

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 681.532.5

**УПРАВЛЕНИЕ ПЛОСКИМ ДВИЖЕНИЕМ
АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СКАЛЯРНЫХ ПОЛЕЙ ***

Ю. Н. Золотухин, К. Ю. Котов, А. А. Нестеров, А. П. Ян

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su

Предложен градиентный алгоритм управления движением автономного объекта, обеспечивающий поиск и отслеживание изолинии скалярного поля при наличии одного сенсора на подвижном аппарате. Существенным ограничением является возможность получения только локальных оценок градиента в отдельные моменты времени. Алгоритм основан на введении в систему управления дополнительного тестового сигнала, что позволяет аппарату с одним датчиком поля вычислять полное значение градиента.

Введение. Задача организации движения автономного объекта к изолинии некоторого скалярного поля и дальнейшего движения вдоль изолинии является типичной в управлении автономными объектами, располагающими только результатами измерений параметров поля. В литературе, как правило, данная проблема рассматривается применительно к управлению автономными подводными роботами. Это обусловлено широкими возможностями использования таких аппаратов в исследованиях океана, например при измерении параметров физических полей (течений, солёности, температуры), при поиске гидротермальных источников на дне океана и т. п.

Решение подобных задач возможно с использованием одного аппарата или группировки аппаратов. Алгоритм управления движением аппарата с одним сенсором, основанный на применении локальной оценки градиента измеряемой величины, рассмотрен в работе [1]. Последовательные круговые маневры, выполняемые аппаратом, позволяют вычислять полное значение градиента и вносить поправки в траекторию движения. Также в [1] приводится сравнение данного алгоритма с известными поисковыми процедурами. В работах [2–4] оценка полного градиента формируется на основе результатов измерений, проводимых объектами, движущимися в составе груп-

* Работа выполнена при поддержке Сибирского отделения РАН (Комплексный интеграционный проект № 1.4).

пировки. Управление движением объекта в группе формируется с учетом локальной оценки градиента и потенциальных функций, описывающих взаимодействие объекта с остальными членами группы. Такой же способ управления применяется в [5] для отслеживания изолинии скалярного поля. В работе [6] предложен алгоритм управления движением нескольких аппаратов, основанный на симплекс-методе. Ситуационный подход для обнаружения химических источников в океане представлен в [7]. Для поиска источника излучения в [8] используется рекурсивный алгоритм минимизации.

В работе [9] предложен алгоритм управления движением объекта с применением градиента скалярного поля в предположении, что аппарат имеет возможность получать точное значение полного градиента в каждый момент времени.

В данной работе используются некоторые результаты [9] для управления аппаратом, когда возможно получение только локальных оценок градиента в дискретные моменты времени. Введение в систему управления дополнительного тестового сигнала позволяет аппарату вычислять полное значение градиента. В качестве модели объекта управления принята модель колесного робота с дифференциальным приводом. Кинематика и динамика этого объекта описываются простыми соотношениями, в то же время структурная модель такой системы аналогична моделям сложных объектов, например подводных роботов.

Модель объекта и постановка задачи управления. Рассмотрим движение объекта в плоскости (x, y) в соответствии с уравнениями [10]

$$\begin{cases} \dot{x} = v \sin \varphi, \\ \dot{y} = v \cos \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – координаты объекта на плоскости; v – линейная скорость объекта ($v > 0$); φ – угол, характеризующий направление движения объекта относительно оси ординат ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Движение объекта будем считать равномерным ($v = \text{const}$), а закон управления зададим в виде

$$\dot{\varphi} = k_{\varphi}(\varphi_0 - \varphi), \quad (2)$$

где k_{φ} – коэффициент усиления по каналу управления углом φ ; φ_0 – задание на курсовой угол φ (рис. 1).

Поставим перед объектом задачу выхода на изолинию и дальнейшего движения вдоль изолинии некоторого скалярного поля $S(x, y): R^2 \rightarrow R$. Уравнение изолинии имеет вид

$$S(x, y) = c, \quad (3)$$

где c – постоянная величина, характеризующая ее уровень.

Угол φ_0 зависит от положения объекта относительно изолинии, т. е. объект должен двигаться в направлении возрастания значений $S(x, y)$ при $S(x, y) < c$ и в противоположном направлении при $S(x, y) > c$. В таком случае естественно воспользоваться градиентом функции $S(x, y)$. Введем вектор

$$\text{grad}S(x, y) = \left[\frac{\partial S(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial S(x, y)}{\partial y} \right] = [\nabla_x S(x, y), \nabla_y S(x, y)] = \nabla S(x, y).$$

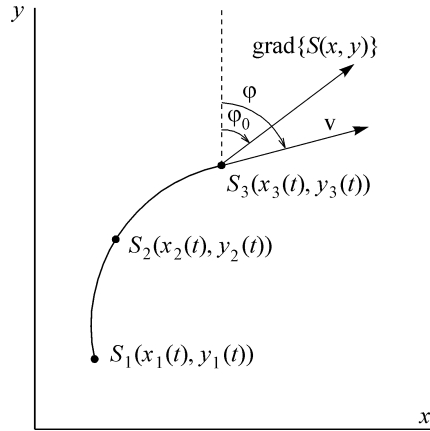


Рис. 1. Вычисление значения градиента с помощью отдельных измерений величины поля $S(x, y)$ при перемещении объекта

Опуская промежуточные действия, приведем полученное в работе [9] выражение для φ_0 :

$$\varphi_0 = \text{Arctg} \frac{-\text{sign}(S(x, y) - c)(1 - h(x, y))\nabla_x S(x, y) + \beta h(x, y)\nabla_y S(x, y)}{-\text{sign}(S(x, y) - c)(1 - h(x, y))\nabla_y S(x, y) - \beta h(x, y)\nabla_x S(x, y)}, \quad (4)$$

где $h(x, y)$ – функция, зависящая от степени близости объекта к изолинии; β – параметр, определяющий направление движения после выхода на изолинию ($\beta = \pm 1$). Функцию $h(x, y)$ зададим в виде

$$h(x, y) = \exp(-\gamma(S(x, y) - c)^2),$$

где γ – постоянная величина ($\gamma > 0$).

Соотношение (4) для φ_0 решает задачу перевода объекта из некоторой точки плоскости на изолинию (3) с последующим движением вдоль этой изолинии. При использовании выражения (4) требуется знание составляющих градиента $\nabla S(x, y)$. Рассмотрим способ вычисления $\nabla S(x, y)$ на основе значений поля $S(x, y)$, измеренных во время движения объекта.

Оценка значения градиента. Допустим, что объект имеет возможность измерять одно значение поля $S_i(x_i, y_i)$ в некоторый момент времени t_i . Здесь x_i, y_i – координаты объекта на плоскости. Для моментов времени $t_i, i = 1, \dots, 3$, удовлетворяющих неравенству $t_1 < t_2 < t_3$ (см. рис. 1), определим следующие величины:

$$\begin{cases} \Delta x_1 = x_2 - x_1, \\ \Delta y_1 = y_2 - y_1, \\ \Delta x_2 = x_3 - x_1, \\ \Delta y_2 = y_3 - y_1, \\ \Delta S_1 = S_2 - S_1, \\ \Delta S_2 = S_3 - S_1. \end{cases} \quad (5)$$

Выбирая шаг квантования достаточно малым, можно получить оценку $\nabla S(x, y)$ с помощью конечных разностей (5):

$$\begin{cases} \Delta S_1 = \nabla_x S(x, y) \Delta x_1 + \nabla_y S(x, y) \Delta y_1, \\ \Delta S_2 = \nabla_x S(x, y) \Delta x_2 + \nabla_y S(x, y) \Delta y_2. \end{cases}$$

Отсюда

$$\begin{cases} \nabla_x S(x, y) = \frac{\Delta S_1 \Delta y_2 - \Delta S_2 \Delta y_1}{\Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1}, \\ \nabla_y S(x, y) = \frac{\Delta S_2 \Delta x_1 - \Delta S_1 \Delta x_2}{\Delta x_1 \Delta y_2 - \Delta x_2 \Delta y_1}. \end{cases} \quad (6)$$

Организация движения по градиенту. Для вычисления величин $\nabla_x S(x, y), \nabla_y S(x, y)$ с помощью выражения (6) необходимо выполнение условия

$$\Delta = \det \begin{vmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 \end{vmatrix} \neq 0. \quad (7)$$

Заметим, что при движении объекта с курсовым углом $\varphi = \text{const}$ всегда выполняется

$$\Delta y_1 / \Delta x_1 = \Delta y_2 / \Delta x_2,$$

т. е. нарушается условие (7). В этом случае необходимо введение тестового сигнала в систему управления. Для этого закон управления (2) запишем в виде

$$\dot{\varphi} = k_\varphi (\varphi_0 - \varphi) + \delta\varphi, \quad (8)$$

где $\delta\varphi$ – аддитивно малая функция (тестовый сигнал). Можно положить, например,

$$\delta\varphi = \alpha \text{sign}(\cos(\omega t)), \quad (9)$$

где $\alpha > 0$ и $\omega > 0$ – амплитуда и частота сигнала $\delta\varphi$.

Вычислим величину Δ при условии движения объекта вдоль градиента $\nabla S(x, y)$, т. е. при $\varphi \approx \varphi_0$. Пусть t_0 – момент времени, соответствующий фронту тестового сигнала (9). Интегрируя от t_0 до t правую и левую части уравнения (8), получим

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \alpha \text{sign}(\cos(\omega\tau)) d\tau. \quad (10)$$

Интеграл в правой части выражения (10) вычислим на интервале знакопостоянства сигнала $\delta\varphi$. Тогда

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \alpha(t - t_0), \quad t_0 \leq t \leq T/4, \quad (11)$$

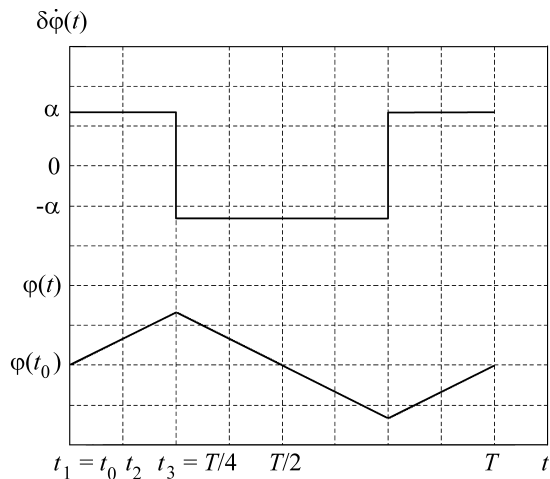


Рис. 2. Тестовый сигнал $\delta\dot{\varphi}(t)$ и изменение курсового угла $\varphi(t)$ относительно моментов времени, соответствующих измерениям значений поля

где T – период сигнала $\delta\dot{\varphi}$ (рис. 2). Аналогично проинтегрируем уравнения (1) с учетом (11). Полагая, что $\alpha \ll 1$, запишем

$$\begin{cases} x(t) = x(t_0) + \alpha v(t - t_0)^2 / 2, \\ y(t) = y(t_0) + v(t - t_0). \end{cases} \quad (12)$$

Моменты времени, соответствующие измерениям значений поля, определим в виде $t_1 = t_0$, $t_2 = t_0 + \Delta t$, $t_3 = t_0 + 2\Delta t$, где Δt – интервал между последова-

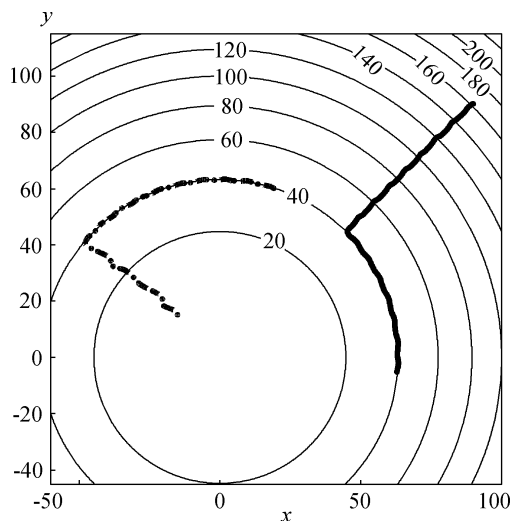


Рис. 3. Траектории перемещения объекта к изолинии по направлению градиента при $x(0) = -15$, $y(0) = 15$, $\varphi(0) = 0$ (штрихпунктирная кривая) и антиградиента при $x(0) = 90$, $y(0) = 90$, $\varphi(0) = 0$ (сплошная кривая)

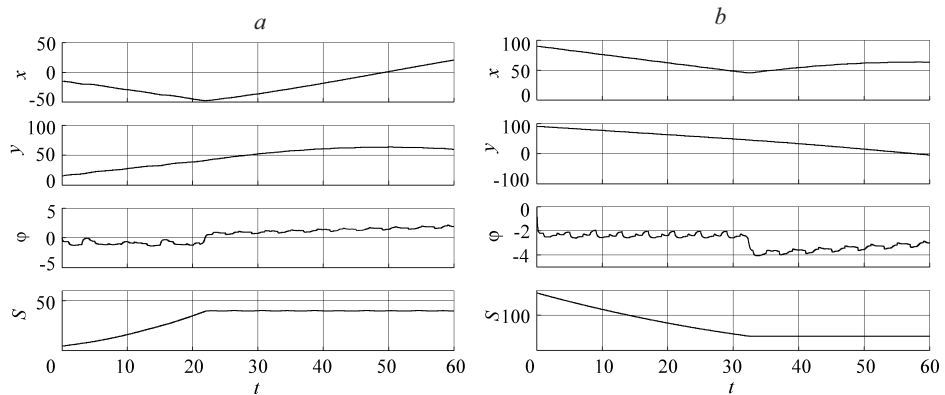


Рис. 4. Изменение координат, ориентации объекта и величины скалярного поля во временной области: в случае движения объекта по направлению градиента (a) и антиградиента (b)

тельными измерениями и $t_3 \leq T/4$. Переходя к дискретному времени в (12), прямым вычислением получим

$$\Delta = \alpha v^2 (\Delta t)^3.$$

Таким образом, условие (7) выполняется при наличии тестового сигнала $\delta\phi$ и ненулевой задержки Δt . Для получения экспериментальных результатов принято $\Delta t = T/8$ (см. рис. 2).

Результаты моделирования. Работоспособность алгоритма управления (8) была проверена путем моделирования в среде MATLAB/SIMULINK. Траектории перемещения объекта к изолинии и дальнейшего движения вдоль изолинии поверхности вида $S(x, y) = (x/10)^2 + (y/10)^2$ показаны на рис. 3. Уровень изолинии $c = 40$. Соответствующие графики изменения величин x , y , ϕ , $S(x, y)$ во временной области приведены на рис. 4.

Заключение. В данной работе предложен алгоритм управления движением автономного подвижного аппарата с одним сенсором, обеспечивающий перемещение аппарата к изолинии и дальнейшее движение вдоль изолинии некоторого скалярного поля. Алгоритм основан на использовании локальной оценки градиента скалярного поля. Вычисление полного значения градиента обеспечивается путем реализации пробных движений объекта за счет введения в систему управления дополнительного тестового сигнала. Моделирование объекта и системы управления в среде MATLAB/SIMULINK подтвердило эффективность алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Burian E., Yoerger D., Bradley A., Singh H.** Gradient search with autonomous underwater vehicles using scalar measurements // Proc. of the Symp. on Autonomous Underwater Vehicle Technology. Monterey, CA, USA, 1996. P. 86.
2. **Bachmayr R., Leonard N. E.** Vehicle networks for gradient descent in a sampled environment // Proc. of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control. Las Vegas, Nevada, USA, 2002. Vol. 1. P. 112.
3. **Gazi V., Passino M. K.** Stability analysis of social foraging swarms // Ibid. P. 2848.

4. **Ögren P., Fiorelli E., Leonard N. E.** Formations with a mission: Stable coordination of vehicle group maneuvers // Proc. of the Symp. Mathematical Theory of Networks and Systems. 2002. P. 1.
5. **Zhang F., Leonard N. E.** Generating contour plots using multiple sensor platforms // <http://www.princeton.edu/~naomi/publications/2005/ZhangLeonardSIS05.pdf>
6. **Silva J., Speranzon A., Borges de Sousa J., Johansson K. H.** Hierarchical search strategy for a team of autonomous vehicles // <http://albspe.googlepages.com/iav4.pdf>
7. **Farrell J. A., Pang S., Li W.** Chemical plume tracing via an autonomous underwater vehicle // IEEE Journ. Oceanic Eng. 2005. **30**, N 2. P. 428.
8. **Mayhew C. G., Sanfelice R. G., Teel A. R.** Robust source-seeking hybrid controllers for autonomous vehicles // Proc. of the 26th American Control Conference. N. Y., USA, 2007. P. 1185.
9. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Нестеров А. А.** Управление автономным объектом при плоском движении по заданной траектории с обходом препятствий // Тр. IX Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 2007. С. 213.
10. **Lawton J. R. T., Beard R. W., Young B. J.** A decentralized approach to formation maneuvers // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 2003. **19**, Is. 6. P. 933.

Поступила в редакцию 5 мая 2008 г.
