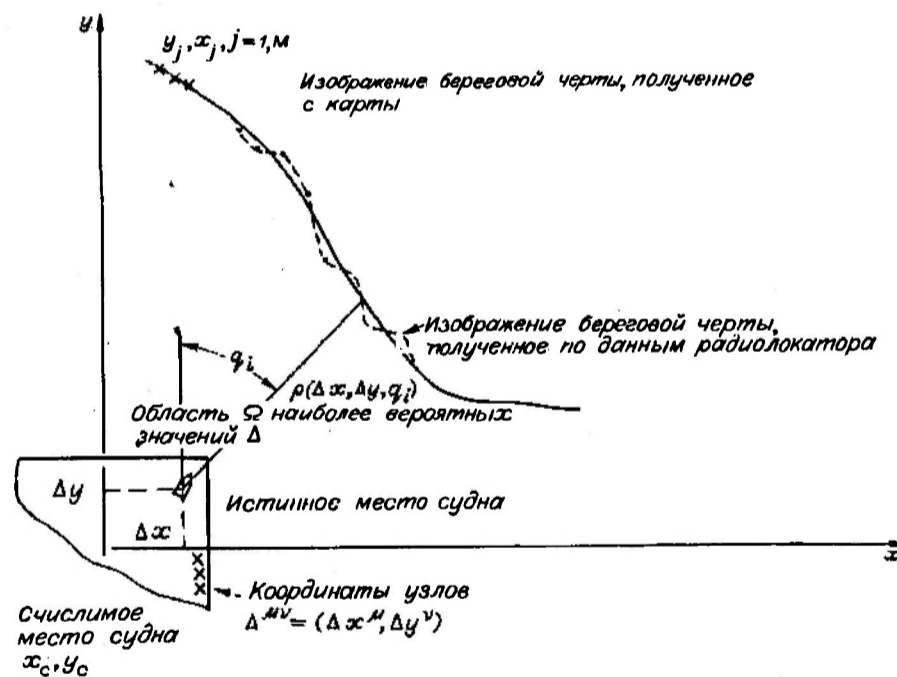


Рис. 2. К задаче уточнения координат места на основе совмещения радиолокационного и картографического изображений береговой черты

Будем полагать, что заданы плотности распределения векторов  $q$ ,  $\Delta\rho$  в виде

$$f(\Delta\rho) = N(\Delta\rho, 0, R_{\Delta\rho}),$$

$$f(\Delta q) = N(\Delta q, 0, R_{\Delta q}).$$

Заметим, что вектор  $q^{\Pi}$  при выбранном наборе пеленгов определяет программу измерений. Компоненты этого вектора  $q_i^{\Pi}$  при фиксированной программе представляют собой известные детерминированные величины. В этих условиях естественно считать случайным вектор  $q$ , задав плотность его распределения в виде

$$f(q) = N(q; q^{\Pi}, R_{\Delta q}).$$

Подставляя выражение (22) в соотношение (21), можно записать:

$$z_i = \rho(\Delta x, \Delta y, q_i^{\Pi} - \Delta q_i) + \Delta\rho_i. \quad (23)$$

Учитывая малость ошибок  $\Delta q_i$ , представим эти измерения как

$$z_i = \rho(\Delta x, \Delta y, q_i^{\Pi}) + \xi_i, \quad (24)$$

где

$$\xi_i = \dot{\rho}(\Delta x, \Delta y, q_i) \Big|_{\substack{\Delta x = \Delta y = 0, \\ q_i = q_i^{\Pi}}} \Delta q_i + \Delta\rho_i,$$

а  $\dot{\rho}(\Delta x, \Delta y, q_i)$  — производная по углу функции  $\rho(\Delta x, \Delta y, q_i)$ .

Особенность измерений (24) заключается в том, что функция  $\rho(\Delta x, \Delta y, q_i)$  задается неявным образом. Для вычисления этой функции требуется решить уравнение

$$\varphi(x) = (x - \Delta x) \operatorname{tg}(90 - q_i) + \Delta y, \quad (25)$$

а затем вычислить дальность в соответствии с выражением

$$\rho(\Delta x, \Delta y, q_i) = [(x - \Delta x)^2 + (\varphi(x) - \Delta y)^2]^{0.5}, \quad (26)$$

где  $\varphi(x)$  — функция, описывающая поведение береговой черты. Решение уравнения (25) в общем случае отыскивается только численно. Ясно, что значения производных  $\dot{\rho}(\Delta x, \Delta y, q_i)$  также должны определяться численным способом.

Для описания апостериорной плотности  $f(\Delta/z)$  может быть использована аппроксимация (12), в которой при вычислении ненормированных весов (13) вместо соотношения (6) для  $f(z/\Delta)$  следует опираться на выражение

$$f(z/\Delta) = N(z; \rho(\Delta x, \Delta y, q), R_{\xi}),$$

где

$$\rho(\Delta x, \Delta y, q) = (\rho(\Delta x, \Delta y, q_1) \dots \rho(\Delta x, \Delta y, q_k))^T,$$

$$R_{\xi} = T(q)R_{\Delta q}T(q) + R_{\Delta\rho}.$$

Здесь  $T(q)$  — диагональная матрица с элементами  $(\dot{\rho}(\Delta x, \Delta y, q_i))^2$ .

Таким образом, рассматриваемая задача сведена к задаче оценивания  $\Delta$  по измерениям типа (4) и для ее решения может быть использован описанный выше подход, в частности, для получения оценок  $\Delta$  могут быть привлечены алгоритмы типа (14), (15). Приближенный анализ точности в этой задаче



может быть проведен на основе вычисления матрицы  $J^{-1}$  с использованием соотношения типа (10), в котором

$$\frac{\partial x^T}{\partial \Delta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_1)}{\partial \Delta x} & \dots & \frac{\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_k)}{\partial \Delta x} \\ \frac{\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_1)}{\partial \Delta y} & \dots & \frac{\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_k)}{\partial \Delta y} \end{bmatrix},$$

где  $\frac{\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_i)}{\partial \Delta x}$ ,  $\frac{\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_i)}{\partial \Delta y}$ ,  $i = \overline{1, k}$ , — производные функций, задаваемых с помощью соотношений (25), (26).

Ориентировочный анализ точности удобно провести для случая простейшего поведения береговой черты в виде прямой линии. При таком поведении береговой черты задача, как нетрудно заметить, становится линейной. Для определенности полагаем, что эта прямая проходит параллельно оси  $x$  на расстоянии  $\rho_0$  от центра карты. Уравнение (25) в этой ситуации имеет следующий вид:

$$\rho_0 = (x - \Delta x) \operatorname{tg}(90 - q_i) + \Delta y,$$

а функция (26) определяется как

$$\rho(\Delta x, \Delta y, q_i) = (\rho_0 - \Delta y) / \sin(90 - q_i).$$

Как и следовало ожидать, при прямолинейном поведении береговой черты может быть уточнена лишь одна координата. Производные  $\partial \rho_i / \partial \Delta y$  и  $\rho_i$ , необходимые для проведения анализа точности, определяются здесь следующим образом:

$$\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_i) / \partial \Delta y = -1 / \sin(90 - q_i),$$

$$\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_i) / \partial q_i = -[(\rho(\Delta x, \Delta y, q_i) - \Delta y) \cos(90 - q_i)] / \sin^2(90 - q_i),$$

в частности, при  $q_i = 0$   $\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_i) / \partial \Delta y = -1$ ;  $\partial \rho(\Delta x, \Delta y, q_i) / \partial q_i = 0$ . Отсюда следует, что при прямолинейном характере поведения береговой черты в случае, когда угол между пеленгом и береговой чертой равен  $90^\circ$ , ошибки курсоуказателя не оказывают влияния на точность определения координат. В рассматриваемом примере при  $q_i = 0$  погрешность определения координат для  $k = 1$ , как нетрудно заметить, будет совпадать с погрешностью измерения дальности, которая составляет величину порядка 1,5 % от измеряемой дальности. При проведении более подробного анализа точности следует учитывать, с одной стороны, возможность повышения точности за счет сглаживания флуктуационных составляющих ошибок измерений при использовании нескольких измерений дальности, а с другой — наличие несглаживаемых погрешностей, порожденных, например, отличием радиолокационного изображения береговой черты от ее картографического представления.

Аналогичный анализ точности может быть проведен и при другом поведении береговой черты при ее прямолинейном характере. В общем случае очевидно, что уточняться будет направление, перпендикулярное береговой черте. Ясно, что для уточнения двух координат необходимо располагать как минимум такими двумя участками береговой черты, для которых аппроксимирующие их прямые будут пересекаться под углами, существенно отличными от нуля.

#### ВЫВОДЫ

В рамках теории оптимального оценивания сформулирована задача уточнения координат объекта в корреляционно-экстремальной навигационной системе при условии, что информация о поле поступает в виде кадра.

Предложен достаточно простой для реализации алгоритм решения задачи определения координат, основанный на сеточном методе вычисления интегралов, с помощью которых определяются оптимальные оценки и соответствующие им текущие матрицы ковариаций их ошибок.

Продемонстрирована эффективность предложенных алгоритмов на примере решения задачи уточнения координат места объекта с использованием многолучевого эхолота, обеспечивающего измерения поля рельефа дна одновременно в нескольких разнесенных в пространстве точках.

Отмечено, что предложенный подход может быть использован в ряде других задач, отличительная особенность которых заключается в векторном характере измерений и нелинейной их зависимости от оцениваемых параметров. Эти особенности, как известно, присущи задачам совмещения изображений. В частности, показано, что полученные алгоритмы могут быть привлечены при решении задачи уточнения координат на основе совмещения картографического и радиолокационного изображений береговой черты.

В заключение автор выражает признательность д. т. н. проф. С. П. Дмитриеву за полезные советы и замечания, высказанные при подготовке и написании этой работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А. А., Белоглазов И. Н., Чигин Г. П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем.—М.: Наука, 1979.
2. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации.—М.: Радио и связь, 1986.
3. Дмитриев С. П. Высокоточная морская навигация.—Л.: Судостроение, 1990.
4. Векслер В. Н., Казамаев А. А., Хорол Д. М. Оптимальное измерение параметров оптических сигналов на фоне помех // АнТ.—1975.—№ 3.
5. Ярославский Л. П. Обнаружение и локализация деталей изображений // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая.—1975.—Вып. 8.
6. Svedlov M., McGillen C. D., Amita P. E. Image registration similarite measure and preprocessing method comparisons // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.—1978.—AES-14, N 1.—P. 141.
7. Андреев Г. А., Потапов А. А. Алгоритмы обработки навигационной, пространственно-временной информации. Ч. 1, 2 // Зарубеж. радиоэлектрон.—1989.—№ 3, 4.
8. Андросов В. А., Бойко Ю. И., Бочкарев А. М., Однорог А. П. Совмещение изображений в условиях неопределенности // Зарубеж. ради электрон.—1985.—№ 4.
9. Mostafavi H., Smith F. W. Image correlation with geometric distortion // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.—1978.—AES-14, N 3.—Pt. 1.—P. 487; Pt. 2.—P. 494.
10. Mostafavi H., Steding T. L., Smith F. W., Poulsen R. S. Optimum windows for image registration // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.—1981.—AES-17, N 1.—P. 101.
11. Брандин В. К. Анализ критериальных функций, используемых в корреляционно-экстремальных системах навигации, на помехоустойчивость // Автометрия.—1990.—№ 5.
12. Филатов В. И. Понсково-рекуррентный алгоритм измерения параметров движения фрагмента телевизионного изображения // Автометрия.—1991.—№ 3.
13. Дмитриев С. П., Степанов О. А. Методы приближенного решения задач синтеза корреляционно-экстремальных систем // Корреляционно-экстремальные системы управления.—Томск: Изд-во Томского ун-та, 1982.
14. Буймов А. Г. Корреляционно-экстремальная обработка изображений.—Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987.
15. Степанов О. А. Сравнительный анализ структуры различных алгоритмов совмещения гауссовых процессов и полей // Автометрия.—1991.—№ 5.
16. Степанов О. А. Предельно достижимая точность совмещения гауссовых изображений // Автометрия.—1990.—№ 5.
17. Жилина Н. А. Развитие многолучевых эхолотов за рубежом // Судостроение за рубежом.—1986.—№ 12.

Поступила в редакцию 10 января 1993 г.