

О. А. СТЕПАНОВ, А. С. НОСОВ

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО ДАННЫМ КАРТЫ И ИЗМЕРИТЕЛЯ, НЕ ТРЕБУЮЩИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛЯ ВДОЛЬ ПРОЙДЕННОЙ ТРАЕКТОРИИ

Предложен алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории. Алгоритм в полном объеме использует доступную измерительную информацию о поле и не предполагает введения его модели. Описана процедура анализа точности, используемая для оценки эффективности алгоритма. Рассмотрены особенности и достоинства предлагаемого алгоритма, которые проиллюстрированы на примере коррекции показаний морской навигационной системы по данным карты аномалии силы тяжести и измерениям гравиметра.

Ключевые слова: навигация по геофизическим полям, байесовский подход, оптимальный нелинейный алгоритм оценивания, предварительная обработка измерений, сравнительный анализ точности.

Введение

Навигационные системы (НС) со средствами коррекции по геофизическим полям, или так называемые корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС), широко применяются на подвижных объектах разных классов. При проведении коррекции в таких системах может быть использована информация о поле рельефа, гравитационном поле, оптических свойствах подстилающей поверхности и т.д., которая обычно представляется в виде цифровой карты [1–12]. Интерес к системам навигации по геофизическим полям в последнее время усиливается в связи с необходимостью поиска альтернативных по отношению к спутниковым системам и помехоустойчивых средств коррекции [13–21].

В зависимости от объема привлекаемой в каждый момент времени информации по сложившейся в отечественной литературе классификации КЭНС разделяются на три типа: КЭНС 1 – с измерением поля в точке, КЭНС 2 – с измерением поля одновременно в нескольких точках вдоль линии и КЭНС 3 – с измерением поля на плоскости в виде кадра [1]. Для проведения коррекции в КЭНС 1, о которых и пойдет речь в настоящей работе, необходимо перемещение объекта, для того чтобы сфор-

Степанов Олег Андреевич. Член-корреспондент РАН, доктор технических наук, начальник научно-образовательного центра, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург). Вице-президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Носов Алексей Сергеевич. Младший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

мировать измеренную вдоль траектории его движения реализацию поля. Коррекция при этом осуществляется путем выработки поправок к показаниям НС с помощью алгоритма, основанного на сопоставлении измеренной реализации поля и реализаций его значений, вычисляемых с использованием карты вдоль предполагаемых траекторий движения объекта [1–11]. При этом алгоритм выработки поправок может быть либо рекуррентным, либо нерекуррентным.

Рекуррентный алгоритм, как правило, применяется в тех случаях, когда поправки вырабатываются в режиме реального времени путем последовательной обработки измерений поля по мере их проведения вдоль траектории движения. Для нерекуррентного алгоритма характерно использование всего набора измерений, сформированного при прохождении траектории заданной протяженности. Как отмечается в [11], наиболее эффективные алгоритмы решения задачи коррекции основаны на использовании теории байесовского оценивания и получивших активное развитие методах нелинейной фильтрации [3–5, 7, 22–28]. Однако в силу нелинейного характера задачи коррекции возникают трудности в реализации такого рода алгоритмов, подверженных, как известно, «проклятию размерности» [24, 29]. Отмеченное обстоятельство и сохраняет интерес исследователей к построению упрощенных субоптимальных алгоритмов коррекции. Условно их можно разделить на две группы. Одна из них опирается на различного рода эвристические приемы, не связанные, как правило, с постановкой задачи в рамках байесовского подхода и не учитывающие накопленный при этом опыт ее решения [14, 30–32]. Другая, более перспективная – реализуется в рамках байесовского подхода, а упрощение алгоритмов достигается в том числе за счет упрощенного описания погрешностей измерительных средств [26].

Интуитивно понятно, что для повышения точности решения задачи коррекции необходимо наилучшим образом оценить значения поля вдоль всей пройденной траектории. Как правило, измеритель, вырабатывающий значения поля, уже содержит в своем составе блок предварительной обработки, направленный на снижение влияния различных составляющих погрешностей измерения с целью повышения точности оценивания значений поля в текущей точке траектории. Поскольку обычно информация об измеряемом параметре нужна потребителю в режиме реального времени, в этом блоке решается задача фильтрации, в которой используются только прошлые измерения. Вместе с тем значительно более высокая точность оценивания значений поля может быть достигнута в режиме постобработки с применением алгоритмов сглаживания, в которых используется весь набор измерений в каждой точке пройденной траектории [25, 28].

Таким образом, перед непосредственным сопоставлением реализаций нередко накопленные при движении объекта измерения подвергаются дополнительному обработке, направленной на повышение точности оценивания поля вдоль траектории. Это может быть сделано с учетом опыта решения задачи оценивания поля при его съемке, когда применяется весь набор накопленных измерений, а также алгоритмы сглаживания или различные их субоптимальные варианты [33, 34].

Заметим, что для построения эффективных алгоритмов как для режима сглаживания, так и для режима фильтрации необходимо задавать модели не только погрешностей, но и оцениваемого вдоль траектории поля. Здесь нетрудно усмотреть аналогию с традиционно решаемой задачей выделения полезного сигнала: в данном случае это реализация поля вдоль траектории на фоне погрешностей его измерения [35].

Следует заметить, что необходимость реализации режима сглаживания создает проблемы для построения рекуррентных алгоритмов и решения задачи коррекции в реальном времени. Вместе с тем наличие реализации с малыми погрешностями оценивания поля создает предпосылки для упомянутых выше упрощений алгоритма коррекции НС. Это достигается путем прореживания используемых при сопоставлении с картой значений поля, т.е. увеличения интервала между ними, сокращения их числа и, как следствие, возможности упрощения модели погрешностей оценок, учитываемых в алгоритме при сопоставлении значений поля с картой. Такая схема решения задачи коррекции, как показано в верхней части рис. 1, фактически является двухэтапной. На первом этапе осуществляется оценивание реализации поля вдоль пройденной траектории, а на втором эта реализация используется при сопоставлении с картой с целью оценивания погрешностей НС и выработки поправок к ее показаниям.

Из изложенного выше следует, что при реализации этой схемы требуется задание стохастических моделей поля, возникают трудности с решением задачи в реальном времени и, что самое главное, происходит потеря измерительной информации, что влечет за собой снижение точности решения задачи коррекции НС. Очевидно, что для устранения этого недостатка необходимо использовать весь набор измерений вдоль траектории движения. Вместе с тем следует иметь в виду, что это, в свою очередь, приведет к усложнению модели, описывающей погрешности измерения поля и, как следствие, к усложнению и алгоритма коррекции.

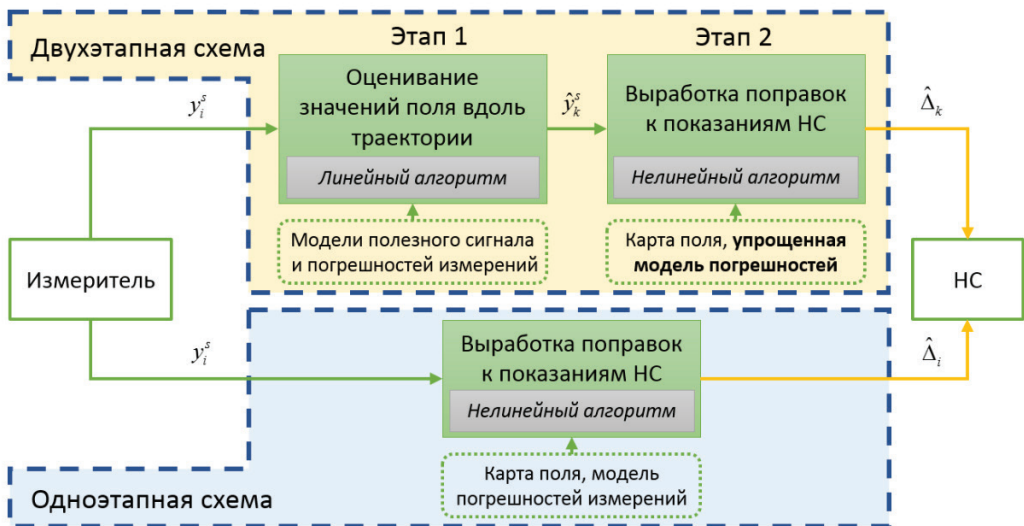


Рис. 1. Две схемы решения задачи коррекции НС: y_i^s – показания измерителя; \hat{y}_k^s – оценки значений поля; $\hat{\Delta}_k, \hat{\Delta}_i$ – оценки погрешностей НС, выработанные в различных схемах; $i = 1 \dots I$; $k = 1 \dots K$

Ограниченные возможности доступных ранее при реализации алгоритмов коррекции вычислительных средств не позволяли синтезировать такого рода алгоритмы. Однако в настоящее время возможности вычислительных средств существенно возросли, что и создает предпосылки для более адекватного решения задачи и разработки усовершенствованных алгоритмов. С этой целью в работе в рамках байесов-

ского подхода предлагается алгоритм коррекции НС по данным карты и измерителя НС, свободный от указанных выше недостатков, в котором не требуется задание модели поля, используются все исходные измерения и не предполагается их предварительная обработка, направленная на оценивание значений поля вдоль пройденной траектории. Более того, задача оценивания значений поля во время коррекции показаний НС вообще исключается из рассмотрения. Блок-схема, соответствующая этому варианту и называемая далее «одноэтапной», представлена в нижней части рис. 1.

В предлагаемой работе развиваются результаты, полученные при решении одномерной задачи для случая белозумной модели суммарных погрешностей карты и измерителя применительно к использованию поля рельефа [34]. Рассматривается двумерная задача оценивания координат для более сложного характера модели погрешностей. При этом исследование проводится применительно к случаю использования поля аномалий силы тяжести (АСТ), для которого вопрос необходимости предварительной обработки при реализации двухэтапной схемы стоит наиболее остро. Это объясняется тем, что методические погрешности, обусловленные вертикальными перемещениями объекта, на несколько порядков превышают АСТ и для получения их оценок разрабатываются специальные алгоритмы [28, 36–40].

Структура работы следующая. В первом разделе описываются постановка и общее решение задачи коррекции НС в рамках байесовского подхода, не предполагающая оценивание значений поля вдоль траектории движения. Во втором – более подробно рассматривается традиционная двухэтапная схема решения задачи коррекции. В третьем – описывается процедура анализа точности, основанная на вычислении статистических характеристик погрешностей навигационного решения. Четвертый раздел посвящен конкретизации предлагаемого алгоритма и двухэтапной схемы применительно к случаю использования поля АСТ. Здесь же описывается программа, с помощью которой выполнялось моделирование. В пятом разделе приводятся и сопоставляются результаты решения задачи коррекции НС по данным карты аномалии силы тяжести и измерениям гравиметра с использованием предложенного алгоритма и двухэтапной схемы. В ходе изложения обсуждаются особенности и достоинства предлагаемого алгоритма по сравнению с двухэтапной схемой решения задачи коррекции.

1. Постановка и общее решение задачи коррекции навигационной системы в рамках байесовского подхода

Следуя [11], сформулируем постановку задачи коррекции морской навигационной системы в рамках байесовской теории фильтрации. Будем полагать, что на борту подвижного объекта имеется НС, показания которой подлежат коррекции, карта и измеритель поля. Считаем, что измеритель поля и корректируемая НС вырабатывают показания в дискретные моменты времени t_i , отстоящие друг от друга на интервал Δt . В целях упрощения полагаем, что задача коррекции решается на плоскости. Таким образом, можем записать:

$$\mathbf{y}_i^{NS} = \mathbf{X}_i + \Delta_i, \quad (1)$$

$$y_i^s = \phi(\mathbf{X}_i) + \varepsilon_i^s + \varepsilon_i^m, \quad (2)$$

где $\mathbf{y}_i^{NS} = [y_1^{NS} \ y_2^{NS}]_i^T$ – показания НС; y_i^s – показания измерителя поля; ε_i^s – погрешности измерителя; $\phi(\bullet)$ – известная нелинейная функция (карта), описывающая зависимость поля от истинных координат объекта $\mathbf{X}_i = [X_1 \ X_2]_i^T$ с погрешностью ε_i^m и построенная по результатам предварительной съемки; $i = 1 \dots I$; s – sensor (измеритель), m – map (карта). В дальнейшем в целях упрощения считаем, что погрешности НС $\Delta_i = [\Delta_1 \ \Delta_2]_i^T$ неизменны за время проведения коррекции (время обсервации). Будем полагать, что вектор Δ и погрешности $\varepsilon_i^s, \varepsilon_i^m$ являются случайными с известными статистическими свойствами. В этом случае задача оценивания может решаться в рамках байесовского подхода [4, 11].

Для описания погрешностей ε_i^s и ε_i^m вдоль траектории введем марковские последовательности размерности l_s и l_m , которые могут быть представлены с помощью формирующих фильтров

$$\xi_i^\eta = F^\eta \xi_{i-1}^\eta + \Gamma^\eta w_{i-1}^\eta \tag{3}$$

таким образом, что погрешности можно выразить в виде $\varepsilon_i^\eta = H^\eta \xi_i^\eta + v_i^\eta$. В приведенном выражении $\eta = s, m$; F^η, Γ^η и H^η – известные матрицы; w_i^η, v_i^η – порождающие и измерительные центрированные дискретные белые шумы с известными матрицами ковариаций; размерности l_s и l_m зависят от свойств описываемых погрешностей.

С учетом соотношений (1), (3) измерения (2) представим в виде

$$y_i^s = \phi_i(\Delta) + H^s \xi_i^s + H^m \xi_i^m + v_i^s, \tag{4}$$

где $\phi_i(\Delta) \equiv \phi(\mathbf{y}_i^{NS} - \Delta)$, а компонента v_i^m отсутствует, так как предполагается, что карта не содержит белозумных погрешностей.

Принимая во внимание сделанные предположения, можно сформулировать задачу оценивания составного вектора $x_i = [\Delta^T \ (\xi_i^s)^T \ (\xi_i^m)^T]^T$ по измерениям (4), имея в виду при этом, что в задаче коррекции НС основной интерес представляет подвектор Δ .

Известно, что оптимальная в среднеквадратическом смысле оценка и матрица ковариаций ее погрешностей для вектора Δ в рамках байесовского подхода определяются следующими соотношениями [11]:

$$\hat{\Delta}(\mathbf{Y}_i) = \int \Delta p(\Delta / \mathbf{Y}_i) d\Delta, \tag{5}$$

$$P_\Delta(\mathbf{Y}_i) = \int (\Delta - \hat{\Delta}(\mathbf{Y}_i)) (\Delta - \hat{\Delta}(\mathbf{Y}_i))^T p(\Delta / \mathbf{Y}_i) d\Delta, \tag{6}$$

где $p(\Delta / \mathbf{Y}_i)$ – апостериорная, условная к набору измерений $\mathbf{Y}_i = [y_1^s, y_2^s, \dots, y_i^s]^T$ плотность распределения вероятности вектора Δ . В выражениях (5) и (6) интегралы понимаются как двукратные с бесконечными пределами. Помимо (6) при анализе точности вычисляется и безусловная матрица ковариаций погрешностей оценивания, определяемая как

$$G_{\Delta_i} = \iint (\Delta - \hat{\Delta}(\mathbf{Y}_i)) (\Delta - \hat{\Delta}(\mathbf{Y}_i))^T p(\Delta, \mathbf{Y}_i) d\Delta d\mathbf{Y}_i, \quad (7)$$

где $p(\Delta, \mathbf{Y}_i)$ – совместная плотность распределения Δ и \mathbf{Y}_i . Ее элементы, как известно, характеризуют потенциальную точность оценивания.

Применяемые для вычисления (5) и (6) алгоритмы порождены различными способами аппроксимации апостериорной плотности $p(\Delta / \mathbf{Y}_i)$ [11, 25]. Наиболее широкое применение здесь получила аппроксимация плотности в виде

$$p(\Delta / \mathbf{Y}_i) \approx \sum_{j=1}^L \mu_i^j \delta(\Delta - \Delta^j), \quad (8)$$

где $\Delta^j, j = \overline{1..L}$ – узлы сетки, задающие возможные значения Δ ; $\delta(\Delta - \Delta^j) = \delta(\Delta_1 - \Delta_1^j) \delta(\Delta_2 - \Delta_2^j)$ – двумерная дельта-функция; μ_i^j – веса, определяемые согласно выражению $\mu_i^j = p(\Delta^j / \mathbf{Y}_i) / \sum_{j=1}^L p(\Delta^j / \mathbf{Y}_i)$. Представление (8) порождает известные соотношения для вычисления (5) и (6):

$$\hat{\Delta}^{opt}(\mathbf{Y}_i) \approx \sum_{j=1}^L \mu_i^j \Delta^j, \quad (9)$$

$$P_{\Delta}^{opt}(\mathbf{Y}_i) \approx \sum_{j=1}^L \mu_i^j (\Delta^j (\Delta^j)^T) - \hat{\Delta}^{opt}(\mathbf{Y}_i) (\hat{\Delta}^{opt}(\mathbf{Y}_i))^T. \quad (10)$$

При стохастической процедуре формирования узлов алгоритмы, основанные на аппроксимации (8), получили название «методы Монте-Карло», или «фильтры частиц» (particle filters) [5, 25, 41]. В случае детерминированного задания векторов Δ^j соответствующие методы носят название «методов сеток» или «методов точечных масс (point mass method)» [22, 42]. Как показано в [23, 42, 43], их точность напрямую зависит от количества узлов L .

При вычислении весов в рассматриваемой задаче учитывается возможность представления апостериорной плотности составного вектора x_i в виде

$$p(x_i / \mathbf{Y}_i) = p(\Delta, \xi_i^s, \xi_i^m / \mathbf{Y}_i) = p(\xi_i^s, \xi_i^m / \Delta, \mathbf{Y}_i) p(\Delta / \mathbf{Y}_i), \quad (11)$$

где условная плотность $p(\xi_i^s, \xi_i^m / \Delta, \mathbf{Y}_i)$ при фиксации подвектора Δ и введенных предположениях будет гауссовской. Выражение (11) дает возможность построить вычислительно эффективные алгоритмы нахождения оптимальных оценок \hat{x}_i и их матриц ковариаций с использованием банка фильтров Калмана (ФК) размерности $1_s + 1_m$. Они обеспечивают решение задачи фильтрации подвектора $\left[\begin{matrix} \xi_i^s \\ \xi_i^m \end{matrix} \right]^T$ по измерениям вида [25, 26]

$$\tilde{y}_i^s = y_i^s - \phi_i(\Delta) = \varepsilon_i^s + \varepsilon_i^m. \quad (12)$$

Количество фильтров в банке определяется количеством узлов для значений Δ [22, 25].

Располагая частными оценками, выработанными в ФК, и соответствующими им матрицами ковариаций, получаем следующее рекуррентное соотношение для вычисления весов:

$$\mu_i^j = \exp \left\{ -\frac{1}{2 \sigma_{v^s}^2 + H^s P_{i/i-1}^{sj} H^{sT} + H^m P_{i/i-1}^{mj} H^{mT}} \left(\tilde{y}_i - H^s \hat{\xi}_{i/i-1}^{sj} - H^m \hat{\xi}_{i/i-1}^{mj} \right)^2 \right\} \mu_{i-1}^j, \mu_0^j = p(\Delta)^j, \quad (13)$$

где $\hat{\xi}_{i/i-1}^{sj}$, $\hat{\xi}_{i/i-1}^{mj}$ – прогнозы подвекторов ξ_i^s, ξ_i^m на i -й момент времени; $P_{i/i-1}^{sj}$, $P_{i/i-1}^{mj}$ – соответствующие им матрицы ковариаций, вырабатываемые в j -м фильтре Калмана; $\sigma_{v^s}^2$ – дисперсия дискретной белозумной погрешности измерителя; μ_0^j – априорные значения весов, соответствующие плотности $p(\Delta)$; $j = 1 \dots L$.

Анализ соотношений (8), (9) и (13) показывает, что алгоритм вычисления оценки имеет простой физический смысл: искомая оценка формируется путем взвешивания возможных значений Δ с весами, отражающими степень соответствия измеренных и вычисленных значений поля в точках предполагаемого местоположения объекта. В литературе прием построения алгоритмов с использованием представления (11) получил название метода аналитического интегрирования по части переменных или процедуры Rao–Blackwellization [22, 44].

Используя исходные измерения (4) с интервалом их поступления Δt , на основе приведенных соотношений (9), (10), (13) можно синтезировать оптимальный алгоритм коррекции НС, соответствующий принятой модели погрешностей измерителя и карты. Этот алгоритм сведется к решению нелинейной задачи оценивания постоянного вектора погрешностей НС на фоне аддитивных суммарных погрешностей карты и измерителя поля и к построению банка из L фильтров Калмана размерности $l_s + l_m$, обрабатывающих скалярные измерения с интервалом Δt . Важно подчеркнуть, что алгоритм является рекуррентным. Количество узлов L необходимо выбирать так, чтобы вычислительной погрешностью, связанной с заменой (5), (6) на (9), (10), можно было пренебречь. Вследствие этого реализация оптимального алгоритма при $l_s + l_m \gg 1$ требует значительных вычислительных ресурсов. Именно это обстоятельство и затрудняло до последнего времени построение оптимальных алгоритмов для систем коррекции по геофизическим полям и порождало необходимость их упрощения. Одна из таких процедур, как отмечалось во введении, основана на использовании двухэтапной схемы решения задачи коррекции, которую и обсудим более подробно в следующем разделе.

2. Двухэтапная схема решения задачи коррекции

Как следует из введения и рис. 1, упрощенная реализация нелинейного алгоритма выработки поправок к показаниям НС, как правило, предполагает наличие блока предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории, позволяющего снизить погрешности измерений. Обсудим более подробно, каким образом производится такое оценивание, а затем проиллюстрируем упрощения, которые оно позволяет сделать. При этом в целях конкретизации будем считать, что предварительная обработка осуществляется на основе стохастического подхода с использованием линейных калмановских алгоритмов.

При решении задачи предварительного оценивания аналогично тому, как это делается при съемке поля для его картографирования, измерения представляются в виде суммы полезного сигнала – значений поля вдоль траектории g_i и погрешностей измерений

$$y_i^s = g_i + \varepsilon_i^s. \quad (14)$$

Карта на этапе предварительной обработки измерений не используется, поэтому ее погрешности в выражении (14) отсутствуют. Вместо этого для построения алгоритма оценивания значений поля вводится предположение о том, что выборка g_i представляет собой значения некоторого случайного процесса или последовательности с известными стохастическими свойствами. Затем решается линейная задача ее оценивания по измерениям (14).

Задавая соответствующие стохастические модели для полезного сигнала и погрешностей измерений, эту задачу в реальном времени, для которого характерно использование только прошлых измерений, можно легко решить с помощью алгоритмов калмановской фильтрации [45]. Для достижения более высоких точностей могут быть использованы сглаживающие фильтры, в которых при выработке оценки значений поля используется весь набор полученных при обсервации измерений [25, 28, 35, 38, 40, 46–49]. При этом следует учитывать, что процедура сглаживания реализуется в режиме постобработки, то есть при получении очередного измерения все предыдущие оценки значений поля уточняются. Забегая вперед, отметим, что это с очевидностью препятствует рекуррентному решению задачи выработки поправок к показаниям НС с использованием сглаженных оценок поля в реальном времени.

Размерность оцениваемого вектора состояний, а следовательно, и размерность ФК или сглаживающего фильтра будет определяться теми моделями, которые применяются для описания полезного сигнала и погрешностей измерений. В общем случае, если размерность вектора состояния, используемого для описания погрешностей измерений равна l_s , а полезного сигнала – l_g , то размерность оцениваемого вектора состояния будет равна $l_s + l_g$.

В некоторых случаях вместо алгоритмов калмановской фильтрации используются стационарные фильтры, при построении которых задание модели для полезного сигнала заменяется выбором структуры фильтра и его параметров. Задача сглаживания при этом также решается в режиме постобработки путем использования этого фильтра в прямом и обратном времени [28, 40, 48, 50].

Поскольку предварительное оценивание значений поля позволяет существенно снизить уровень измерительных погрешностей, создаются предпосылки для сокращения числа измерений, используемых для выработки поправок к показаниям НС (оценивания Δ). Обычно это делается за счет увеличения интервала между оценками значений поля, полученными на первом этапе, путем выбора некоторого интервала времени $\Delta \tilde{t} \gg \Delta t$, кратного интервалу Δt , т.е. осуществляется «прореживание» сформированных оценок. После проведения предварительной обработки исходных измерений и их прореживания измерения, используемые для выработки поправок, можно записать в виде, аналогичном (4):

$$\hat{y}_k = \phi_k(\Delta) + \vartheta_k + \varepsilon_k^m, \quad (15)$$

где ϑ_k – погрешность оценок значений поля, соответствующая решению задачи фильтрации или сглаживания, $k = 1 \dots K$.

Обычно интервал между измерениями выбирают таким образом, чтобы коррелированную погрешность $\vartheta_k + \varepsilon_k^m$ можно было аппроксимировать суммой дискретного белого шума с дисперсией $\sigma_{n_k}^2$ и постоянной составляющей с дисперсией σ_c^2 . В этом случае для синтеза нелинейного алгоритма выработки поправок используется модель измерений

$$\hat{y}_k \approx \phi_k(\Delta) + c + n_k, \quad (16)$$

а рекуррентное представление для весов конкретизируется к виду

$$\mu_k^j = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(\tilde{y}_k - \hat{c}_{k/k-1}^{sj})^2}{\sigma_{n_k}^2 + P_{k/k-1}^{cj}} \right\} \mu_{k-1}^j, \mu_0^j = p(\Delta)^j, j = \overline{1 \dots L}, \quad (17)$$

где $\tilde{y}_k = \hat{y}_k - \phi_k(\Delta)$ – прореженные измерения, аналогичные (12); $\hat{c}_{k/k-1}^{sj}$ – прогноз систематической погрешности измерителя поля на k -й момент времени; $P_{k/k-1}^{cj}$ – соответствующая ему дисперсия. Очевидно, что (17) в общем случае значительно проще выражения (13), что и обуславливает упрощения нелинейного алгоритма в двухэтапной схеме решения задачи коррекции.

Таким образом, реализация двухэтапной схемы в рамках байесовского подхода на первом этапе сводится к предварительному решению задач фильтрации или сглаживания с использованием скалярных измерений, поступающих с интервалом Δt , по которым оценивается вектор состояния размерности $l_s + l_g$. На втором этапе, так же как и в оптимальном алгоритме, решается нелинейная задача оценивания постоянного вектора погрешностей НС в предположении упрощенного описания погрешностей карты и измерителя. При этом реализуется банк из L одномерных фильтров Калмана, обрабатывающих скалярные измерения с интервалом $\Delta \tilde{t}$, значительно большим соответствующего интервала Δt в оптимальном алгоритме: $\Delta \tilde{t} \gg \Delta t$. Сокращение объема вычислений происходит за счет снижения размерности ФК и сокращения числа измерений, используемых при сопоставлении с данными карты.

3. Процедура анализа точности коррекции навигационной системы

При анализе точности решения задачи коррекции будем применять условную (6) и безусловную (7) матрицы ковариаций, характеризующие точность для конкретных реализаций случайных величин и в среднем для используемого участка карты соответственно. Безусловную матрицу ковариаций (7) будем вычислять путем моделирования с помощью метода статистических испытаний двумя способами [35]:

- с использованием реализаций погрешностей оценок, вырабатываемых в алгоритмах:

$$\hat{G}_{\Delta u} \approx \frac{1}{M} \sum_{q=1}^M \left(\Delta^{(q)} - \hat{\Delta}^{(q)}(\mathbf{Y}_u^{(q)}) \right) \left(\Delta^{(q)} - \hat{\Delta}^{(q)}(\mathbf{Y}_u^{(q)}) \right)^T; \quad (18)$$

- путем усреднения расчетных матриц ковариаций, вырабатываемых в алгоритмах:

$$\tilde{G}_{\Delta u} \approx \frac{1}{M} \sum_{q=1}^M P_{\Lambda} \left(\mathbf{Y}_u^{(q)} \right). \quad (19)$$

В выражениях (18), (19) M – количество статистических испытаний; $\Lambda^{(q)}$, $\hat{\Lambda}^{(q)}$ – истинные значения погрешностей НС и их оценки, соответствующие q -й реализации набора измерений $\mathbf{Y}_u^{(j)}$; $P_{\Lambda} \left(\mathbf{Y}_u^{(j)} \right)$ – расчетная условная матрица ковариаций; индекс $u = i, k$ отражает зависимость оценок и матриц ковариаций от числа измерений, для которых они рассчитываются при использовании одноэтапной и двухэтапной схем обработки. Близость $\hat{G}_{\Delta u}$ и $\tilde{G}_{\Delta u}$ позволяет судить о непротиворечивости получаемых результатов [35].

Используя расчетные и действительные значения матриц ковариаций и вводя предположение о гауссовском характере погрешностей вырабатываемых оценок, можем рассчитывать параметры среднеквадратических и предельных эллипсов, соответствующих вероятностям попадания в них реализации погрешностей вырабатываемых оценок, равным 0,997.

Поскольку для исследуемой задачи апостериорная плотность может принимать негауссовский и в некоторых случаях многоэкстремальный характер, при анализе работы оптимального алгоритма для конкретных реализаций, помимо вычисления эллипсов, целесообразно анализировать и поведение апостериорной плотности путем построения соответствующих графиков, которые могут быть получены с использованием (8).

Заметим, что, подставляя в соотношение (18) результаты решения, полученные с помощью некоторого субоптимального алгоритма, можно сопоставлять достигаемые с его помощью точности с потенциальными точностями, достигаемыми оптимальным алгоритмом, и таким образом оценивать эффективность алгоритма.

4. Пример решения задачи коррекции навигационной системы с использованием поля аномалии силы тяжести

Конкретизируем описанные алгоритмы для двух рассмотренных схем их построения (см. рис. 1) применительно к задаче коррекции НС морского объекта с использованием поля АСТ, значения которого измеряются с помощью относительного гравиметра.

Одноэтапная схема

Опишем сначала одноэтапную схему, на вход которой поступают все исходные измерения гравиметра на частоте его работы с интервалом Δt .

Будем считать, что погрешность гравиметра ϵ_i^g содержит следующие составляющие:

- коррелированную методическую погрешность, обусловленную вертикальными перемещениями, связанными с морским волнением;
- систематическую погрешность, обусловленную неточностью определения смещения нуля-пункта;
- белому шуму погрешность.

Погрешность карты ε_i^m , в свою очередь, представлена коррелированными составляющими, вызванными неточностями съемки и интерполяции значений поля.

В целях упрощения положим, что остальные погрешности, в том числе погрешность определения поправки Этвеша, известны точно, а морской объект во время проведения коррекции НС движется равномерно и прямолинейно. Расширенную модель погрешностей относительного гравиметра можно найти, например, в [28, 51, 52], а углубленный анализ погрешностей карты и соответствующие методы их идентификации – в [53, 54].

Данные предположения позволяют описать погрешности гравиметра ε_i^s и карты ε_i^m моделями (20) и (21) соответственно. Для удобства представления запишем их здесь в непрерывном виде, имея в виду, что для реализации алгоритмов используются их дискретные аналоги:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1^s = \xi_2^s, \\ \dot{\xi}_2^s = \xi_3^s, \\ \dot{\xi}_3^s = -a_3 \xi_1^s - a_2 \xi_2^s - a_1 \xi_3^s + q_s w_s, \\ \dot{\xi}_4^s = 0, \end{cases} \quad (20)$$

$$\varepsilon_i^s = \xi_3^s(t_i) + \xi_4^s(t_i) + v_i^s,$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1^m = \xi_2^m, \\ \dot{\xi}_2^m = -\omega^2 \xi_1^m - 2\alpha \xi_2^m + q_m w_m, \end{cases} \quad (21)$$

$$\varepsilon_i^m = \xi_1^m(t_i).$$

Компоненты $\xi_1^s - \xi_3^s$ описывают модель вертикальных перемещений ξ_1^s , порождающих вертикальные ускорения ξ_3^s . Они трактуются как методическая составляющая погрешности измерителя. Компонента ξ_4^s описывает систематическую погрешность гравиметра. Составляющие ξ_1^m, ξ_2^m модели (21) представляют коррелированные вдоль траектории погрешности карты, задаваемые в данном случае узкополосным марковским процессом второго порядка. В выражениях (20), (21) $a_3 = (\lambda^2 + \mu^2)\gamma$; $a_2 = \lambda^2 + \mu^2 + 2\mu\gamma$; $a_1 = 2\mu + \gamma$; $q_s = \sigma_s \sqrt{2a_3(a_1 a_2 - a_3) / a_1}$; w_s, w_m – порождающие белые шумы единичной интенсивности; σ_s – среднеквадратическое значение вертикальных перемещений ξ_1^s ; λ – преобладающая частота качки; μ – коэффициент нерегулярности волнения; γ – безразмерный коэффициент; $\omega = \sqrt{(\alpha^2 + \chi^2)}$ – преобладающая частота погрешностей карты во временной области; α, χ – параметры дифференцируемого марковского процесса второго порядка; $q_m = 2\sigma_m \sqrt{\alpha\omega}$; σ_m – среднеквадратическая погрешность карты; v_i^s – дискретная белозумная погрешность измерений. Дисперсия систематической погрешности гравиметра ξ_4^s полагается известной и равной σ_c^2 .

Параметры модели вертикальных перемещений ξ_1^s задаются непосредственно во временной области. Их значения могут быть получены на основе анализа типичных погодных условий акватории, динамики судна или по итогам обработки реальных данных морских гравиметрических съемок.

Параметры процесса, описывающего погрешности карты ξ_1^m , по итогам решения задачи идентификации, как правило, выражаются в виде корреляционной функции в пространственной области. Эквивалентное временное представление легко получить, с помощью средней скорости движения объекта с использованием соотношений $\tau = \rho_m / \bar{V}$, $\chi = 2\pi/\tau$, $\alpha = 1/3\tau$, где ρ_m – пространственный период погрешностей карты в метрах, \bar{V} – средняя скорость движения в м/с.

Из сказанного следует, что для реализации оптимального алгоритма, использующего модели (20), (21), необходим банк из L шестимерных ФК, работающих на частоте поступления измерений (12), с помощью которого и отыскиваются оптимальная оценка (9) и соответствующая ей матрица ковариаций погрешностей (10).

Двухэтапная схема

Конкретизируем теперь двухэтапную схему. Для выполнения предварительной обработки с целью оценивания значений АСТ, представляющих собой полезный сигнал g_i , следуя [28, 55], будем использовать традиционно применяемую модель Джордана. Полагая, что в измерениях присутствуют систематическая составляющая ξ_4^s и методическая погрешность ξ_3^s , порожденная вертикальными перемещениями, можем записать следующие уравнения для вектора состояния и измерений:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1^s = \xi_2^s, \\ \dot{\xi}_2^s = \xi_3^s, \\ \dot{\xi}_3^s = -a_3 \xi_1^s - a_2 \xi_2^s - a_1 \xi_3^s + q_s w_s, \\ \dot{\xi}_4^s = 0, \\ \xi_1^g = -\beta \xi_1^g + \xi_2^g, \\ \xi_2^g = -\beta \xi_2^g + \xi_3^g, \\ \xi_3^g = -\beta \xi_3^g + q_g w_g, \end{cases} \quad (22)$$

$$y_i^s = -\beta \zeta \xi_1^g(t_i) + \xi_2^g(t_i) + \xi_3^s(t_i) + \xi_4^s(t_i) + v_i^s. \quad (23)$$

С использованием (22) выражение для АСТ представимо в виде $g = -\beta \zeta \xi_1^g + \xi_2^g$; $\beta = \bar{V} \sigma_{\delta g} / \sqrt{2} \sigma_g$; $\sigma_{\delta g}$ – параметр, определяющий пространственную изменчивость АСТ вдоль траектории; $q_g w$ – порождающий белый шум интенсивности $q_g^2 = 10\beta^3 \sigma_g^2$; σ_g^2 – дисперсия АСТ; $\zeta = (\sqrt{5} - 1) / \sqrt{5}$ – безразмерный коэффициент.

Предварительная обработка измерений (23) на первом этапе двухэтапной схемы будет выполнена в двух режимах. В режиме фильтрации она сведется к реализации единственного ФК для 7-мерного вектора состояния модели (22), обеспечивающего получение в реальном времени оценки всех его компонент, в том числе оценки АСТ. В режиме сглаживания, обеспечивающем более высокую точность оценивания АСТ, будет использоваться сглаживающий фильтр RTS [25, 28], вырабатывающий оценку в режиме постобработки.

После выполнения предварительной обработки измерения прореживаются, затем реализуется второй блок двухэтапной схемы, который по своей структуре, как уже отмечалось, в принципе не отличается от описанного выше блока выработки поправок в оптимальном алгоритме. При этом для получения искомым оценок (9) и расчетных матриц ковариаций (10) их погрешностей необходимо использовать банк одномерных ФК, обрабатывающих прореженные измерения (15) с интервалом $\Delta \tilde{t}$.

5. Результаты предсказательного моделирования

Для апробации предложенного алгоритма была разработана процедура моделирования и соответствующая ей программа, содержащая следующие этапы:

- 1) моделирование карты поля, выбор траектории, используемой при коррекции НС, и формирование истинных значений АСТ вдоль траектории;
- 2) формирование реализаций погрешностей НС, карты и измерителя;
- 3) формирование показаний НС и измерений поля как суммы истинных значений и погрешностей;
- 4) решение задачи коррекции с использованием сформированных значений и описанных алгоритмов, т.е. вычисление оценки и условной матрицы ковариаций;
- 5) вычисление расчетных и действительных безусловных матриц ковариаций путем многократного решения задачи коррекции (повторение п. 2–4), нахождение эллипсов погрешностей.

Рассмотрим пример расчетов, полученных с использованием этой программы.

Для формирования поля АСТ на навигационном полигоне предполагалось, что оно представляет собой сумму трех случайных изотропных полей, моделирующих длинно-, средне- и короткопериодные вариации АСТ с интервалами корреляции ℓ_f 30, 10 и 2 км соответственно и гауссовской корреляционной функцией $k_f(\rho) = \sigma_f^2 \exp\left(-0.25\pi \cdot (\rho/\ell_f)^2\right)$, где ρ – интервал в километрах; σ_f^2 – дисперсии соответствующего поля; $f = 1, 2, 3$. Для их моделирования использовался программный пакет GsTools, разработанный для синтеза и анализа геоданных [56]. Изолинии поля, полученного путем моделирования с дискретностью 500 м, изображены в левой части рис. 2. Там же представлена истинная траектория с указанным направлением движения, вдоль которой моделировались измерения. Профиль АСТ вдоль истинной траектории, а также оценки АСТ на нем и их статистические характеристики точности, полученные на этапе предварительной обработки в двухэтапной схеме, показаны в правой части рис. 2.

Следует отметить, что истинная траектория выбиралась произвольным образом, без учета особенностей карты. Более тщательный ее выбор, основанный, например, на анализе навигационной информативности, может улучшить получаемые результаты [28, 57].

Опишем кратко характеристики полученного навигационного полигона. Синтезированное поле АСТ можно считать среднерасчлененным: изолинии изменяют свое направление в нескольких областях карты. Среднее значение модуля градиента на полигоне составило 1,1 мГал/км, а максимальное не превосходит 2,8 мГал/км. Значения модуля производной по оси OX_2 превышают аналогичные значения по оси OX_1 как в среднем, так и по максимальным величинам: 0,9 мГал/км и 2,8 мГал/км против 0,5 мГал/км и 1,8 мГал/км соответственно. Такое соотношение позволяет ожидать большую эффективность уточнения компоненты координат X_2 .

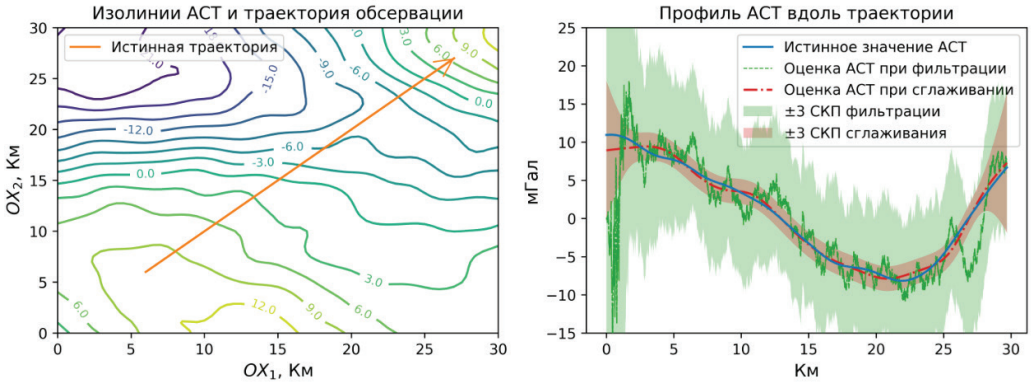


Рис. 2. Изолинии АСТ и истинная траектория наблюдения (слева); значения АСТ вдоль истинной траектории и их оценки (справа)

Далее были промоделированы погрешности НС, карты и измерителя. Погрешности НС формировались как реализации случайного двумерного центрированного гауссовского вектора с диагональной матрицей ковариаций и среднеквадратическим отклонением по каждой из компонент 1000 м.

Погрешности карты навигационного полигона по аналогии со значениями АСТ моделировались как изотропное случайное поле с помощью пакета GsTools. Корреляционная функция и интервал при этом были выбраны таким образом, чтобы статистические свойства реализаций поля вдоль прямолинейной траектории были согласованы с моделью погрешностей (21).

Сводные параметры моделирования, в том числе конкретизирующие модели (20), (21), и среднеквадратические погрешности (СКП) используемых средств представлены в таблице. На рис. 3 показаны примеры реализаций погрешностей карты и измерителя. Следует обратить внимание, что уровень вертикальных ускорений на четыре порядка превышает уровень полезного сигнала, то есть АСТ. Это выражается в наличии коэффициента 10^5 для значений по оси ординат, указанных на правом графике.

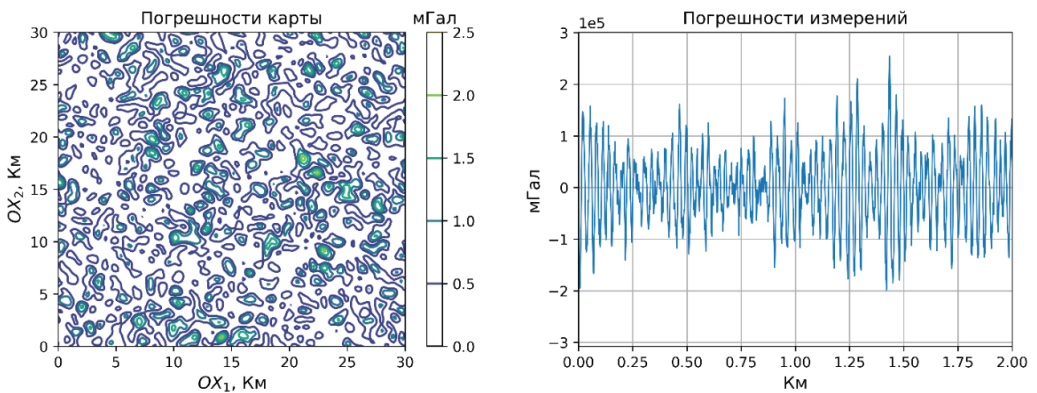


Рис. 3. Слева: реализация погрешностей карты (абсолютные значения); справа: реализация погрешностей измерений поля на интервале 0–2 км

Параметры моделирования

Параметр	Обозначение	Значение
Интервал дискретизации	Δt	0,1 с
Априорные СКП выработки координат НС	$\sigma_{\Delta_1}, \sigma_{\Delta_2}$	1000 м
Скорость движения вдоль траектории	V	10 м/с
Среднее квадратическое вертикальных перемещений	σ_v	0,3 м
Преобладающая частота качки	λ	$2\pi/3$ рад/с
Коэффициент нерегулярности волнения	μ	0,1 рад/с
Систематическая СКП измерителя	σ_c	2 мГал
Белшумная СКП измерителя	σ_{v^s}	0,5 мГал
Преобладающий период погрешности карты	ρ_m	2,5 км
СКП карты	σ_m	0,6 мГал
Интервал прореживания в двухэтапной схеме		500 м
Длина истинной траектории		29,7 км

В соответствии с описанной выше процедурой были получены реализации показаний НС и измерений гравиметра, из совокупности которых был сформирован пучок траекторий, параллельных истинной и лежащих в ее окрестности.

Результат решения задачи для одноэтапной схемы для одной из реализаций показан на рис. 4. В его левой части изображены: траектория, соответствующая показаниям НС, подлежащей коррекции (синий цвет); истинная траектория объекта (оранжевый цвет); траектория, полученная в ходе решения задачи коррекции (зеленый цвет); предельные условные эллипсы погрешностей (красная пунктирная линия), рассчитанные на основе расчетных матриц ковариаций (10); точки соответствующих цветов – условные положения на каждой из траекторий в дискретные моменты времени, для которых рассчитаны эллипсы погрешностей. В правой части рисунка показаны изолинии апостериорной плотности и соответствующие им предельные эллипсы погрешностей для четырех моментов времени. Более темные области соответствуют большим значениям плотности. Координаты на этих графиках представлены в пространстве погрешностей НС, значения указаны в км. Соответствия между правой и левой частями рис. 4 показаны красными цифрами. Движение начинается из левого нижнего угла рисунка.

Из примера видно, что оптимальный алгоритм, реализованный в одноэтапной схеме, позволяет успешно решить задачу коррекции НС в рассматриваемых условиях: оценка местоположения, полученная по итогам работы алгоритма, сходится к истинному значению. Расчетная оценка точности при этом адекватно характеризует качество работы алгоритма: для всех представленных эллипсов истинное местоположение лежит внутри соответствующего расчетного эллипса погрешностей.

Ориентация и размеры полуосей эллипсов согласованы с характером поля на участке, на котором решается задача. Так, эллипсы сначала вытягиваются вдоль изолиний поля, а при пересечении объектом участка поля с другим направлением изолиний – резко сжимаются.

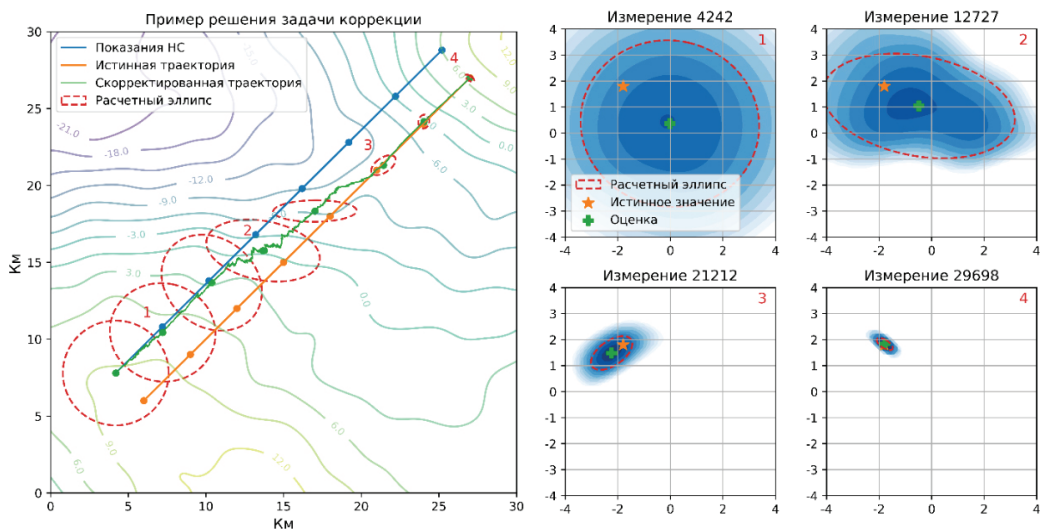


Рис. 4. Пример решения задачи коррекции для одной реализации в одноэтапной схеме (слева); графики апостериорной плотности для различного числа измерений (справа)

Анализ поведения плотности распределения погрешностей НС в рассматриваемом примере показывает, что ее график, гауссовский в начальный момент времени, меняется незначительно вплоть до прохождения 5-6 км наблюдательного галса (5-6 тысяч измерений). Это объясняется переходными процессами, связанными с текущей оценкой вертикальных перемещений, погрешностей карты и систематической погрешности гравиметра в банке ФК. Существенного уточнения погрешностей НС на этом этапе не происходит. Начиная с 11-12 км обсервации (11-12 тысяч измерений) становится заметен негауссовский, хотя и близкий к нему вид апостериорной плотности, показанный на рис. 4, график 2 справа. В ходе решения задачи апостериорная плотность постепенно нормализуется и область, где ее значения отличны от нуля, уменьшается. Заметно, что графики плотности хорошо согласованы с предельными эллипсами погрешностей, также представленными на рисунке.

Результаты решения задачи коррекции, полученные для одноэтапной схемы согласно п. 5 в режиме статистических испытаний, то есть расчета матриц (18), (19) и соответствующих им эллипсов, представлены на рис. 5. Для их вычисления было выполнено 100 запусков алгоритма. Слева на рисунке синим цветом обозначена истинная траектория; фиолетовым – оценки местоположения, выработанные для различных реализаций погрешностей; желтым – действительные безусловные эллипсы, соответствующие матрице (18), зеленым – расчетные безусловные эллипсы, соответствующие матрице (19). Справа сверху ярким цветом показаны размеры больших полуосей соответствующего эллипса, полупрозрачным – размеры малых полуосей. Внизу изображены углы поворота действительного и расчетного эллипсов соответственно. Цифрами отмечено соответствие между рисунками.

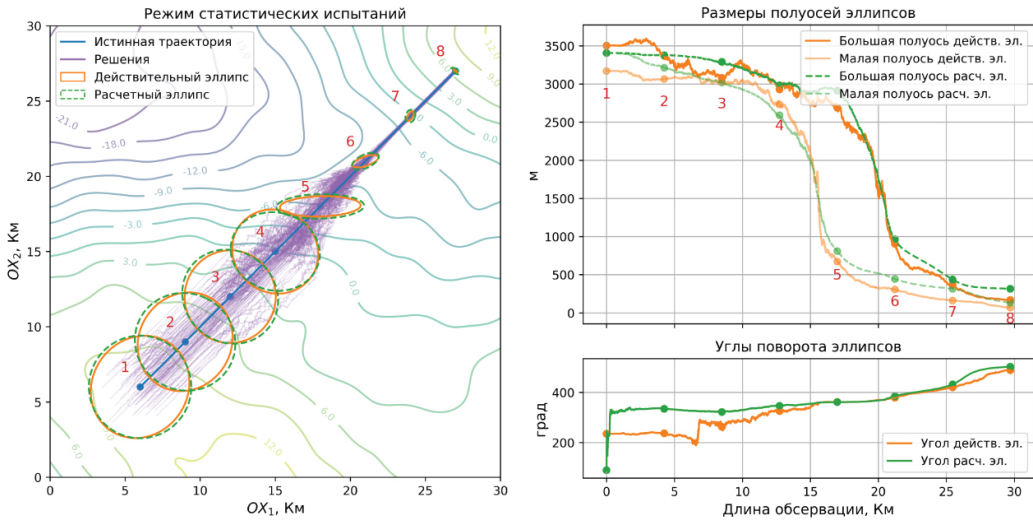


Рис. 5. Пример решения задачи коррекции для одноэтапной схемы в режиме статистических испытаний

Из представленных результатов видно, что расчетные и действительные безусловные характеристики точности исследуемого оптимального алгоритма близки между собой. Различные реализации оценок местоположения, показанные слева на рис. 5, находятся в пределах соответствующих эллипсов, что подтверждает корректность работы алгоритма.

Результаты расчетов для двухэтапной схемы для той же самой истинной траектории приведены на рис. 6. Предварительная обработка, как отмечалось выше, выполнялась в режимах фильтрации и сглаживания с использованием оптимальных калмановских алгоритмов [28, 34, 49]. Интервал между измерениями, полученными из оценок АСТ и используемыми на втором этапе, принимался равным дискретности представления карты АСТ (500 м). На рис. 6 приведены значения большой и малой полуосей действительных предельных эллипсов погрешностей для оптимального и двухэтапного алгоритмов.

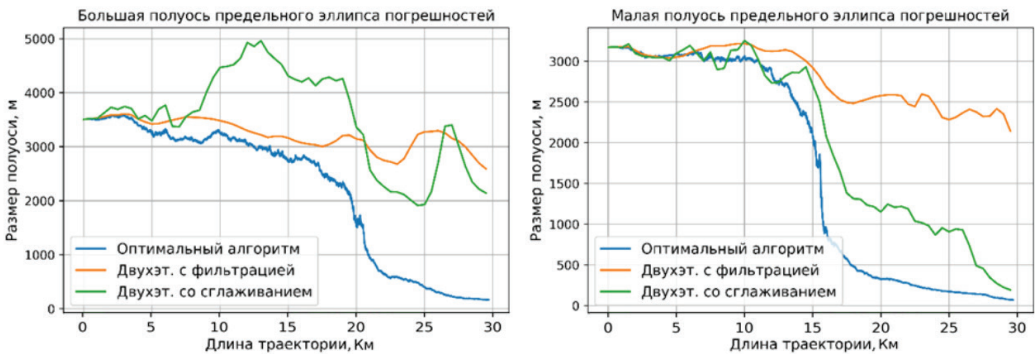


Рис. 6. Сопоставление предлагаемого алгоритма и двухэтапной схемы решения задачи коррекции

Представленные предварительные результаты сопоставления с очевидностью иллюстрируют заметный выигрыш в точности при использовании предлагаемого алгоритма. При этом двухэтапная схема показывает вполне ожидаемые худшие результаты для режима фильтрации. Они обусловлены большим уровнем погрешностей предварительной обработки, который порожден в том числе наличием фазового запаздывания в оценках, вырабатываемых фильтром в реальном времени. Наличие выбросов на графике, соответствующем двухэтапной схеме с предварительным сглаживанием, обусловлено многоэкстремальным характером апостериорной плотности.

Разработанная программа может быть использована для предсказательного моделирования, направленного на расчет потенциальной точности, соответствующей оптимальному алгоритму, в зависимости от различных условий: специфики используемого поля, уровня вертикальных возмущений, уровня и свойств погрешностей карты, скорости движения объекта и ряда других. Кроме того, эта же программа может быть использована и для анализа эффективности применения различных субоптимальных алгоритмов, включая описанную здесь двухэтапную схему коррекции.

В заключение отметим, что результаты натуральных экспериментов подтвердили выводы, полученные по итогам предсказательного моделирования.

Заключение

Основные результаты работы можно кратко сформулировать следующим образом.

В рамках байесовского подхода предложены одноэтапная схема коррекции показаний навигационной системы по данным карты и измерителя геофизического поля и реализующий ее оптимальный рекуррентный алгоритм. Он не требует предварительной обработки измерений для получения оценок значений поля и направлен на решение нелинейной задачи оценивания постоянного вектора погрешностей НС на фоне аддитивных помех, порожденных суммарными погрешностями карты и измерителя поля.

Проанализированы особенности традиционной двухэтапной схемы решения задачи коррекции, в которой на первом этапе осуществляется предварительная обработка измерений, а на втором – решение нелинейной задачи оценивания постоянного вектора погрешностей НС в предположении упрощенного описания погрешностей карты и измерителя.

Предложенный в рамках одноэтапной схемы алгоритм конкретизирован для случая коррекции морской навигационной системы с использованием поля аномалии силы тяжести. Применительно к решению этой задачи разработана программа, реализующая оптимальный алгоритм и позволяющая осуществлять предсказательное моделирование, направленное на расчет потенциальной точности выработки поправок. Она также обеспечивает возможность анализировать эффективность применения различных субоптимальных схем, что и проиллюстрировано для двухэтапной схемы коррекции. С ее использованием на конкретном примере показаны преимущества одноэтапной схемы в части достигаемой точности решения задачи коррекции НС по полю АСТ.

Дальнейшие исследования предполагается направить на углубленный анализ влияния различных факторов, включая погрешности карты, на потенциальную точ-

ность, достигаемую с помощью оптимального алгоритма, а также на более подробное сопоставление двух схем обработки.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00627)

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979. 448 с.
2. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 327 с.
3. Степанов О.А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. 85 с.
4. Bergman, N., *Recursive Bayesian estimation: Navigation and tracking applications*, Sweden, Linkoping University, 1999, 219 p.
5. Gustafsson, F. et al., Particle filters for positioning, navigation, and tracking, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50, no. 2, pp. 425–437.
6. Nygren, I., Jansson, M., Terrain Navigation for Underwater Vehicles Using the Correlator Method, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, vol. 29, no. 3, pp. 906–915.
7. Carreno, S. et al., A survey on Terrain Based Navigation for AUVs, *OCEANS 2010 MTS, IEEE Seattle, IEEE*, 2010, pp. 1–7.
8. Vaman, D., TRN history, trends and the unused potential, *2012 IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE*, 2012, pp. 1A3-1–1A3-16.
9. Августов Л.И. и др. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. М.: Научтехлитиздат, 2015. 592 с.
10. Джанджгава Г.И., Августов Л.И. Навигация по геополям. М.: Научтехлитиздат, 2018. 296 с.
11. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // *Гироскопия и навигация*. 2015. Т. 23. №3. С. 102–125.
12. Щербинин В.В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ, 2011. 220 с.
13. Han, Y., et al., An Improved TERCOM-Based Algorithm for Gravity-Aided Navigation, *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 8, pp. 2537–2544.
14. Wei, E., et al., A Robust Solution of Integrated SITAN with TERCOM Algorithm: Weight-Reducing Iteration Technique for Underwater Vehicles' Gravity-Aided Inertial Navigation System: A Robust Solution of Integrated SITAN with TERCOM, *Navigation*, 2017, vol. 64, no. 1, pp. 111–122.
15. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Геоинформация в комплексах бортового оборудования летательных аппаратов. М.: Научтехлитиздат, 2018. 146 с.
16. Melo J., Matos, A., Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles, *Ocean Engineering*, 2017, vol. 139, pp. 250–264.
17. Parnani, P., Seto, M.L., Terrain-Based Localization and Mapping for Autonomous Underwater Vehicles using Particle Filters with Marine Gravity Anomalies, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 29, pp. 354–359.
18. Тезисы докладов I научно-технической конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение». Менделеево: ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», 2017. 146 с.
19. Тезисы докладов II научно-технической конференции «Навигация по гравитационному и магнитному полям земли. Новые технологии». Менделеево: ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», 2019. 103 с.
20. Zhou, T., et al., Adaptive particle filter based on Kullback-Leibler distance for underwater terrain aided navigation with multi-beam sonar, *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2018, vol. 12, no. 4, pp. 433–441.
21. Костоусов В.Б., Тарханов А.Е. Новый метод оценки ошибок коррекции координат по карте геофизического поля // *Технические Проблемы освоения мирового океана*. 2019. № 8. С. 347–351.
22. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.
23. Doucet, A., Freitas, N., Gordon, N., *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*, New York, NY, Springer New York, 2001, 590 p.

24. **Chen, Z.**, Bayesian filtering: From Kalman filters to particle filters, and beyond, *Statistics*, 2003, vol. 182, no. 1, pp. 1–69.
25. **Sarkka, S.**, *Bayesian Filtering and Smoothing*, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013, 254 p.
26. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 2. Современные тенденции развития // *Гироскопия и навигация*. 2015. Т. 91. №4. С. 147–159.
27. **Candy, J.V.**, *Bayesian Signal Processing: Classical, Modern, and Particle Filtering Methods*, 2nd ed., New Jersey, Wiley, 2016, 630 p.
28. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
29. **Daum, F., Huang, J.**, Curse of dimensionality and particle filters, *IEEE Aerospace Conference Proceedings* (Cat. No.03TH8652), *IEEE Aerospace* (Cat. No.03TH8652), Big Sky, Montana, USA 2003, vol. 4, pp. 1979–1993.
30. **Serin, E., Adali, S., Balcisoy, S.**, Entropy assisted automated terrain navigation using traveling salesman problem, *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, ACM Press, 2011, pp. 41–48.
31. **Wang, K., et al.**, Matching error of the iterative closest contour point algorithm for terrain-aided navigation, *Aerospace Science and Technology*, 2018, vol. 73, pp. 210–222.
32. **Gao, W., et al.**, Improved Artificial Bee Colony Algorithm Based Gravity Matching Navigation Method, *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 7, pp. 12968–12989.
33. **Wu, L., et al.**, Performance Evaluation and Analysis for Gravity Matching Aided Navigation, *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 4, p. 769.
34. **Носов А.С., Степанов О.А.** Анализ влияния предварительной обработки измерений на точность решения задачи навигации по геофизическому полю // *Труды XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 64–68.
35. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания / Издание 3-е, исправленное и дополненное. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
36. **Болотин Ю.В., Вязьмин В.С.** Методы L2 и минимаксного оценивания в задаче определения аномалии силы тяжести по данным аэрогравиметрии с использованием сферического вейвлет-разложения // *Гироскопия и навигация*. 2015. №3. С. 82–94.
37. **Пантелеев В.Л.** Фильтрация в задачах инерциальной гравиметрии. LAP LAMBERT ACADEMIC PUBL, 2012. 52 с.
38. **Степанов О.А. и др.** Сравнительный анализ точности оценивания аномалий ускорения силы тяжести в режиме фильтрации и сглаживания // *Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2015. С. 384–387.
39. **Краснов А.А., Соколов А.В.** Современный комплекс программно-математического обеспечения мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // *Гироскопия и навигация*. 2015. Т. 89. № 2. С. 118–131.
40. **Koshaev, D.A., Stepanov, O.A.**, Analysis of filtering and smoothing techniques as applied to aerogravimetry, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 19–25.
41. **Arulampalam, M.S., et al.**, A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50, no. 2, pp. 174–188.
42. **Anonsen, K.B., Hallingstad, O.**, Terrain Aided Underwater Navigation Using Point Mass and Particle Filters, *IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium 2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*, Coronado, CA, 2006, pp. 1027–1035.
43. **Степанов О., Торопов А.** Сопоставление метода сеток и методов Монте-Карло в задаче корреляционно-экстремальной навигации // *XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам*. 2010. С. 308–311.
44. **Schon, T., Gustafsson, F., Nordlund, P.-J.**, Marginalized particle filters for mixed linear/nonlinear state-space models, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, vol. 53, no. 7, pp. 2279–2289.
45. **Kalman, R.E.**, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of basic Engineering*, 1960, vol. 82, no. 1, pp. 35–45.
46. **Rauch, H.E., Striebel, C.T., Tung, F.**, Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems, *AIAA Journal*, 1965, vol. 3, no. 8, pp. 1445–1450.
47. **Киселев Л.В. и др.** О гравиметрии с борта автономного подводного робота и оценках ее информативности для навигации по карте // *Подводные исследования и робототехника*. 2019. Т. 27. №1. С. 21–30.

48. Болотин Ю.В., Голован А.А. О методах инерциальной гравиметрии // Вестник Московского Университета. Серия 1: Математика. Механика. 2013. № 5. С. 59–67.
49. Motorin, A.V., Nosov, A.S., Accuracy and Sensitivity Analysis for Marine Gravimetry Algorithms in Dependence of Survey Conditions, *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg and Moscow, Russia, IEEE, 2019, pp. 1210–1215.
50. Stepanov, O.A., et al., Comparison of Stationary and Nonstationary Adaptive Filtering and Smoothing Algorithms for Gravity Anomaly Estimation on Board the Aircraft, *Proceedings of 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016)*, Saint-Petersburg, Russia, 2016, pp. 53–60.
51. Болотин Ю.В., Попеленский М.Ю. Анализ точности решения задачи авиагравиметрии при идентификации параметров гравиметра в полете // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. №7. С. 167–180.
52. Sokolov, A.V., Krasnov, A.A., Zheleznyak, L.K., Improving the Accuracy of Marine Gravimeters, *Gyroscopy and Navigation*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 155–160.
53. Stepanov, O.A., et al., Identification of Total Errors of Digital Maps and Sensors of Geophysical Fields, *Proc. IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry “Static and Mobile Measurements”*, Saint Petersburg, Russia, 2016, pp. 213–216.
54. Keating, P., Error estimation and optimization of gravity surveys, *Geophysical Prospecting*, 1995, vol. 43, no. 4, pp. 569–580.
55. Jordan, S.K., Self-consistent Statistical Models for Gravity Anomaly and Undulation of the Geoid, *Journal of Geophysical Research*, 1972, vol. 77, no. 20, pp. 3660–3670.
56. Müller, S., Schüler, L., *GSTools: Reverberating Red*, Zenodo, 2019.
57. Носов А.С., Степанов О.А., Торопов А.Б. Навигационная информативность геофизических полей и выбор траекторий в задаче уточнения координат с использованием карты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. №5. С. 74–92.

Stepanov, O.A. and Nosov, A.S. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia; ITMO University, St. Petersburg, Russia)

A Map-Aided Navigation Algorithm without Preprocessing of Field Measurements, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2 (109), pp. 70–90.

Abstract. A new algorithm for geophysical map-aided navigation is proposed. It does not require any preliminary estimation of the field measured along the vehicle trajectory and, as consequence, does not need any stochastic field model. The algorithm uses a whole set of the available geophysical field measurements. The accuracy analysis procedure applied to estimate the effectiveness of the proposed algorithm is described. The features and advantages of this algorithm are illustrated by an example of marine gravity-aided navigation.

Key words: map-aided navigation, geophysical fields, Bayesian estimation, optimal nonlinear algorithm, preprocessing, comparative accuracy analysis.

Материал поступил 04.02.2020