

К. В. ДУНАЕВСКАЯ, Л. В. КИСЕЛЕВ, В. Б. КОСТОУСОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ В ЗАДАЧЕ НАВИГАЦИИ ПО КАРТАМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

*В статье исследуется предложенный ранее метод вычисления текущей характеристики точности поискового корреляционно-экстремального алгоритма решения задачи навигации по геофизическим полям. Предложенный метод основан на анализе отношения экстремальных значений используемого в поисковом алгоритме функционала сопоставления измеренного фрагмента поля и фрагментов, полученных из эталонной карты, и определении диаметра множества заданного уровня этого функционала. Исследование проводится на примере данных о трех пространственных геофизических полях: поле глубин моря, поле аномалий силы тяжести и аномальном магнитном поле – и ориентировано на их применение для навигации подводного движущегося объекта. Описываются особенности информационно-измерительных систем, применяемых при съемке этих полей с использованием подводного робота, и процедура, имитирующая процесс получения карты с учетом этих особенностей. Приводятся полученные путем моделирования задачи навигации в условиях подводного движущегося объекта результаты сравнения предложенного метода вычисления текущей характеристики точности и метода, используемого в байесовском алгоритме решения задачи навигации.*

**Ключевые слова:** навигация по карте геофизического поля, поисковый корреляционно-экстремальный алгоритм, текущая характеристика точности, байесовский метод оценивания, автономный подводный робот (автономный необитаемый подводный аппарат), картографирование, батиметрия, гравиметрия, магнитометрия.

### 1. Введение

В настоящее время активно разрабатываются навигационные системы со средствами коррекции по геофизическим полям, известные также в отечественной литературе как корреляционно-экстремальные навигационные системы – КЭНС [1–9]. Они приобретают большое значение в связи с необходимостью поиска автономных и помехоустойчивых средств коррекции в качестве альтернативы спутниковым си-

---

**Дунаевская** Кристина Валерьевна. Аспирант, Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН (ИММ УрО РАН) (Екатеринбург).

**Киселев** Лев Владимирович. Главный научный сотрудник, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН (Владивосток).

**Костоусов** Виктор Борисович. Кандидат физико-математических наук, заведующий отделом прикладных проблем управления, ИММ УрО РАН.

Статья по докладу на 13-й мультиконференции по проблемам управления, 2020.

стемам навигации [6, 7]. В данной работе рассматриваются корреляционно-экстремальные системы, относящиеся согласно принятой [1] классификации к системам первого типа, в которых измерительная информация в текущий момент времени снимается в точке геофизического поля, а измеренный фрагмент формируется за счет движения носителя.

В качестве геофизических полей (ГФП) в КЭНС могут быть использованы поле высот подстилающего рельефа для навигации летательного аппарата или поле глубин моря для морского движущегося объекта, гравитационное, магнитное и другие физические поля. Задача корреляционно-экстремального метода навигации (метода коррекции навигационных параметров) [2, 8, 10] по данным карт ГФП состоит в том, чтобы путем привязки измеренного фрагмента поля к эталонной карте уточнить требуемые параметры, например координаты (широту, долготу) носителя. Привязка измерений к эталонной карте нередко производится методом поиска глобального экстремума (максимума или минимума) некоторого функционала сопоставления измеренного фрагмента и фрагментов, полученных из эталонной карты для различных гипотез об искомым навигационных параметрах.

Достоинствами современных поисковых корреляционно-экстремальных алгоритмов является возможность обработать большую априорную область неопределенности искомым параметров в условиях существенно нелинейных измерений. Известная проблема многоэкстремальности функционала сопоставления решается путем развития специализированных алгоритмов поиска глобального экстремума и привлечения мощных вычислительных средств, осуществляющих параллельные вычисления [10].

Как отмечено в работе [2], одна из ключевых проблем поискового корреляционно-экстремального алгоритма – это отсутствие характеристики точности решения задачи навигации и, как следствие, обоснованного критерия для принятия решения о возможности проведения коррекции навигационной системы (НС). Иными словами, речь идет об оценке ожидаемого уровня отклонения вектора, на котором достигается экстремум функционала, от истинного значения искомого вектора в условиях, когда истинное значение вектора оцениваемых параметров неизвестно. В рамках байесовского подхода [2, 3] этот вопрос решается с использованием апостериорной, условной по отношению к измеренному фрагменту плотности распределения вероятности. Вместе с тем этот подход требует знания априорной плотности искомого вектора, а также плотностей ошибок измерения и картографии, что на практике часто сложно обеспечить. В связи с этим актуальной является задача разработки метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по картам ГФП, которые были бы менее требовательными к исходным данным.

Цель настоящей работы состоит в исследовании предложенного ранее в работах [11, 12] метода вычисления текущей характеристики точности решения задачи навигации по картам ГФП с использованием поискового алгоритма коррекции и его сравнении с методом вычисления такой характеристики, используемой в оптимальном байесовском алгоритме [2, 3]. Сравнение проводится по результатам вычислительных экспериментов по решению задачи навигации на примере использования карт трех геофизических полей: поля глубин моря, поля аномалий силы тяжести и поля аномалий магнитного поля – и ориентировано на применение обсуждаемого метода для навигации подводного движущегося объекта. При выполнении экспе-

риментов были использованы карты, предоставленные лабораториями гравиметрии и магнитометрии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева (ТОИ) ДВО РАН и полученные в ходе экспедиционных работ за счет применения высокоточных судовых измерительных средств [12, 13]. С помощью этих исходных карт были сформированы (синтезированы) карты, точность которых соответствует точности информационно-измерительных систем автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), применяемых при съемке этих полей. В этой связи в работе анализируются особенности информационно-измерительных систем АНПА и обсуждается структура и возможные уровни ошибок картографирования, учет которых весьма важен при анализе точности навигации.

Структура предлагаемой работы следующая. В разделе 2 описывается предложенный ранее метод вычисления текущей характеристики точности поискового корреляционно-экстремального алгоритма решения задачи навигации по геофизическим полям на основе анализа используемого функционала сопоставления. Здесь же описывается метод вычисления текущей характеристики точности, используемый в байесовском алгоритме решения задачи навигации. В разделе 3 описываются особенности информационно-измерительных систем, применяемых при съемке и построении карт трех пространственных геофизических полей: поля глубин моря, поля аномалий силы тяжести и аномального магнитного поля с помощью АНПА, обсуждается структура и уровень погрешностей карты. В разделе 4 приводятся результаты вычислительных экспериментов по сопоставлению предложенного метода вычисления текущей характеристики точности и метода, используемого в байесовском алгоритме решения задачи навигации. В разделе 5 изложены выводы по работе.

## 2. Методы вычисления текущей характеристики точности коррекции координат по картам геофизических полей

Рассмотрим задачу коррекции погрешностей навигационной системы по карте геофизического поля в постановке, аналогичной [2]. Пусть на борту движущегося объекта имеются навигационная система, показания которой подлежат коррекции, карта и измеритель поля. Чтобы не усложнять исследование, рассматривается простая постановка задачи одноразовой коррекции координат на плоскости (широты и долготы) в предположении постоянства вектора погрешностей НС на интервале формирования измеренного фрагмента.

Обозначим символом  $g(x)$  функцию, заданную в некоторой прямоугольной области  $\Omega$  плоскости  $\mathbb{R}^2$  ( $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ ) и описывающую зависимость значений ГФП от координат. Обычно эта зависимость задается с помощью цифровой карты поля. Для различения скалярных и векторных величин всюду ниже векторы выделяются жирным шрифтом.

Пусть двумерный вектор  $x$  погрешностей НС принадлежит априорной области неопределенности  $Q$ :

$$x \in Q \subset \Omega \subset \mathbb{R}^2.$$

Будем считать, что измерения поля производятся в точках прямолинейного отрезка, начинающегося в точке  $x$  в заданном фиксированном направлении, которое определяется единичным вектором  $p$ . Модель измерения поля на борту движущегося объекта представима в виде

$$\varphi_k \triangleq \mathbf{g}(\mathbf{x} + t_k \mathbf{p}) + \xi_k, \quad \mathbf{x} \in Q, \quad k = 1, \dots, m, \quad (1)$$

где  $\varphi_k$  – измеренное в дискретный момент  $t_k$  значение поля. Набор значений ( $m$ -вектор)  $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \dots, \varphi_m)^T$  в дальнейшем будем называть измеренным фрагментом поля  $\mathbf{g}$ , или, кратко, фрагментом.

В формуле (1) приняты следующие обозначения:

- $Q \subset \Omega$  – область априорного положения начальной точки  $\mathbf{x} \in Q$  фрагмента  $\boldsymbol{\varphi}$  в области  $\Omega$  задания эталонной карты  $\mathbf{g}$ ;
- $\mathbf{x}$  – действительное положение фрагмента;
- $\mathbf{p}$  – заданный единичный направляющий вектор трассы замеров;
- $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \dots, \xi_m)$  – вектор искажения фрагмента, обычно содержащий погрешности измерений и картографирования.

В целях упрощения будем полагать, что вектор  $\boldsymbol{\xi}$  представляет собой центрированный гауссовский вектор с ковариационной матрицей  $\sigma_{\xi}^2 \mathbf{I}$  ( $\mathbf{I}$  – единичная  $m \times m$ -матрица,  $\sigma_{\xi}^2$  – заданная дисперсия). В реальности искажения фрагмента наряду со случайными шумами датчика поля содержат неточности картографирования, порожденные в том числе и погрешностями относительного положения точек замеров, которые, в свою очередь, обусловлены навигационными погрешностями носителя. Этот вопрос обсуждается более подробно в следующем разделе.

В задаче коррекции требуется по указанным исходным данным получить в некотором смысле «хорошую» оценку  $\tilde{\mathbf{x}}(\boldsymbol{\varphi})$  неизвестного вектора  $\mathbf{x}$  и оценить ее точность.

В данной работе основным предметом исследования является корреляционно-экстремальный поисковый метод коррекции навигационных погрешностей [2], который дополняется предложенным в [11, 12] способом вычисления текущей характеристики точности коррекции, основанным на анализе функционала сопоставления. Исследование заключается в сравнении предложенного способа с методом, используемым в рамках байесовского подхода.

В качестве примера корреляционно-экстремального алгоритма рассматривается следующий функционал сопоставления вектора замеров  $\boldsymbol{\varphi}$  и карты поля  $\mathbf{g}$ :

$$\Phi_{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^m [\mathbf{g}(\mathbf{x} + t_k \mathbf{p}) - \varphi_k]^2. \quad (2)$$

В данном случае оценка  $\tilde{\mathbf{x}}_{\Pi}(\boldsymbol{\varphi})$  определяется в результате поиска глобального минимума функционала  $\Phi_{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x})$ :

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\Pi}(\boldsymbol{\varphi}) = \underset{\mathbf{x} \in Q}{\operatorname{argmin}} \Phi_{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x}). \quad (3)$$

Опишем суть предложенного метода вычисления текущей характеристики точности поискового алгоритма (3). Цель метода – получить путем анализа реализовавшегося функционала сопоставления  $\Phi_{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x})$  оценку отклонения решения задачи (3) от неизвестного истинного вектора  $\mathbf{x}$ . Анализ функционала заключается в нахождении множества  $\Phi_p$ -уровня  $\{\mathbf{x} : \Phi_{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x}) \leq \Phi_p\}$  для порога  $\Phi_p$  и вычисления диаметра этого множества (см. рис. 1):

$$2 \cdot \rho_{\max} = D_{\max} = \operatorname{diam} \{\mathbf{x} : \Phi_{\boldsymbol{\varphi}}(\mathbf{x}) \leq \Phi_p\}. \quad (4)$$

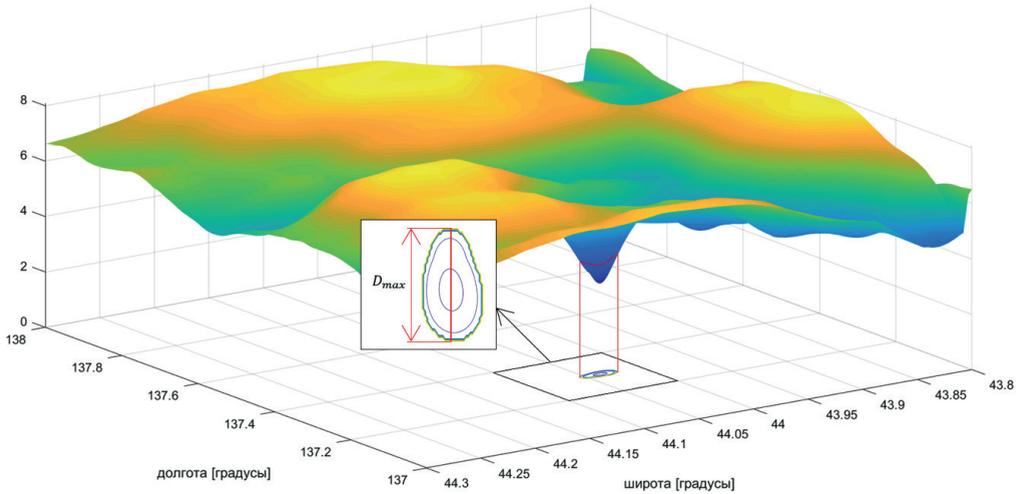


Рис. 1. Вычисление значения  $D_{max}$  для функционала  $\Phi_{\varphi}(\mathbf{x})$  по карте поля АСТ

Поскольку функционал определен на конечной сетке, то и рассматриваемое множество  $\Phi_p$ -уровня состоит из конечного числа точек, а диаметр (4) вычисляется путем нахождения максимального расстояния между этими точками.

Величину  $\rho_{max}$  назовем  $D_{max}$ -оценкой. Порог  $\Phi_p$  вычисляется по формуле

$$\Phi_p = \frac{\Phi(\tilde{\mathbf{x}}_{\Pi}(\Phi))}{r_p},$$

где  $r_p$  – параметр метода ( $0 < r_p < 1$ ), рассчитываемый заранее по карте поля с учетом моделей погрешностей измерений путем вычислительного эксперимента, который описан ниже.

Будем использовать величину  $\rho_{max} = D_{max}/2$  в качестве текущей характеристики точности решения задачи навигации по данным ГФП с помощью поискового алгоритма, которая может быть вычислена на борту и использована, чтобы определить возможность коррекции НС во время движения в текущий момент времени. С помощью  $\rho_{max}$  можно сформировать главное правило коррекции следующим образом: если величина  $\rho_{max}$  в текущий момент времени не превышает априорно допустимой радиальной погрешности  $R_{max}$ , то принимается решение о проведении коррекции. В противном случае коррекция не проводится или считается, что произошел ее срыв.

Предлагаемый метод вычисления текущей характеристики точности коррекции применим и для любого другого функционала сопоставления.

Легко видеть, что трудоемкость вычисления оценки точности (4) определяется количеством  $N_{\Phi}$  узлов расчета функционала  $\Phi_{\varphi}(\mathbf{x})$  и может быть оценена сверху величиной, пропорциональной квадрату  $N_{\Phi}$ , то есть как  $O(N_{\Phi}^2)$ . Величина  $N_{\Phi}$  в простейшем переборном варианте алгоритма вычисляется путем деления площади области априорной неопределенности на площадь ячейки сетки поиска.

Параметр  $r_p$  имеет смысл порогового значения для отношения экстремальных значений функционала:

$$r_p > r = \frac{\Phi(\mathbf{x}_{min_1})}{\Phi(\mathbf{x}_{min_2})}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{x}_{min_1}$  – точка глобального минимума,  $\mathbf{x}_{min_2}$  – точка второго по величине локального минимума. В случае единственного экстремума можно в качестве  $\Phi(\mathbf{x}_{min_2})$  взять минимальное значение функционала на границе области неопределенности. Величина  $r$  показывает, насколько глобальный минимум в (3) ярко выражен на фоне других локальных минимумов, поскольку чем меньше отношение в (5), тем надежнее решается задача коррекции с точки зрения устойчивости к ошибкам измерения.

Параметр  $r_p$  вычисляется заранее в результате следующего статистического эксперимента. По карте района методом математического моделирования с использованием моделей измерений и картографирования [11, 12, 14] формируется выборка, состоящая из пар  $(r, \delta)$ , где  $r$  вычисляется по формуле (5), а  $\delta = \tilde{\mathbf{x}}_{II}(\boldsymbol{\varphi}) - \mathbf{x}$ . Полученная выборка разбивается на два класса по превышению априорно допустимой радиальной погрешности  $R_{max}$ : если  $\delta < R_{max}$ , то пара  $(r, \delta)$  считается успешной коррекцией, в противном случае она относится к срыву коррекции. В эксперименте при выполнении неравенства  $r < r_p$  принимается решение о проведении коррекции. Параметр  $r_p$  вычисляется с помощью критерия Неймана–Пирсона [15, п.1.2.6] и соответствует минимальному уровню ошибок II-го рода при фиксированном уровне ошибок I-го рода. Здесь под ошибкой I-го рода понимается принятие решения об успешной коррекции ( $r < r_p$ ) при срыве ( $\delta \geq R_{max}$ ), а под ошибкой II-го рода понимается ошибочный отказ от коррекции ( $r \geq r_p$ ) при ее возможном проведении ( $\delta < R_{max}$ ).

В данной работе предложенный метод вычисления текущей характеристики точности  $\rho_{max}$  сравнивался с методом, используемым при решении задачи навигации в рамках байесовского подхода с помощью алгоритма нелинейной фильтрации [2, 3]. В рамках байесовского подхода предполагаются известными априорная плотность распределения  $f_x(\mathbf{x})$  искомого вектора  $\mathbf{x}$  и плотность распределения  $f_\xi(\xi)$  вектора похи  $\xi$ , при этом будем считать, что векторы  $\mathbf{x}$  и  $\xi$  независимы.

Согласно [3] оптимальная в смысле минимума среднеквадратической погрешности байесовская оценка  $\tilde{\mathbf{x}}_B(\boldsymbol{\varphi})$  и соответствующая ей матрица ковариаций  $P(\boldsymbol{\varphi})$  выражаются через интегралы от выражений, содержащих условную апостериорную плотность  $f(\mathbf{x}/\boldsymbol{\varphi})$ . В описанном ниже вычислительном эксперименте применяется алгоритм, использующий точечную аппроксимацию плотности  $f(\mathbf{x}/\boldsymbol{\varphi})$ , основанную на приближенном вычислении упомянутых интегралов методом Монте-Карло. При этом выражения для оценки  $\tilde{\mathbf{x}}_B(\boldsymbol{\varphi})$  и матрицы ковариаций  $P(\boldsymbol{\varphi})$  имеют согласно [3, п. 2.5.5] следующий вид:

$$\tilde{\mathbf{x}}_B(\boldsymbol{\varphi}) \approx \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_j \mu_j, \quad (6)$$

$$P(\boldsymbol{\varphi}) \approx \sum_{j=1}^N \mathbf{x}_j \mathbf{x}_j^T \mu_j - \tilde{\mathbf{x}}_B(\boldsymbol{\varphi}) \tilde{\mathbf{x}}_B^T(\boldsymbol{\varphi}), \quad (7)$$

где веса  $\mu_j$  в случае независимого вектора  $\xi$  вычисляются по формулам:

$$\mu_j = \frac{\tilde{\mu}_j}{\sum_{j=1}^N \tilde{\mu}_j}, \quad \tilde{\mu}_j = f_\xi(\boldsymbol{\varphi} - \mathbf{s}(\mathbf{x}_j)) = \prod_{k=1}^m f_{\xi_k}(\varphi_k - \mathbf{g}(\mathbf{x}_j + \mathbf{t}_k \mathbf{p})). \quad (8)$$

В формулах (6), (7) точки  $\mathbf{x}_j$  генерируются датчиком случайных чисел в соответствии с априорной плотностью  $f_x(\mathbf{x})$  распределения вероятностей искомого вектора  $\mathbf{x}$ ,  $N$  – количество генерируемых точек (реализаций). Известно [3], что при увеличении числа реализаций можно добиться сколь угодно высокой точности вычислений. Для

того чтобы получить достаточную точность вычисления оценок (6) и (7), число реализаций  $N$  должно иметь порядок десятков и сотен тысяч. От этого числа непосредственно зависит трудоемкость вычисления алгоритма (6)–(8).

При наличии нескольких пространственно совмещенных карт различных геофизических полей и возможности их одновременного измерения в процессе движения применяется комплексное использование полей для повышения точности коррекции навигационных погрешностей поисковым алгоритмом (3). Для этого будем рассматривать функционал сопоставления  $\Phi_{\phi}(\mathbf{x})$  следующего вида:

$$\Phi_{\phi}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \left( \sum_{k=1}^m [g_i(\mathbf{x} + t_k \mathbf{p}) - \phi_k^i]^2 \right), \quad (9)$$

где  $K$  – количество используемых геофизических полей;  $g_i$  – карта  $i$ -го поля;  $\phi_k^i$  –  $k$ -й отсчет измеренного фрагмента  $i$ -го поля;  $\alpha_i$  – весовой коэффициент влияния замеров  $i$ -го поля на функционал сопоставления.

В данной работе коэффициенты  $\alpha_i$  приняты равными обратным значениям дисперсий  $\sigma_i^2$  суммарных ошибок измерения и картографии:

$$\alpha_i = \frac{1}{\sigma_i^2}.$$

В байесовском методе оценивания также нетрудно учесть возможность коррекции по нескольким геофизическим полям, если их измерения независимы друг от друга. В этом случае можно использовать алгоритм [3, п. 2.5.5.], где плотность  $f_{\xi}(\xi)$  составной помехи  $\xi = (\xi^1, \dots, \xi^K)^T = (\xi_1^1, \dots, \xi_m^1, \dots, \xi_1^K, \dots, \xi_m^K)^T$  представима в виде произведения  $K$  плотностей, соответствующих помехам  $\xi^i$  каждого  $i$ -го поля:

$$f_{\xi}(\xi) = \prod_{i=1}^K f_{\xi^i}(\xi^i).$$

Сравнительный анализ методов проводился для случая, когда  $\mathbf{x}$  – случайный вектор с гауссовской плотностью  $f_x(\mathbf{x}) = N(\mathbf{x}; \mathbf{x}_0; P_x)$ , где  $\mathbf{x}_0$  – центральная точка априорной области  $Q$ ,  $P_x$  – ковариационная матрица.

При этом вектор  $\xi$  формировался двумя способами.

В одном эксперименте в методических целях для сравнения предложенного метода вычисления характеристики точности с методом, используемым в рамках байесовского подхода, вектор погрешностей  $\xi$  моделировался как гауссовский независимый вектор с заданной плотностью  $f_{\xi}(\xi) = N(\xi; 0; \sigma_{\xi}^2 I)$ .

В другом эксперименте вектор  $\xi$  формировался как разность между картой, сформированной путем имитации процесса съемки с использованием информационно-измерительных систем АНПА, и картой, полученной в ТОИ ДВО РАН, принимаемой за эталон. При этом эталонное значение фрагмента в обоих вариантах формировалось с использованием карт ТОИ ДВО РАН.

Второй вариант, по мнению авторов, позволяет получить погрешности карты, свойства которых будут близки к свойствам погрешностей при съемке поля средствами АНПА. В связи с этим в следующем разделе обсуждаются особенности информационно-измерительных систем АНПА, структура погрешностей карты и процедура имитации процесса съемки с целью построения карт, необходимых для проведения второго варианта вычислительного эксперимента.

### 3. Особенности информационно-измерительных систем подводного робота и построения карт ГФП с его использованием

Перспективным способом создания карт ГФП морских территорий является применение автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [16]. Рассмотрим особенности построения карт ГФП с помощью АНПА на примере трех пространственно совмещенных геофизических полей – поля глубин моря (ГМ), поля аномалий силы тяжести (АСТ) и поля геомагнитных аномалий (ГМА). Поскольку авторы не располагали картами, полученными с помощью АНПА, в работе были использованы карты, синтезированные в Институте проблем морских технологий (ИПМТ) ДВО РАН на основе исходных карт ГФП, предоставленных ТОИ ДВО РАН. Исходные картографические данные батиметрии, гравиметрии и магнитометрии для района Татарского пролива с координатами  $E137^{\circ} \dots E138^{\circ}$ ,  $N43.8^{\circ} \dots N44.3^{\circ}$  приведены на рис. 2, а, б, в. Соответствующие им синтезированные карты приведены на рис. 2, г, д, е. Точность синтезированных карт соответствует точности информационно-измерительных систем АНПА, применяемых при съемке упомянутых геофизических полей. Формирование карт осуществлялось путем имитации процесса съемки, в который входят построение сети траекторий, покрывающих заданную область, моделирование процесса движения АНПА по этим траекториям и процесса измерения параметров поля с географической привязкой к точкам, полученным по неточным навигационным данным, как описано в [11, 12, 14].

Остановимся более подробно на всех составляющих погрешности, определяющей точность синтезированной карты поля. Примем для конкретности характеристики информационно-измерительной системы АНПА «ММТ-3000», апробированной в процессе гидрографических исследований в Охотском море [17] и в Антарктике [18]. В суммарную погрешность построения карты ГФП входят следующие составляющие: погрешность навигационной привязки траекторных измерений, погрешности измерителей параметров ГФП, зависящие от локальных особенностей измеряемых полей, методические погрешности моделирования, в частности обусловленные необходимостью интерполяции значений поля [19].

Рассмотрим характер и величины погрешностей, используя экспериментальные данные, полученные при выполнении рабочих операций АНПА «МТ-3000».

Основу навигационного обеспечения АНПА составляет интегрированная навигационная система (КНС), содержащая бортовой инерциальный модуль XSens MTi-300 AHRS, гидроакустическую навигационную систему с ультракороткой базой (ГАНС УКБ) и средствами связи между АНПА и сопровождающим судном.

В состав навигационного комплекса входят:

- инерциальный модуль XSens MTi-300 AHRS, состоящий из датчиков курса, крена, дифферента и угловых скоростей;
- трансивер EvoLogics USBL S2C 18/34 (на судне);
- транспондер EvoLogics S2C M 18/34 (на АНПА) [20, 21];
- комплекс Applanix POS MV V5 [22];
- приемник GPS Trimble Lassen-IQ;
- доплеровский лаг с погрешностью определения скорости 0,02 м/с;
- датчик глубины с систематической погрешностью не более  $\pm 0,5\%$  от глубины.

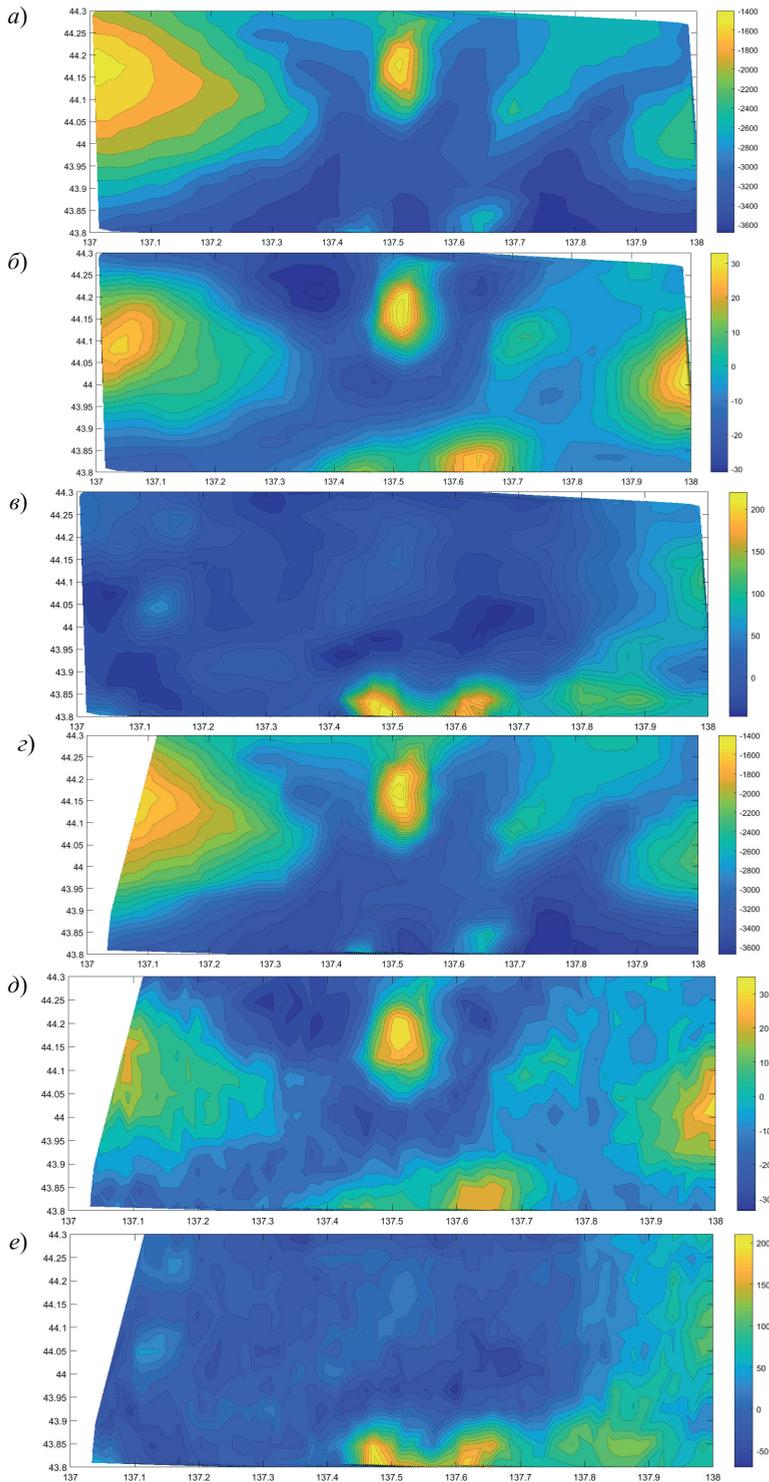


Рис. 2. Фрагменты исходных карт глубин моря (а), поля АСТ (б), поля ГМА (в) и карт поля глубин моря (г), поля АСТ (д), поля ГМА (е), сформированных путем имитации процесса их получения с помощью АНПА. На всех рисунках по горизонтальной оси отложены градусы восточной долготы, по вертикальной – градусы северной широты. Справа от каждой карты показаны цветовые шкалы значений полей: поля глубин в метрах, поля АСТ в мГал, поля ГМА в нТл

Погрешность измерения угловых величин и угловых скоростей инерциальным модулем XSens MTi-300 AHRS составляет соответственно  $0,25^{\circ}$ - $1^{\circ}$  и  $0,05^{\circ}/с$ . СКО ГАНС УКБ изменяется в пределах 5-15 м (в среднем 10 м) в зависимости от глубины, и это значение может быть принято как результирующая погрешность определения координат с помощью интегрированной системы.

### *Погрешности батиметрии*

Основными инструментами батиметрических измерений с борта АНПА «ММТ-3000» являются интерференционный гидролокатор бокового обзора (ИБГО) и датчик глубины. С помощью ИБГО воспроизводится 3D-рельеф дна, и в совокупности с траекторными данными измерения глубины погружения АНПА строится сеть значений глубины моря для синтезирования батиметрической карты. Погрешность ИБГО определяется его конкретными параметрами, в частности диаграммой направленности, и может составлять доли или единицы метров в зависимости от расстояния, с которого производится гидролокация. На АНПА «МТ-3000» используется ИБГО GeoSwath Plus AUV 500 kHz, погрешность которого при измерении расстояния до дна может составлять единицы метров. Очевидно, что преобладающей погрешностью батиметрических измерений является погрешность датчика глубины, пропорциональная измеряемой глубине  $H$ . Для АНПА «МТ-3000» она составляет  $\pm 0,5 \cdot 10^{-2} H$ .

### *Погрешности гравиметрии*

Принципиальные вопросы использования АНПА для гравиметрических измерений и картографирования и оценки точности навигации по синтезированной карте рассматривались в работах [11, 12, 14]. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют оценить точность измерений с помощью современных гравиметров погрешностями порядка 0,5...1 мГал при изменении уровня поля аномалии силы тяжести (АСТ)  $\pm 70$  мГал и при пространственных градиентах поля 1...3 мГал/м. С учетом флуктуационной составляющей погрешности измерений и методических погрешностей синтезирования карты средствами Simulink в работах [11, 12, 14] принято значение результирующей СКО, равное 3 мГал.

### *Погрешности магнитометрии*

В настоящее время съемка и картографирование локальных магнитных полей осуществляются с помощью высокочувствительных магнитометров при выполнении океанографических исследований. Магнитометрия с борта АНПА производится в основном при выполнении поисковых и обследовательских работ. Как правило, используется буксируемый магнитометр, с тем чтобы избежать влияния магнитного поля носителя. В состав систем АНПА «МТ-3000» входит высокочувствительный (0,015 нТл) магнитометр Sentinel Marine Magnetics, оборудованный для работы в режиме буксировки. Абсолютная погрешность магнитометра составляет 0,2 нТл.

#### 4. Описание и результаты вычислительных экспериментов по сопоставлению методов вычисления текущей характеристики точности

Как отмечалось выше, было проведено два варианта вычислительных экспериментов. В первом, методическом, эксперименте карты, приведенные на рис. 2, а, б, в, принимались за эталонные, т.е. считалось, что погрешности картографирования отсутствуют. Карты были представлены в виде матриц отсчетов, заданных на регулярной градусной сетке с шагом  $0,001^\circ$  по обеим осям.

Во втором варианте использовались синтезированные карты трех полей, приведенные на рис. 2, г, д, е. При этом погрешности измерения вычислялись как разности синтезированных и исходных карт.

Во всех экспериментах модельные замеры соответствующих полей формировались по картам, представленным на рис. 2, а, б, в.

Для применения байесовского метода (6), (7) необходимо знание плотности  $f_\xi(\xi)$ , которую можно вычислить наиболее простым способом (8) при условии независимости компонент вектора погрешностей  $\xi$  и известной плотности распределения каждой компоненты. Это условие легко обеспечивается в нашем методическом эксперименте, в котором  $\xi$  моделируется как центрированный гауссовский вектор с нулевым средним и ковариационной матрицей  $\sigma_\xi^2 \mathbf{I}$  ( $\sigma_\xi^2$  – заданная дисперсия). Здесь реализуется потенциальная оптимальность метода (6)–(8), и поэтому сравнение с ним исследуемого метода (3), (4) представляет интерес.

Сложнее обстоит дело с определением плотности  $f_\xi(\xi)$  в экспериментах, в которых погрешности измерения формируются по разности синтезированной и исходной карт. В данном случае плотность  $f_\xi(\xi)$  приближенно оценивается методом парзеновского окна [23] по указанной разности карт.

Для каждого из трех полей и их комбинации было произведено  $N_\xi = 3000$  испытаний алгоритмов коррекции погрешностей навигации, при этом в каждом испытании генерировался случайный вектор  $\mathbf{x} \in Q$  по нормальному закону  $f_x(\cdot) = N(\cdot; \mathbf{x}_0, P_x)$ , где  $\mathbf{x}_0$  – центральная точка априорной области  $Q$  с координатами  $N137.199^\circ, E44.049^\circ$ ,  $P_x = (\sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2) \mathbf{I}$ ,  $\sigma_{x_1} = 3$  км,  $\sigma_{x_2} = 3$  км,  $\mathbf{I}$  – единичная  $2 \times 2$ -матрица. Область априорной неопределенности  $Q$  представляла собой прямоугольник  $40 \times 50$  км.

Для каждого из трех полей, карты которых приведены выше на рис. 2, в зоне коррекции размером примерно  $100 \times 50$  км производилось формирование модельных замеров (1) с шагом  $\Delta$  вдоль прямолинейных трасс длиной 60 км, направленных вдоль оси  $X$  с запада на восток. Шаг  $\Delta$  выбирался таким образом, чтобы ошибки в отсчетах соседних замеров были взаимно не коррелированы.

Затем строился функционал (2) или (9), осуществлялся поиск (3) минимума функционала и вычисление радиальной  $D_{\max}$ -оценки (4). Для того же измеренного фрагмента применялся алгоритм (6)–(8), основанный на байесовском оценивании.

#### Вычисление параметров $r_p$

Качество аппроксимации действительной ошибки с помощью  $D_{\max}$ -оценки напрямую связано с правильностью подбора параметра  $r_p$  (5). Процедура получения  $r_p$  с помощью критерия Неймана–Пирсона [15, п.1.2.6] была описана выше. В проведенном вычислительном эксперименте оптимальный параметр определялся по

минимальному уровню погрешностей II-го рода при фиксированном в 10% уровне погрешностей I-го рода. При этом были заданы следующие значения допустимой радиальной погрешности:  $R_{max} = 2$  км для поля глубин моря, поля АСТ и при комбинировании трех полей и  $R_{max} = 3$  км для поля ГМА.

В результате расчетов были получены следующие значения искомого параметра:  $r_p = 0,3$  для карты поля глубин;  $r_p = 0,6$  для карты поля АСТ;  $r_p = 0,7$  для карты поля ГМА;  $r_p = 0,7$  при комбинировании карт трех полей.

### Оценка плотности $f_{\xi}(\xi)$

Гистограммы разностей синтезированных и исходных карт показаны на рис. 3. Средние значения этих разностей оказались нулевыми, значения СКО разностей составили: для поля глубин моря  $\sigma_{ГМ} = 60$  м; для поля АСТ  $\sigma_{АСТ} = 3$  мГал; для поля ГМА  $\sigma_{ГМА} = 10$  нТл. Увеличенные по сравнению с указанными в разделе 3 значения СКО ошибок карт глубин моря и поля ГМА получились из-за того, что при формировании синтезированных карт в отсутствие коррекции от гидроакустической навигационной системы реализовались большие навигационные ошибки счисления пути.

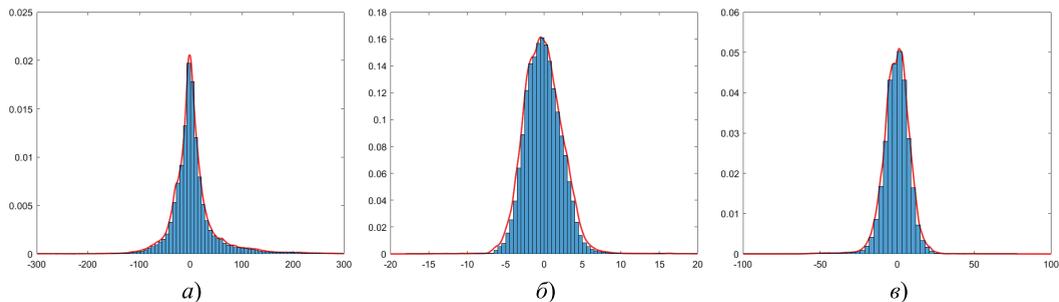


Рис. 3. Гистограммы значений разности синтезированной и исходной карт для батиметрии ( $\sigma_{ГМ} = 60$  м) (а), гравиметрии ( $\sigma_{АСТ} = 3$  мГал) (б) и магнитометрии ( $\sigma_{ГМА} = 10$  нТл) (в) и подобранная плотность распределения (показана красным цветом)

По этим гистограммам методом локальной непараметрической оценки (методом парzenовского окна) [23] были построены оценки плотностей, также показанные на рис. 3. Эти плотности в случае независимости компонент вектора погрешностей измерения  $\xi$  в модели (1) могут быть использованы для приближенной оценки совместной плотности  $f_{\xi}(\xi)$ , с тем чтобы реализовать алгоритм коррекции (6)–(8) на основе байесовского подхода.

### Результаты вычислительных экспериментов

Для вычисления апостериорной плотности  $f(x/\varphi)$  методом Монте-Карло опытным путем было определено число реализаций  $N = 100000$ , достаточное для обеспечения приемлемой точности.

На рис. 4 приведены графики изолиний апостериорной плотности  $f(x/\varphi)$  и функционала сопоставления  $\Phi_{\varphi}(x)$  для полей АСТ и магнитных аномалий. Графики на рис. 4 соответствуют траектории, которая начинается из центра  $x = x_0$  доверительной области. Для удобства сравнения здесь значения функционала и плотности показаны в логарифмическом масштабе.

рифмическом масштабе, причем апостериорная плотность представлена в «обратной» форме  $[\log(f(x/\varphi))]^{-1}$ , для того чтобы ее локальные максимумы перешли в минимумы. Рис. 4 показывает, что апостериорная плотность и функционал сопоставления схожи между собой с точки зрения расположения и формы локальных экстремумов.

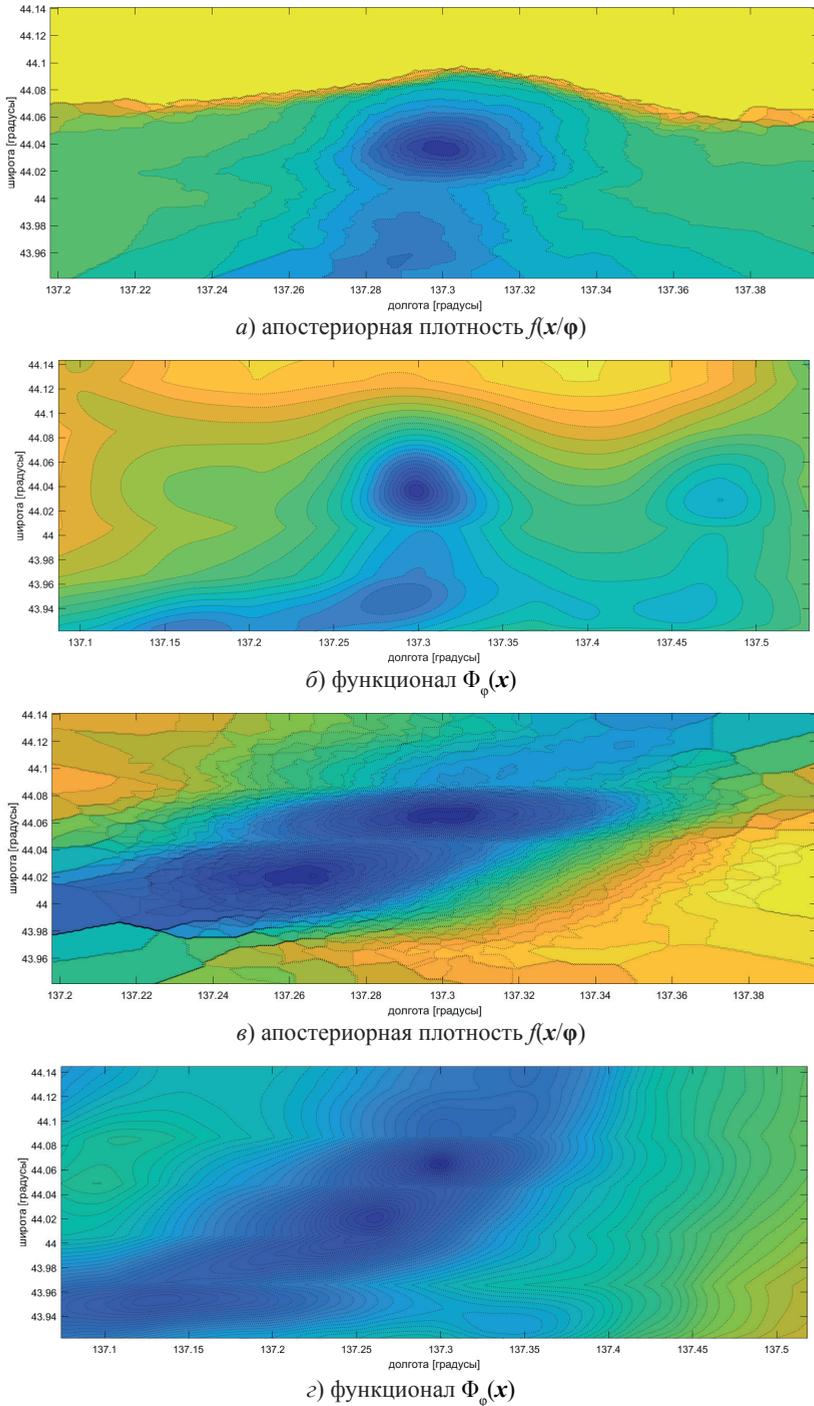


Рис. 4. Графики апостериорной плотности и функционала сопоставления для поля АСТ (а, б) и для поля ГМА (в, з)

Как было отмечено выше, трудоемкость метода (3), (4) определяется количеством  $N_\Phi$  узлов расчета функционала  $\Phi_\Phi(\mathbf{x})$ . Это количество в экспериментах составляло  $N_\Phi = 50000$ . Среднее время счета, затрачиваемое на одну коррекцию по предложенному алгоритму (3), (4), было примерно в 3 раза меньше времени счета по байесовскому методу (6)–(8), где использовалось  $N = 100000$  реализаций для приближенного расчета апостериорной плотности  $f(\mathbf{x}/\Phi)$ .

Для удобства анализа результатов вычислительного эксперимента векторная ошибка оценивания  $\delta = \mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}(\Phi)$  приводилась к скалярной величине – радиальной погрешности – по формуле

$$r(\delta) = \sqrt{\delta_{x_1}^2 + \delta_{x_2}^2}, \quad (10)$$

где  $\delta_{x_1}^2$  и  $\delta_{x_2}^2$  – квадраты координат вектора  $\delta$ .

Для сравнения с  $D_{max}$ -оценкой байесовская расчетная оценка точности алгоритма коррекции также приводилась к скалярной радиальной оценке:

$$r_B = \sqrt{P_{x_1x_1} + P_{x_2x_2}}, \quad (11)$$

где  $P_{x_1x_1}$  и  $P_{x_2x_2}$  – диагональные компоненты ковариационной матрицы.

В описываемом эксперименте для каждого из рассматриваемых геофизических полей и их комбинации на основе полученных результатов коррекций поисковым и байесовским методами вычислялись следующие усредненные характеристики, представленные ниже в табл. 1, 2:

- $\bar{\delta}_\Pi = \bar{r}(\tilde{\mathbf{x}}_\Pi(\Phi) - \mathbf{x}) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} r(\tilde{\mathbf{x}}_\Pi(\Phi_i) - \mathbf{x}_i)$  –

средняя действительная радиальная погрешность поискового алгоритма, где  $\tilde{\mathbf{x}}_\Pi(\Phi_i)$  – решение задачи (3) в  $i$ -м запуске,  $\mathbf{x}_i$  – истинное положение оцениваемого вектора в  $i$ -м запуске,  $r(\cdot)$  – описанное выше выражение (10);

- $\bar{\delta}_B = \bar{r}(\tilde{\mathbf{x}}_B(\Phi) - \mathbf{x}) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} r(\tilde{\mathbf{x}}_B(\Phi_i) - \mathbf{x}_i)$  –

средняя действительная радиальная ошибка байесовского алгоритма, где  $\tilde{\mathbf{x}}_B(\Phi_i)$  – байесовское решение (6) в  $i$ -м запуске,  $\mathbf{x}_i$  – истинное положение оцениваемого вектора в  $i$ -м запуске,  $r(\cdot)$  – описанное выше выражение (10);

- $\bar{\rho}_{max} = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \rho_{max,i}$  –

среднее значение оценки точности поискового алгоритма по методу (4), где  $\rho_{max,i}$  – радиальная  $D_{max}$ -оценка в  $i$ -м запуске;

- $\bar{r}_B = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} r_{B,i}$  –

средняя радиальная расчетная оценка точности (7) байесовского алгоритма, где  $r_{B,i}$  – радиальная расчетная оценка точности в  $i$ -м запуске вычисляется по формуле (11).

В табл. 1 приведены результаты методического эксперимента, в котором вектор погрешностей  $\xi$  формировался как гауссовский независимый вектор с плотностью  $f_{\xi}(\xi) = N(\xi; 0, \sigma_{\xi}^2 I)$ , где параметр СКО  $\sigma_{\xi}$  был выбран: для поля глубин моря  $\sigma_{\xi} = \sigma_{\text{ГМ}}$ , для поля АСТ  $\sigma_{\xi} = \sigma_{\text{АСТ}}$ , для поля ГМА  $\sigma_{\xi} = \sigma_{\text{ГМА}}$ , где  $\sigma_{\text{ГМ}}$ ,  $\sigma_{\text{АСТ}}$ ,  $\sigma_{\text{ГМА}}$  – приведенные выше (см. рис. 3) значения СКО поточечных разностей синтезированных и исходных карт.

Т а б л и ц а 1

**Результаты работы поискового и байесовского алгоритмов для отдельных полей и их комбинации в случае независимых гауссовских ошибок**

Усредненные оценки	Коррекция по полю глубин моря	Коррекция по полю АСТ	Коррекция по полю геомагнитных аномалий	Комплексная коррекция по трем полям
Действительная ошибка поискового алгоритма (2), $\bar{\delta}_{\text{П}}$ , м	174	511	1257	88
$D_{\text{max}}$ -оценка точности поискового алгоритма, $\bar{P}_{\text{max}}$ , м	225	752	1415	96
Действительная ошибка байесовского алгоритма (6), $\bar{\delta}_{\text{Б}}$ , м	171	341	800	83
Расчетная точность байесовского алгоритма, $\bar{T}_{\text{Б}}$ , м	206	466	1105	99

Из табл. 1 видно, что  $D_{\text{max}}$ -оценка в этом эксперименте близка к действительной средней погрешности поискового алгоритма. При близких средних действительных погрешностях  $D_{\text{max}}$ -оценка лишь незначительно уступает байесовским оценкам границы точности. Заметим также, что результат поискового алгоритма (3), (4) по точности ожидаемо уступает байесовскому методу (6)–(8).

Таким образом, можно сделать вывод, что если вектор ошибок  $\xi$  является независимым и гауссовским, то  $D_{\text{max}}$ -оценка точности (4) алгоритма (3) близка к байесовской расчетной оценке точности (7) аппроксимации (6) оптимального алгоритма для всех трех рассмотренных карт ГФП и их комбинации.

В табл. 2 приведены аналогичные данные эксперимента, в котором вектор  $\xi$  вычислялся как разность синтезированной и исходной карт (см. рис. 3). Байесовский алгоритм (6)–(8) не применялся для коррекции по карте поля глубин моря, поскольку в этом случае обнаружилась значительная статистическая зависимость соседних отсчетов (компонент) вектора погрешностей  $\xi$ , формируемого по разности синтезированной и исходной карт.

Из табл. 2 следует, что  $D_{\text{max}}$ -оценка точности (4) поискового (3) алгоритма и расчетная оценка точности байесовского алгоритма (6)–(8) в целом согласуются с их действительными погрешностями. Существенное увеличение во втором экспери-

менте погрешностей коррекции (табл. 2) по сравнению с результатами из табл. 1 объясняется значительно более сложной структурой погрешностей  $\xi$  и повышением их уровня. Это особенно заметно проявляется для поля глубин по указанной выше причине. Отметим также существенное повышение точности коррекции при комплексировании полей: для поля глубин моря на 13%, для поля АСТ на 27 % и для поля ГМА на 58%.

Таблица 2

**Результаты работы поискового и байесовского алгоритмов в случае формирования погрешностей как разности синтезированной и исходной карт**

Усредненные оценки	Коррекция по полю глубин моря	Коррекция по полю АСТ	Коррекция по полю геомагнитных аномалий	Комплексная коррекция
Действительная погрешность поискового алгоритма (2), $\bar{\delta}_П$ , м	676	815	1402	591*
$D_{\max}$ -оценка точности поискового алгоритма, $\bar{p}_{\max}$ , м	612	882	1680	736*
Действительная погрешность байесовского алгоритма (6), $\bar{\delta}_Б$ , м	–	844	1363	656**
Расчетная точность байесовского алгоритма, $\bar{T}_Б$ , м	–	866	1601	670**

*Примечание:* \* – результаты коррекции по картам трех полей; \*\* – результаты коррекции по картам двух полей – АСТ и АГМ.

### Заключение

Исследован предложенный ранее метод вычисления текущей характеристики точности поискового корреляционно-экстремального алгоритма решения задачи навигации по геофизическим полям, который в отличие от метода, используемого в байесовском алгоритме решения задачи навигации, не требует оценок условной апостериорной плотности распределения оцениваемого вектора и плотности распределения вектора погрешностей измерения.

Путем вычислительного эксперимента проведено сравнение предложенного способа построения текущей характеристики точности с методом, используемым в байесовском алгоритме и основанным на вычислении ковариационной матрицы. Показано, что предложенная оценка погрешностей коррекции с помощью (4) близка к действительной погрешности. Если вектор ошибок является независимым и гауссовским, то  $D_{\max}$ -оценка точности (4) алгоритма (3) хорошо приближает байесовскую расчетную оценку точности (7) аппроксимации (6) оптимального алгоритма для всех трех рассмотренных карт ГФП и их комбинации. В проведенных экспериментах среднее время счета предложенного алгоритма было примерно в 3 раза меньше, чем алгоритма (6)–(8).

Кроме того, из табл. 1 и 2 видно, что комплексирование измерений по трем полям существенно повышает точность коррекции.

Дальнейшие исследования будут направлены на более глубокое изучение вероятностных свойств  $D_{max}$ -оценки и обоснование выбора параметра  $r_p$  для более практичного применения предложенного метода.

Следует также отметить, что возможности измерительных систем геофизических полей, доступных для установки на подводных роботах, позволяют использовать их при картографировании ГФП и создании цифровых карт для решения задач подводной навигации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: «Наука», 1985. 328 с.
2. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1: Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация, 2015. № 3 (90). С. 102–125.
3. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. СПб: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
4. Nygren, I., *Terrain Navigation for Vehicles*, Dissertation, Sweden: Stockholm Royal Institute of Technology, 2005, 270 p.
5. Feder, H.J.S., Leonard, J.J., and Smith, C.M., Adaptive mobile robot navigation and mapping, *Int. J. of Robotics Research, Special Issue on Field and Service Robotics*, July 1999, vol. 18, no. 7, pp. 650–668.
6. Melo, J., Matos, A., Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles, *Ocean Engineering*, 2017, vol. 139, pp. 250–264.
7. Степанов О.А., Носов А.С. Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // Гироскопия и навигация, 2020. Т. 28. №2 (109). С. 70–90.
8. Джанджгава Г.И., Августов Л.И. Навигация по геополям. Научно-методические материалы. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2018. 296 с.
9. Августов Л.И., Сазонова Т.В. Контроль точности позиционных оценок в корреляционно-экстремальных навигационных системах // Авиакосмическое приборостроение, 2007. №2. С. 39–42.
10. Бердышев В.И., Костоусов, В.Б. Экстремальные задачи и модели навигации по геофизическим полям. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 270.
11. Киселев Л.В., Костоусов В.Б., Дунаевская К.В., Тарханов А.Е. Оценка ошибок корреляционно-экстремальной навигации по карте аномалий силы тяжести на основе траекторных измерений с борта автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2020. №1 (31). С. 13–20.
12. Kiselev, L.V., Kostousov, V.B., Medvedev, A.V., Tarkhanov, A.E., Dunaevskaya, K.V., Computational models of trajectory investigation of marine geophysical fields and its implementation for solving problems of map-aided navigation, *Advances in Systems Science and Applications*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 45–49. DOI: 10.25728/assa.2020.20.4.972. Published online at <https://ijassa.ipu.ru>.
13. Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И. и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / под общей ред. В.Г. Пешехонова; науч. редактор О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
14. Киселев Л.В., Костоусов В.Б., Медведев А.В., Тарханов А.Е. О гравиметрии с борта автономного подводного робота и оценках ее информативности для навигации по карте // Подводные исследования и робототехника. 2019. 1(27). С. 21–30.
15. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3 книгах. Книга 2. Изд. 2-е, перераб. и дополнен. М.: «Сов. радио», 1975. 392 с.
16. Киселев Л.В., Медведев А.В. Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траекторном обследовании аномальных физических полей // Подводные исследования и робототехника. 2011. №1 (11). С. 24–31.

17. Михайлов Д.Н., Сенин Р.Н., Дубровин Ф.С., Борейко А.А., Стыркул Р.И., Храмов О.А. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для гидрографических исследований в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2017. №2 (24). С. 4–13.
18. Коноплин А.Ю., Михайлов Д.Н., Щербатюк А.Ф. и др. Технология использования АНПА для исследования глубоководных экосистем Атлантического сектора Антарктики // Подводные исследования и робототехника. 2020. 2 (32). С. 13–21.
19. Степанов О.А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. 85 с.
20. EvoLogics S2C M Mini Modems [Электронный ресурс]. URL: 17.08.2017. [https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm\\_series.html](https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm_series.html) (дата обращения: 17.08.2017).
21. EvoLogics S2CR18/34 USBL Underwater Acoustic USBL System [Электронный ресурс]. URL: [https://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr\\_18\\_34\\_usbl.html](https://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr_18_34_usbl.html) (дата обращения: 20.01.2021).
22. Applanix POS MV V5 – Position and Orientation System for Marine Vessels [Электронный ресурс]. URL: <https://www.applanix.com/products/posmv.html> (дата обращения: 20.01.2021).
23. Parzen, E., On the estimation of a probability density function and mode, *Annals of Mathematical Statistics*, 1962, vol. 33, pp. 1065–1076.

---

**Dunaevskaya, K.V.** (Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia), **Kiselev, L.V.** (Institute of Marine Technology Problems, Far-Eastern Branch of RAS (FEBRAS), Vladivostok, Russia), and **Koustousov, V. B.** (Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of RAS)

Study of a Method for Calculating the Current Accuracy In Map-Aided Navigation Problem, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 1 (112), pp. 52–69.

**Abstract.** The paper studies a previously proposed method for calculating the current accuracy characteristics of a correlation-extreme search algorithm for solving the map-aided navigation problem. The proposed method is based on the analysis of the ratio of the extreme values of the functional used in the search algorithm for comparing the measured field fragment, and the fragments obtained from a reference map, and on determining the diameter of the set of the given level for this functional. The study is carried out using an example of three spatial geophysical fields: the sea depth field, the field of gravity anomalies, and the anomalous magnetic field; it is focused on their application for underwater vehicle navigation. The specific features of the information and measurement systems used in the survey of these fields, done by means of an underwater robot are described, as well as the procedure simulating the mapping process taking these features into account. The results of computer experiments on comparison of the proposed method for calculating the current accuracy and the method used in the Bayesian algorithm for solving the navigation problem are presented.

**Key words:** map-aided navigation, correlation-extreme search algorithm, current accuracy characteristics of correction, Bayesian estimation method, autonomous underwater vehicle, mapping, bathymetry, magnetometry, gravimetry.

Материал поступил 30.10.2020