

УДК 551.46.077:629.584

МОДЕЛИ ДИНАМИКИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА ПРИ ТРАЕКТОРНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ АНОМАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Л.В. Киселёв, А.В. Медведев

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН¹

Рассматриваются вопросы планирования миссий АНПА при автоматизации измерений и картографирования физических полей океана. Траекторное обследование полей основано на поисковом алгоритме с управлением по обобщенным целям (ориентирам). В случае аномального поля задача состоит в оконтуривании области определенного радиуса в зоне поиска и наведении на источник аномалии. С помощью системы компьютерного моделирования исследуются возможные подходы к решению этой и других аналогичных задач.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления движением АНПА традиционно связаны с обследованием рельефа морского дна, поиском и инспекцией объектов в придонном пространстве, измерением параметров физических полей [1, 2]. Разнообразные применения АНПА для решения поисковых и обследовательских задач, топографической съемки и картографирования дна, мониторинга водной среды могут быть рассмотрены с общих позиций. Так, задача выбора трассы в условиях сложного рельефа дна является частным случаем более общей задачи траекторного обследования поля рельефа и ориентирования по батиметрической карте. Аналогичная задача возникает при организации траекторного обследования полей, обладающих характерными свойствами: изменчивостью, аномальным уровнем, наличием корреляции в геометрии поля и т.п. В настоящее время наряду с традиционными способами океанографических измерений все большее применение находят способы траекторных

измерений с помощью автономных, телеуправляемых и буксируемых аппаратов. В этом отношении применение АНПА имеет ряд преимуществ, в особенности при выполнении комплексных измерений на больших глубинах и в экстремальных условиях среды [2].

В статье [2] приведены примеры построения батиметрической карты и карты поля температур, полученные с помощью АНПА «Клавесин» при обследовании участка хребта Ломоносова в Российской полярной экспедиции «Арктика-2007». В данном эксперименте производились батиметрические, гидрологические и другие измерения при следовании по заданному маршруту вблизи дна с привязкой измерений к географическим координатам.

Восстановление карты поля по данным измерений – задача стандартная, хотя и весьма трудоемкая. В упрощенной постановке можно ограничиться построением отдельных реализаций поля, в частности, изолиний или иных сечений. Самостоятельный смысл приобретают две взаимосвязанные

задачи: ориентирование по известным элементам карты и организация движения по изолиниям (сечениям) поля.

Остановимся на возможных вариантах формальной постановки задачи.

■ Математическая модель пространственного движения

Геометрия пространственного движения $X = \{X(t), Y(t), Z(t)\}$ АНПА в неподвижной локальной системе отсчета может быть представлена совокупностью траекторий программного, реального и наблюдаемого движений, описываемых уравнениями вида:

$$\dot{X} = V \Phi[\varphi(U), \psi(U), \gamma(U)] + W, \quad (1)$$

где V – скорость относительно водной среды (набегающего потока), Φ – матрица тригонометрических преобразований угловых величин (курса φ , дифферента ψ , крена γ), зависящих

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232) 432416, e-mail: imtp@marine.febras

от управления U , которое, в свою очередь, зависит от программных значений величин $X^{np}(t), Y^{np}(t), Z^{np}(t), v^{np}(t), \varphi^{np}(t), \psi^{np}(t), \theta^{np}(t), t$; $W = \{W_x, W_y, W_z\}$ – вектор возмущений.

Движение с учетом гидродинамических свойств АНПА можно представить в виде:

$$\begin{aligned} M\dot{v} &= R_v(v) + F_v(U_b, U_r), \\ v &= \|v_i\|_1^3, \\ \dot{x} &= R_x(v, x) + F_x(U_b, U_r) + w, \\ x &= \|x_i\|_1^6, \\ \dot{x} &= v \Phi[x(U_r, U_b)] + W, \\ X &= \|x_i\|_1^8, \end{aligned} \quad (2)$$

где первое уравнение характеризует изменение скорости центра масс, второе – угловое движение относительно центра масс, третье – движение в инерциальном пространстве, $R_v(v)$ – вектор сил вязкого лобового сопротивления, $R_x(v, x)$ – блочно-диагональная матрица, элементы которой зависят от гидродинамических параметров аппарата в различных режимах обтекания набегающим потоком (гидростатические, гидродинамические и инерционные силы), M – диагональная матрица масс с учетом присоединенных масс жидкости, $F_v(U_r, U_b)$, $F_x(U_r, U_b)$ – вектор-функции, зависящие от ограниченных по величине управляющих воздействий по трем взаимосвязанным каналам $|U_b| \leq 1, |U_r| \leq 1, |U_v| \leq 1$.

Формально задачу траекторного обследования поля можно представить следующим образом [3].

Пусть $\xi(X, Z)$ есть величина, характеризующая собой плоское сечение поля. Измеритель поля при движении по траекто-

рии $\{X(t), Z(t)\}$ дает реализацию поля $\xi(X(t), Z(t))$ с некоторой случайной ошибкой. Предположим, что координаты и скорость аппарата (измерителя) определяются с помощью бортовой навигационной системы (БНС) с ошибками $\{\Delta X_a, \Delta Z_a\}, \{\Delta v_x, \Delta v_z\}$. Определим меру изменчивости поля вдоль траектории величиной градиента поля $|\nabla \xi|$ или приращением $\nabla \xi = |\nabla \xi| v \Delta t$ на интервале времени Δt .

Практический интерес представляют следующие взаимосвязанные задачи.

Задача 1 заключается в восстановлении карты поля путем покрытия заданной области сетью траекторий и измерения параметров поля с привязкой к навигационным данным. Как правило, управление сводится к заданию и коррекции курсовой программы $\varphi_{k+1} = \varphi_k + \Delta \varphi_k$ в характерных точках траектории:

$$\begin{aligned} \{X_k, Z_k\} &\leftrightarrow \{\xi = \xi_{\max}, \xi = \xi_{\min}, \\ &|\Delta \xi| = |\Delta \xi|_{\max}\}. \end{aligned}$$

Задача 2 состоит в организации поисковых движений с целью обнаружения и оконтуривания аномалии по уровню $\xi(t)$ и изменчивости $|\Delta \xi(t)|$ сигнала измерителя поля при маскирующем влиянии внешних помех.

Задача 3 связана с отслеживанием заданной изолинии $\xi = \text{const}$ ($v \nabla \xi = 0$), определяющей границу аномалии. Движение организуется путем ориентирования вектора скорости в соответствии с «кривизной» изменения поля по величине $\nabla \xi_x / \nabla \xi_z$.

В общем случае указанные задачи могут быть объединены одним общим сценарием. Покрытие заданной области сетью траекторий (галсов) осуществляется с помощью жестких или корректируемых программ со стабилизацией скорости,

курса, глубины (или расстояния до дна). Параметры движения должны соответствовать характеристикам изменчивости поля вдоль траекторий. Точность и подробность восстановления карты поля зависят от многих факторов, в том числе и от динамических свойств аппарата при осуществлении поисковых траекторий. Поиск координат с характерными (в частности, экстремальными) значениями параметров поля необходим для определения ориентиров целенаправленного движения. Для организации поисковых движений используется информация об уровне поля и его градиенте, определяемых путем сравнения текущих измерений поля либо с помощью градиентометра. Процедура поиска может быть организована на основе ортогонального или градиентного спуска с ориентированием на выбранную цель, в частности, источник аномалии. Накопленные данные об экстремальных значениях поля позволяют отметить аномальную или фоновую границу. Оконтуривание зоны с заданным уровнем поля может быть организовано путем поиска и отслеживания соответствующей замкнутой изолинии. В этом случае алгоритм управления ориентирует вектор скорости «в среднем» по касательной к изолинии. В принципе данная более общая задача может быть решена различными способами в зависимости от природы аномалии и выбора управляющих параметров для ориентирования относительно ее границы [3].

Рассмотрим задачу управления движением при поиске и отслеживании заданной изолинии $\xi = \xi_0$, считая, что вектор управления содержит две составляющие – одну для управления положением, другую

для управления ориентацией. Для правильного выбора направления поисковых движений необходимо вырабатывать информацию о направлении вектора градиента. Эта информация может быть получена непосредственно путем измерения составляющих градиента комплексом дифференциальных датчиков либо с помощью схемы, имитирующей вычисление градиента в поисковых движениях. В последнем случае должны быть согласованы между собой параметры поисковых движений и радиус кривизны изолинии, а также период поисковых движений и период обновления данных.

Использование информации о поле для управления движением эквивалентно по своему смыслу включению параметра поля $\xi(X, Z)$ в расширенный вектор состояния динамической системы с дополнительным уравнением:

$$\dot{\xi} = \nabla \xi_x(X, Z) v \cos \chi + \nabla \xi_z(X, Z) v \sin \chi,$$

где угол траектории χ , угол дрейфа и курс связаны выражением $\chi = \varphi - \beta$.

При движении по изолинии $\xi(X, Z) = \xi_0$ составляющие вектора скорости $v_x = v \cos \chi$, $v_z = v \sin \chi$ должны удовлетворять «в среднем» кинематическому условию:

$$\nabla \xi_x V_x + \nabla \xi_z V_z = 0, \quad (3)$$

которое можно выразить через проекции градиента на связанные с аппаратом оси в виде $\beta = \arctg(\nabla \xi_{x1} / \nabla \xi_{z1})$ либо в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi = \\ = (\nabla \xi_{x1} V_x + \nabla \xi_{z1} V_z) / (\nabla \xi_{x1} V_z - \\ - \nabla \xi_{z1} V_x). \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение (4) дает значения для программного курса, если известны другие параметры движения.

Определим «расстояние» D_ξ от точки с текущим значением поля до заданной изолинии выражением:

$$D_\xi = |\xi - \xi_0| / |\nabla \xi|, \quad (5)$$

а проекцию вектора градиента на направление движения в виде:

$$p = \operatorname{Pr}_v \nabla \xi = |\nabla \xi| \cos \gamma, \quad (6)$$

где $\gamma = \beta + \arctg(\nabla \xi_{z1} / \nabla \xi_{x1})$.

Выбор направления движения при выходе на изолинию в соответствии с направлением градиента должен удовлетворять условию: $(\xi - \xi_0)p < 0$. В противном случае требуется выполнить поисковое движение, ориентирующее вектор скорости нужным образом.

Для отслеживания изолинии сформируем управление:

$$\begin{aligned} U_{\varphi, \xi} = K_\varphi(\varphi - \varphi_s) + K_\varphi \dot{\varphi} + \\ + K_\xi D_\xi \operatorname{sign}(p \nabla \xi). \end{aligned} \quad (7)$$

Программный курс задается в зависимости от угла поворота изолинии: $\varphi_s = \arctg(\nabla \xi_z / \nabla \xi_x)$, а выбором параметров управления обеспечиваются требуемые динамические свойства.

Управление (7) организует угловое движение при постоянной скорости.

Во многих случаях для повышения качества управления необходимо изменять скорость в зависимости от расстояния до текущего ориентира (в данном случае до изолинии) и относительного углового положения аппарата.

Представим управление (7) в ином виде, разделив в нем функции управления ориентацией, положением и скоростью. Управление движением на ориентир с координатами:

$$X_\xi = D_\xi \cos \varphi_s, \quad Z_\xi = D_\xi \sin \varphi_s \quad (8)$$

определим в виде:

$$\begin{aligned} U_x = K_1(X - X_\xi) + K_2 \dot{X}, \\ U_z = K_1(Z - Z_\xi) + K_2 \dot{Z}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\dot{X} = V \cos \varphi$, $\dot{Z} = V \sin \varphi$, K_1 , K_2 – параметры управления.

В проекциях на связанные с аппаратом оси получим:

$$\begin{aligned} U_{x1} = U_x \cos \varphi + U_z \sin \varphi, \\ U_{z1} = -U_x \sin \varphi + U_z \cos \varphi, \end{aligned} \quad (10)$$

причем имеют место отмеченные выше ограничения на управление.

В целом закон управления (7-9), обеспечивающий выход на изолинию и движение в заданной трубке Δ_0 , можно записать в виде:

$$U_{\varphi, \xi} = \begin{cases} (U_x, U_z), & \text{если } |\Delta \xi| > \Delta_0, \\ U_\varphi = K_\varphi(\varphi - \varphi_s) + K_\varphi \dot{\varphi} + \\ + K_\xi D_\xi \operatorname{sign}(p \nabla \xi), & \\ \text{если } |\Delta \xi| \leq \Delta_0. \end{cases} \quad (11)$$

■ Компьютерная модель динамики и управления

В вычислительной модели использовался пакет имитационного моделирования нелинейных систем MATLAB Simulink со следующими инструментами:

- DEE toolbox (решатель систем дифференциальных уравнений);
- StateFlow (инструмент для событийного описания функционирования систем);
- RealTimeWorkShop Embedded Code (использование встроенного кода в модели).

Средствами пакета были реализованы следующие блоки (рис. 1):

- математическая модель пространственного движения АНПА;
- модель статики и гидродинамики (инерционные силы и силы вязкого сопротивления);
- модель внешних возмущений (постоянно действующие



Рис. 1. Обобщенная структурная схема моделирующего стенда

течения и случайные флуктуации);

- кинематическая модель движительно-рулевого комплекса;
- низкоуровневые регуляторы (вертикальный, горизонтальный, скоростной)
- алгоритмы инспекции физического поля на координирующем уровне (уровень миссий).

Сценарий поисковой программной миссии включает следующие процессы:

- осуществление поисковых движений методом ортогонального спуска с курсовой коррекцией по изменению знака градиента поля (рис. 2,а, рис 3);
- покрытие найденной области сетью прямолинейных траекторий (галсов) типа «меандр» с измерением параметров поля и привязкой их к навигационным данным для последующего восстановления карты поля (рис. 2,б, рис. 4);
- отслеживание заданной изолинии, определяющей границу аномалии, путем ориентирования вектора скорости в соответствии с «кривизной» изменения поля или движением по численным координатам, соответствующим заданному уровню поля (рис. 2,в, рис. 5).

■ Результаты моделирования

В модельном представлении рассматривался сценарий из трех перечисленных выше последовательных процессов. В качестве примера была выбрана структура поля, имеющая характер аномалии с экстремумом по уровню и градиенту. Поле представлено bitmap-изображением 400×400 точек с градацией по уровню яркости точки $[0 \dots 255]$, что соответствует изменению величины поля в диапазоне $[0 \dots 100]$ условных единиц. Картина поля располагается на квадратной координатной сетке $[-200 \dots 200]$. Соответственно шаг изменения (точность) поля – 1 м. Bitmap построена в графическом редакторе Photoshop с использованием инструментов Radial Gradient и Smudge Tool.

Для определения точки экстремума выполнялось поисковое движение с помощью алгоритма ортогонального спуска (рис. 3). В процессе поиска с произвольным начальным направлением и временным шагом 10 с снимается и заносится в буфер текущее значение поля. По нескольким отсчетам (в дан-

ном примере по трем) определяется величина градиента поля по текущему направлению. При смене знака градиента происходит поворот на ортогональный галс. В зависимости от пространственной изменчивости поля периодичность получения отсчетов согласуется с текущей скоростью аппарата.

Основной процесс сценария состоял в восстановлении карты поля по сети дискретных измерений, полученных путем покрытия области сетью прямолинейных траекторий (галсов). По измерениям в узлах неравномерной сетки производилась интерполяция с шагом, зависящим от величины градиента поля в узловых точках. На основе полученных данных строились изолинии с заданными значениями уровня поля (рис. 4).

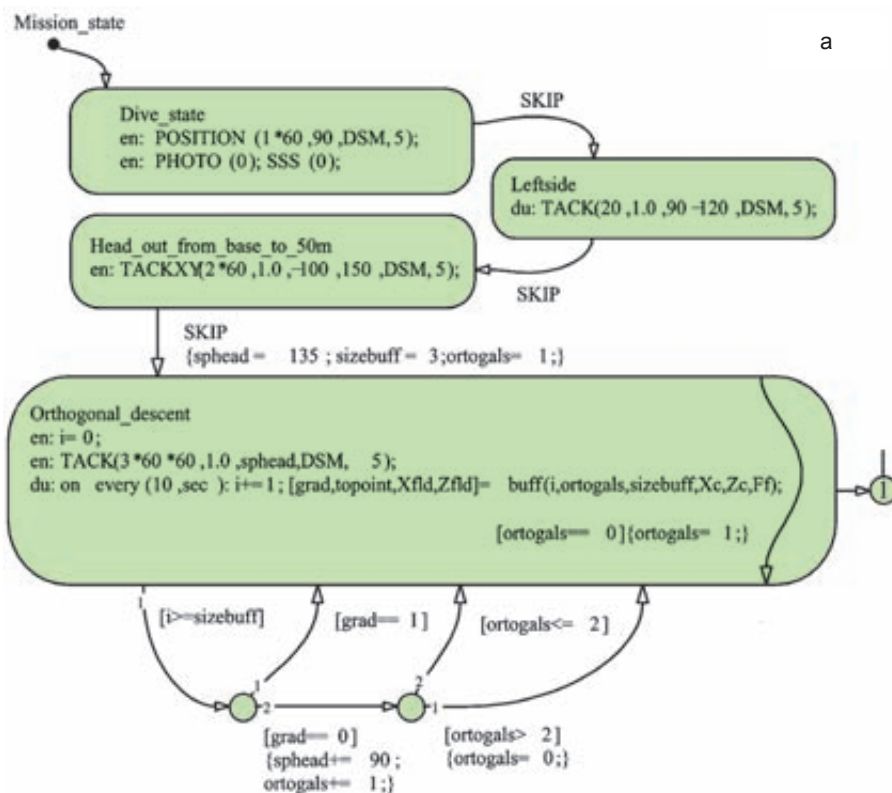
Одновременно осуществлялась навигационная привязка измерений с использованием численных координат. В данном примере ширина покрытия составляла 250 м, длина галса – 100 м, расстояние между галсами – 10 м.

Заключительная процедура поиска состояла в оконтуривании области, принимаемой за аномалию. В качестве границы этой области была взята замкнутая изолиния с заданным значением уровня (изолиния со значением 80) восстановленного поля. В модельном эксперименте рассматривались два варианта движения при оконтуривании аномалии: движение прямолинейными галсами по равномерно распределенным численным координатам на выбранной изолинии и движение с регулированием курса по уровню поля с заданным значением. В первом случае используются координаты восстановленного поля, во втором координаты неизвестны и аппарат совершает поисковые движения, отслеживая «в среднем» границу аномальной зоны.

Рассмотрим в качестве конкретного примера процедуру восстановления карты магнитной аномалии по данным траекторных измерений. По имеющимся сведениям [4-7], при проведении различного рода магнитных съемок, в том числе при обследовании мелкомасштабных аномалий, довольно эффективно используются системы, снабженные высокочувствительными магнитометрами. Разные варианты такой системы использовались на AUV «Aqua Explorer» (AE 1000, AE 2000) и, позднее, на AUV «Hugin» при обследовании кабельных линий, AUV «Bluefin 12», AUV «Remus 600» при поиске донных мин. Магнитометрической системой с однокомпонентным феррозондовым магнитометром был оснащен также АНПА «Л-2» при выполнении поисковых работ в Бискайском заливе.

Магнитное поле можно представить совокупностью векторных и скалярных величин:

- вектором напряженности (силовые линии),
- вектором градиента к силовым линиям (эквипотенциальные кривые),
- составляющими вектора напряженности в вертикаль-



ной и горизонтальной плоскостях,

- модулем вектора напряженности (изолинии модуля вектора),
- направлением и значением градиента,
- проекцией вектора градиента на оси, связанные с аппаратом.

При построении системы поиска по магнитной аномалии

оказывается необходимым выделение магнитного контакта на фоне широкополосной помехи. Другими словами, надо определить, что следует понимать под магнитным контактом и каков должен быть измеритель поля, чтобы он смог почувствовать наличие аномалии с достаточной достоверностью. При идентификации анома-

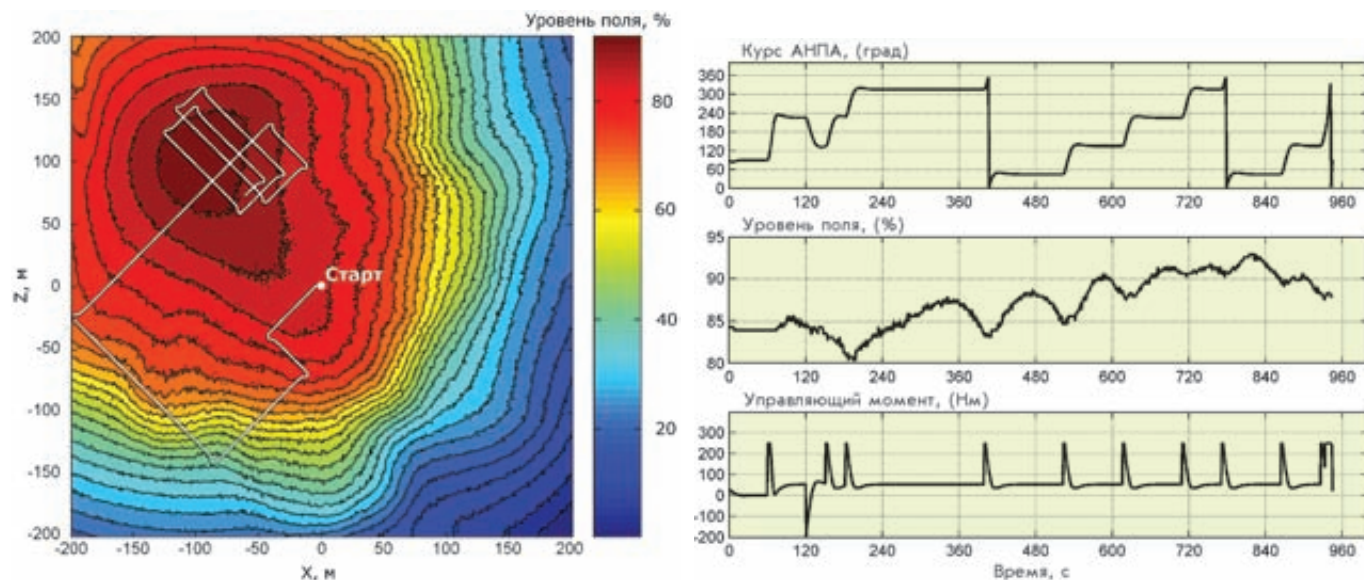


Рис. 3. Траектория и параметры движения при поиске аномальной области

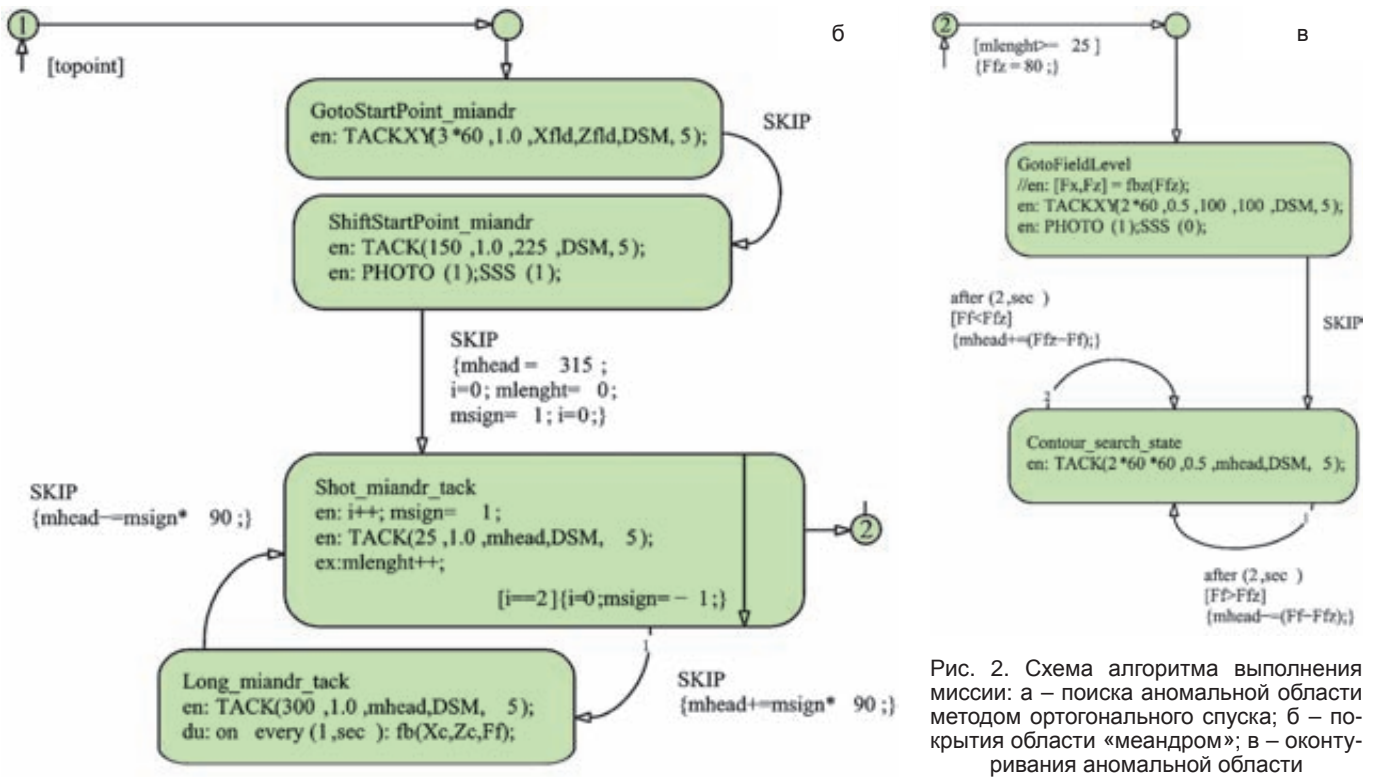


Рис. 2. Схема алгоритма выполнения миссии: а – поиска аномальной области методом ортогонального спуска; б – оконтуривания аномальной области

лии по сигналам системы обнаружения приходится иметь дело со сложными реализациями поля вдоль траектории аппарата. Сигнал, по которому можно отличить аномалию от «земного шума», как правило, асимметричен, имеет переменную полярность при пересечении аномалии в различных направлениях на различных

дистанциях. Качественное отображение этих свойств можно получить исходя их расчетно-теоретической модели поля. Реальные сигналы отличаются от модельных прежде всего наличием региональных градиентов, однако, как утверждает в ряде работ, эти градиенты порождают сигналы, «ширина» которых во многих случаях на

порядок больше, чем «ширина» сигналов от собственных аномалий. В работах [4–7] имеются примеры снятых локальных аномальных полей и записей реальных сигналов от аномалий, порождаемых объектами различной природы. Так, в работе [6] приведена мелкомасштабная карта аномалии, образованной двумя близко

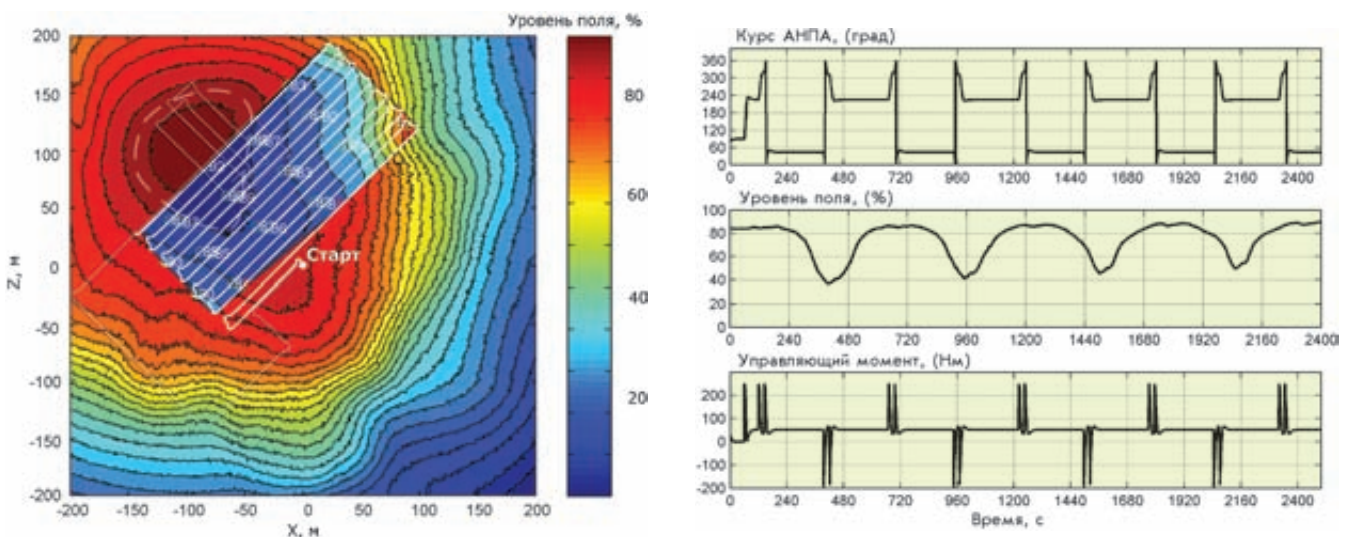


Рис. 4. Фрагмент восстановления карты поля и параметры движения «меандром»

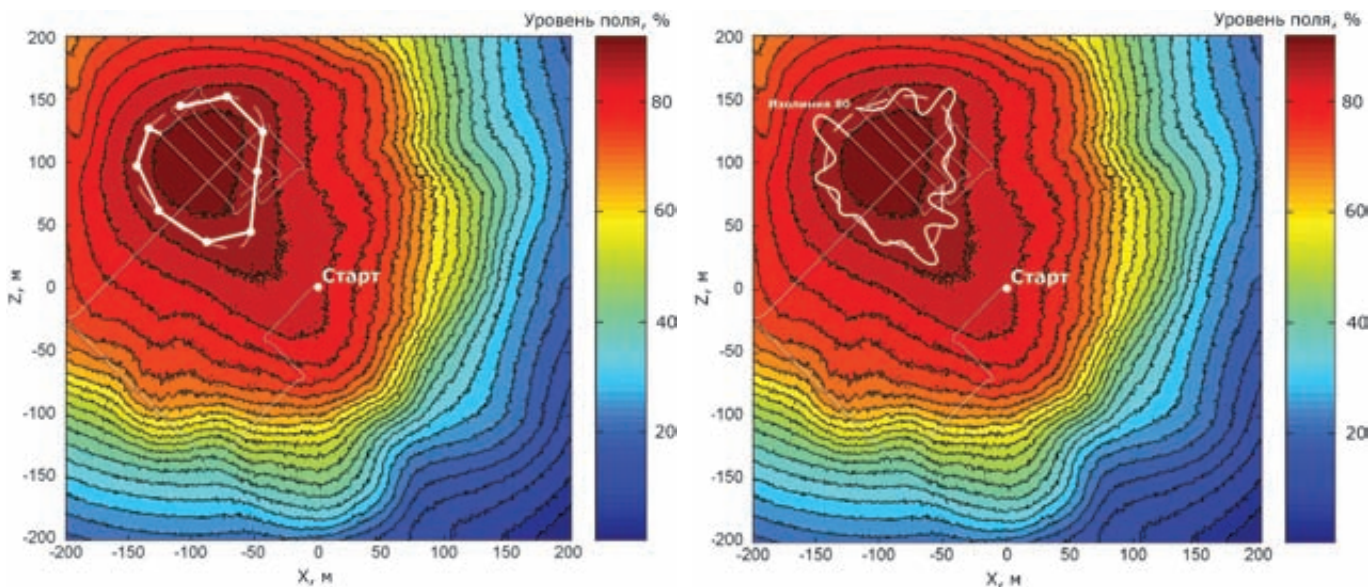


Рис. 5. Оконтуривание аномальной зоны путем отслеживания изолинии

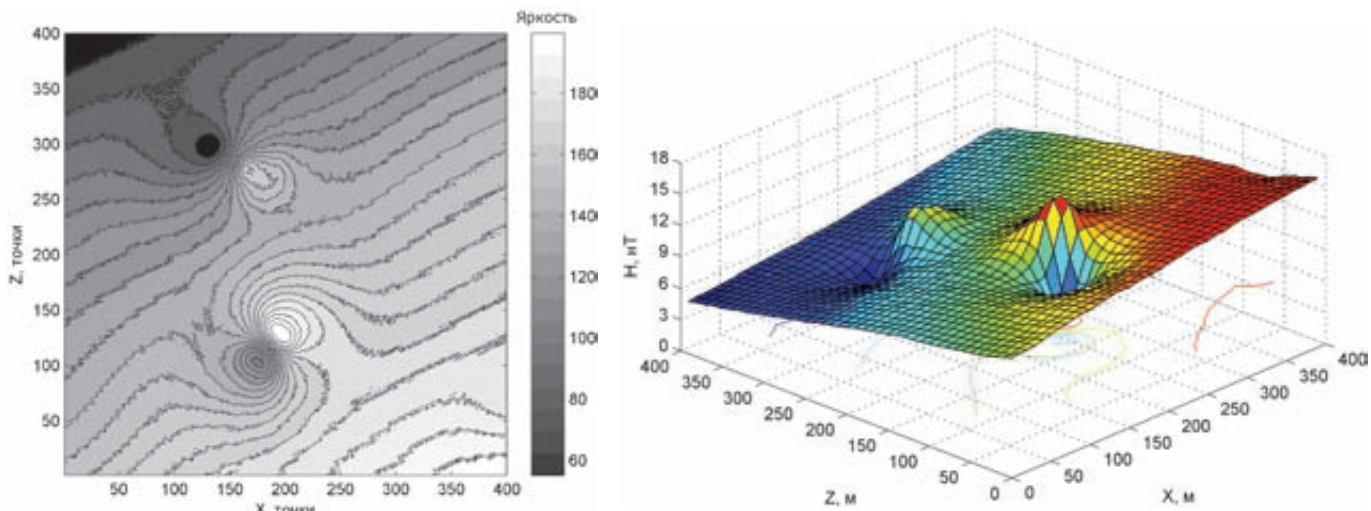


Рис. 6. Фрагмент магнитного поля и представление его напряженности

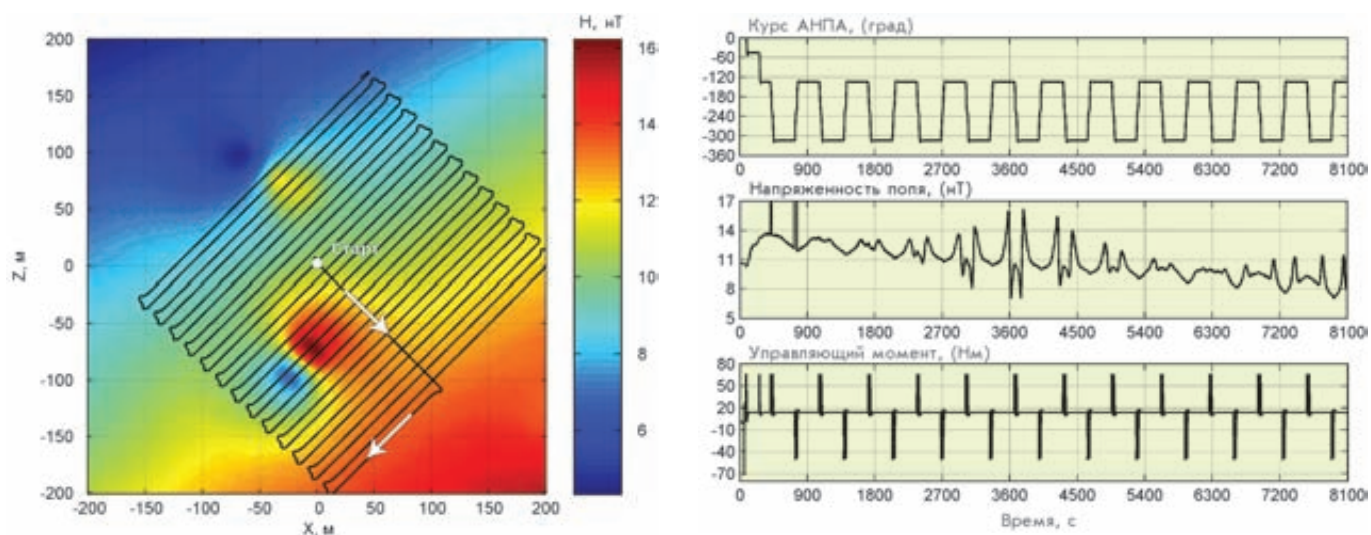


Рис. 7. Фрагмент карты магнитного поля и параметры движения «меандром»

расположенными намагниченными телами (рис. 6). Примем её в качестве модели для иллюстрации работы алгоритма траекторных измерений.

Для проведения вычислительного эксперимента была построена идентичная картина поля в виде bitmap-изображения размером 400x400 точек с градацией по уровню яркости точки (0...255), диапазон яркости был соотнесен с изменением величины напряженности поля (5... 20) нТ. Карта поля располагается на координатной сетке (-200...200) м с шагом изменения 1 м (рис. 7). Bitmap построена в графическом редакторе Photoshop с использованием инструментов Radial Gradient и Smudge Tool. Цель моделирования заключалась в восстановлении карты неоднородного поля, имеющего несколько экстремумов, по измерениям вдоль траектории вида

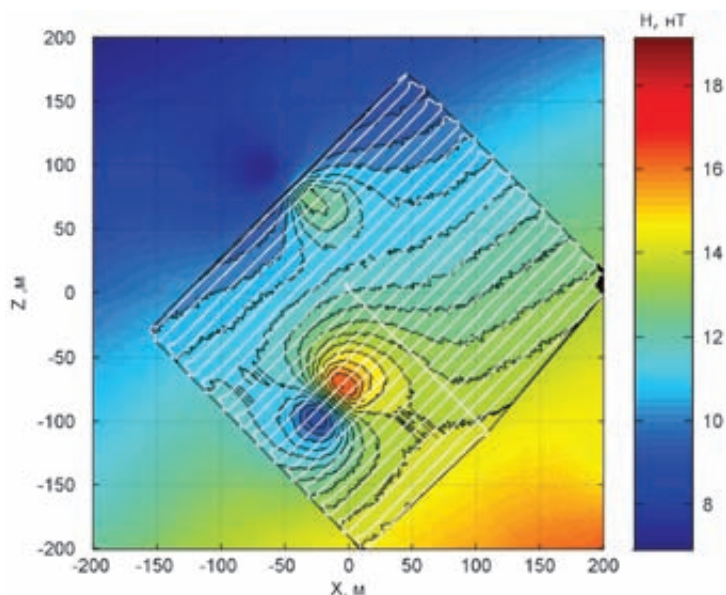


Рис. 8. Изображение восстановленного участка карты поля

«меандр» с расстоянием между галсами 20 м.

По данным измерений в узлах неравномерной сетки производилась интерполяция, и на основе полученных данных

строились изолинии с заданными значениями уровня поля (рис. 8).

Работа выполнена при частичной поддержке грантов: № 09-П-СО-03-001, № 09-И-ОЭМПУ-08.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселёв Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
2. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 5–14.
3. Киселёв Л.В. Управление движением автономного подводного робота при траекторном обследовании физических полей океана // Автоматика и телемеханика. 2009. № 4. С. 141–148.
4. Никифоров В.М., Бессонова Е.А. Опыт применения магниторазведки для обнаружения ферромагнитных объектов на акватории залива Петра Великого // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1(3). С. 58–65.
5. Breiner Sh. Marine magnetics search geometrics technical report. 1975. No.7.
6. Clem T. R., Bono J. T., Davis P. S. et al. Initial Buried Minehunting Demonstration of the Laser Scalar Gradiometer Operating Onboard REMUS 600 // IEEE. 2006.
7. Weiss E., Ginzburg B., Cohen T. R. et al. High Resolution Marine Magnetic Survey of Shallow Water Littoral Area // Sensors. 2007. No 7. P. 1697–1712.

