

С.К. Данилова, А.М. Кусков, И.М. Кусков, Н.Н. Тарасов

### АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МПО В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

*В работе предлагается структура управления морским подвижным объектом (МПО) при движении в условиях действия возмущений, включающая фильтр с интегральными невязками. Отличительной чертой предлагаемой структуры фильтра является использование не только невязок с модели фильтра и измерительной системы, но и интегралов от этих невязок, что позволяет разделять невязки на низкочастотные и высокочастотные составляющие и обеспечивать хорошую работу системы управления в условиях действия неизвестных возмущений (ветро-волновые возмущения, возмущения от изменения плотности и температуры воды, медленно меняющиеся возмущения). Оценка неизвестных внешних возмущений осуществляется с помощью апериодического звена с постоянной времени  $T$ . Увеличение  $T$  даёт возможность получить сглаженные оценки высокочастотных возмущений и снизить, тем самым, нагрузку на органы управления. Благодаря оценкам внешних возмущений предложены более совершенные алгоритмы управления, позволяющие компенсировать как неизвестные внешние возмущения, так и неточность самой модели движения, повышая тем самым качество управления МПО. Для сглаживания управляющих воздействий в контур управления включено апериодическое звено с постоянной времени  $T_1$ . Показано, что увеличение  $T_1$  позволяет сильно снизить нагрузку на рулевое управление при сохранении качества переходных процессов. Таким образом уменьшается износ рулей и повышается скрытность маневрирования МПО. Методом полномасштабного имитационного моделирования проведены исследования влияния величины постоянных времени  $T$  и  $T_1$  на качество управления и восстановления возмущений. Предложены рекомендуемые диапазоны значений этих постоянных для обеспечения качественного управления и оценки внешних возмущений. Показано, что закон управления, использующий оценки фазовых координат, получаемых с помощью фильтра Калмана, не обеспечивает достаточного качества переходных процессов в условиях действия волновых и медленно меняющихся возмущений, в то время как фильтр с разделением невязок устраняет данный недостаток и позволяет корректировать классические законы управления и повышать качество управления МПО. Проведённое полномасштабное имитационное моделирование подтверждает работоспособность предлагаемых алгоритмов фильтрации и управления.*

*Морской подводный объект; фильтр с разделением невязок; апериодическое звено; внешние возмущения; закон управления; полномасштабное имитационное моделирование.*

S.K. Danilova, A.M. Kuskov, I.M. Kuskov, N.N. Tarasov

### ADAPTIVE CONTROL OF MMO UNDER THE INFLUENCE OF PERTURBATIONS

*The study offers the structure of marine moving object (MMO) control while maneuvering with external disturbances, that includes filter with integral closure errors. A distinctive feature of the proposed structure of the filter is the use not only of closure errors from the model of the filter and the measuring system, but also of the integrals of them, which allows make separation of residuals into low-frequency and high-frequency components and ensure good operation of the control system under the conditions of unknown perturbations (wind-wave perturbations, perturbations from changes in density and temperature of water, slowly varying perturbations). The unknown external disturbances are estimated by means of a lag element with a time constant  $T$ . An increase in  $T$  makes it possible to obtain smoothed estimates of high-frequency perturbations and thereby reduce the load on the controls. Owing to the estimation of external disturbances, more advanced control algorithms are proposed, which make it possible to compensate for both unknown external disturbances and the inaccuracy of the model of motion itself, thereby increasing the quality of control of MMO. To smooth the control actions, a lag element with a time constant*

$T_i$  is included in the control loop. It is shown that an increase of  $T_i$  makes it possible to greatly reduce the load on the steering while maintaining the quality of the transient processes. Thus, the wear of the rudders is reduced and the secrecy of maneuvering of the MPO is increased. Using the method of full-scale imitation modeling, the effects of the magnitude of the time constants  $T$  and  $T_i$  on the quality of control and restoration of perturbations were carried out. Suggested ranges of values for these constants are proposed to ensure quality of control and estimation of external disturbances. It is shown that a control law that uses estimates of the phase coordinates obtained with the help of the Kalman filter does not provide sufficient quality of transient processes under the action of wave and slowly varying perturbations, while the filter with separation of closure errors eliminates this defect and allows to correct standart laws of control and to improve the quality of control of MMOs. Realized full-scale imitation modeling confirms the feasibility of the proposed filtering and control algorithms.

*Marine moving object; filter with closure errors separation; lag element; external disturbances; control law; full-scale imitation modeling.*

**Введение.** Для качественного управления современными МПО необходима полная и точная информация, как о самом объекте, так и о внешних возмущениях, действующих на него. Для этого используются различные методы и алгоритмы фильтрации и идентификации. Наибольшее практическое применение в настоящее время получили Калмановские алгоритмы, основанные на использовании невязок между измеряемыми  $y(t)$  и оцениваемыми  $\hat{x}(t)$  параметрами движения. Среди таких алгоритмов можно отметить как оптимальный фильтр Калмана [1]; нелинейный фильтр Калмана [2]; расширенный фильтр Калмана [3]. Фильтры [1, 2] позволяют получать оценки фазовых координат объекта лишь при точной информации о моделях объекта управления и измерения, а также характеристиках входных помех и помех измерения. Для алгоритма [3] кроме перечисленной информации необходимы также данные о моделях внешних возмущений. Получение точной информации о моделях движения и возмущения является сложной задачей, требующей больших временных и материальных затрат, связанных с моделированием исследуемого объекта управления в лабораторных условиях, проведением полунатурных испытаний и уточнения параметров модели в условиях полнатурных испытаний.

Алгоритм фильтрации [4], основанный на использовании не только невязок, как в классических Калмановских алгоритмах, но интегралов от этих невязок, помогает избавиться от перечисленных выше недостатков, т.е. не требует точной информации о моделях движения МПО и возмущений, однако обладает рядом недостатков, к которым относятся более широкий набор измерительных датчиков и сложность реализации.

Предлагаемый в работе алгоритм, является разновидностью алгоритма [4, 5], позволяет устранить недостатки последнего и использовать его для реальных объектов управления. Предлагаемый алгоритм основан на разделении невязок на высоко и низкочастотные составляющие с помощью аperiodического звена. Высокочастотные составляющие, включенные в обратную связь, как и в фильтре Калмана позволяют сглаживать измеряемые координаты. Низкочастотные составляющие позволяют восстанавливать как внешние возмущения, так и незнания модели движения МПО.

**Модель объекта.** Движение МПО, как правило, описывается с помощью системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = F_m(x, a, t) + G(u) + F(t) + w, \quad (1)$$

где  $F_m(x, a, t)$  – вектор функция, описывающая состояние объекта управления,  $x = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \psi, \eta, \phi, \theta)^T$  – вектор фазовых координат, определяющий

линейные  $V_x, V_y, V_z$  и угловые  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  скорости, а также углы дифферента, курса и крена  $\Psi, \Phi, \Theta$  и глубины погружения  $\eta$ ,  $G(u)$  – известный вектор управляющих воздействий,  $F(t) + w$  – вектор внешних возмущений.

Представим модель (1) в виде

$$\dot{x} = Ax + G(u) + F(x, a, t) + w, \quad (2)$$

где  $F(x, a, t) = F_m(x, a, t) + F(t) - Ax$  — возмущение, представляющее совокупность внешнего воздействия  $F(t)$  и незнания точной модели движения  $F_m(x, a, t) - Ax$ . Такое представление модели движения позволяет выделить линейную часть  $Ax$ , гидродинамические параметры которой определяются с достаточно хорошей точностью, и нелинейную  $F(x, a, t)$ , которую можно трактовать как неизвестное возмущение. Для качественного определения гидродинамических характеристик нелинейной части необходимы, как отмечалось ранее, большие временные и материальные затраты, связанные с исследованием динамики объекта в полунатурных и натурных испытаниях

**Модель возмущений.** На объект в реальных условиях плавания действуют следующие возмущения:

а) *волновые возмущения.* Модель волновых возмущений  $F$  задается как совокупность гармоник со своими амплитудами частотами и случайными фазами, которые, в свою очередь, зависят от бальности, скорости хода и курсового угла и определяются, как правило, по данным натурных испытаний.

$$F_{by} = K_b \sum_{i=1}^n \alpha_{fyi} \sin(\omega_i t + \varphi_{fyi}) \quad (3)$$

$$M_{by} = K_b \sum_{i=1}^n \alpha_{myi} \sin(\omega_i t + \varphi_{myi})$$

$$F_{bz} = K_b \sum_{i=1}^n \alpha_{fzi} \sin(\omega_i t + \varphi_{fzi}) \quad (4)$$

$$M_{bz} = K_b \sum_{i=1}^n \alpha_{mzi} \sin(\omega_i t + \varphi_{mzi})$$

где  $\alpha_{fyi}, \alpha_{fzi}, \alpha_{mzi}, \alpha_{myi}, K_b$  – постоянные параметры, получаемые, как правило, экспериментальным путем,  $\Omega_i$  – частоты колебаний,  $\varphi_{fyi}, \varphi_{fzi}, \varphi_{mzi}, \varphi_{myi}$  – случайные начальные фазы колебаний;

б) *возмущения от изменения плотности воды* (сложная гидрологическая обстановка);

в) *медленно меняющиеся возмущения*, описываемые в виде дифференциальных уравнений [6]

$$\dot{F}_x = \xi_x, \dot{F}_y = \xi_y, \dot{F}_z = \xi_z, \quad (5)$$

где  $\xi_x, \xi_y, \xi_z$  – случайные гауссовские процессы с известными статистическими характеристиками.

**Модель измерения.** Современные измерительные комплексы позволяют определять достаточно большой объем информации о параметрах движения судна. В качестве измеряемых координат в работе рассмотрены углы дифферента  $\Psi$ ,

курса  $\phi$ , и крена  $\theta$ , линейные  $v_x, v_y, v_z$  и угловые  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  скорости, а также глубина погружения  $\eta$ . С достаточной степенью точности математическая модель системы измерения представляется в виде [6]:

$$y_{vx} = v_x + \xi_{vx}, \quad (6)$$

$$y = Cx + \xi, \quad (7)$$

где  $C$  – известная матрица наблюдений,  $y = (y_{vx}, y_{vy}, y_{vz}, y_{\omega x}, y_{\omega y}, y_{\omega z}, y_{\psi}, y_{\phi}, y_{\theta}, y_{\eta})^T$  – вектор измерений координат движения  $x = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \psi, \eta, \phi, \theta)^T$ ,  $\xi = (\xi_{vx}, \xi_{vy}, \xi_{vz}, \xi_{\omega x}, \xi_{\omega y}, \xi_{\omega z}, \xi_{\psi}, \xi_{\phi}, \xi_{\theta}, \xi_{\eta})^T$  – случайные векторные помехи измерения с известными статистическими характеристиками.

**Алгоритмы фильтрации.** Для получения оценок фазовых координат  $x = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \psi, \eta, \phi, \theta)^T$ , объекта (1) по измерениям (7), используются различные алгоритмы фильтрации. В зависимости от информации об объекте управления и возмущений наибольшую популярность в настоящее время приобрели Калмановские алгоритмы фильтрации [1–3].

а) *Калмановские алгоритмы фильтрации.* Данные фильтры используются для режимов плавания, когда имеется достоверная информация о моделях движения и возмущения. В этом случае алгоритм фильтрации принимает вид

$$\dot{\hat{x}} = F_m(\hat{x}, a, t) + G(u) + F(t) + K_n(y - C\hat{x}) \quad (8)$$

$$\hat{x}(t_0) = M[x(t_0)],$$

где коэффициенты усиления  $K_n$  определяются из уравнений Риккати

$$\dot{P} = \frac{\partial F_m(\hat{x}, a, t)}{\partial \hat{x}} P + P \frac{\partial F_m^T(\hat{x}, a, t)}{\partial \hat{x}} - PC^T R^{-1} CP + Q$$

$$K_n = (K_{ij}) = PC^T R^{-1}.$$

Данное уравнение трудно реализуемо на бортовых вычислителях и при исследованиях на аппаратно-программных стендах, поэтому вместо модели движения (1) можно рассмотреть упрощенную модель вида (2). Тогда алгоритм фильтрации примет вид

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + G(u) + F(\hat{x}, a, t) + K_o(y - C\hat{x}), \quad (9)$$

где коэффициенты усиления определяются, как и в оптимальном фильтре Калмана  $\dot{P} = \hat{A}P + P\hat{A}^T - PC^T R^{-1} CP + Q$ , причем  $K_o = (K_{ij}) = PC^T R^{-1}$ . Эти коэффициенты могут быть вычислены заранее при заданных ковариационных матрицах  $R$  и  $Q$ .

Недостатком данных алгоритмов является невысокое качество оценок параметров движения из-за неточной информации о нелинейной части модели движения и внешних возмущений  $F(x, a, t)$ .

б) *Алгоритм фильтрации с разделением невязок.* Для устранения указанных выше недостатков в данной работе предложен алгоритм фильтрации, позволяющий при неточной информации о моделях движения и возмущений получать оценки не только фазовых координат, но и оценки внешних возмущений. Предлагаемый алгоритм основан на разделении невязок  $v = y - C\hat{x}$  на высоко-  $v - v_n$  и низкочастотные составляющие  $v_n$  с помощью апериодического звена  $W = \frac{1}{Tp + 1}$ .

При этом алгоритм фильтрации примет вид:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + G(u) + K_0(v - v_n) + \hat{F} \quad \hat{x}(t_0) = M[x(t_0)] \\ \dot{v}_n &= (v - v_n) / T \quad v_n(t_0) = 0,\end{aligned}\quad (10)$$

где  $\hat{F}$  – оценки неизвестных внешних возмущений, определяемые в виде  $\hat{F} = K_1 v_n$ ,  $T$  – постоянная времени аperiodического звена, разделяющего невязку на высоко и низкочастотные составляющие. Коэффициенты усиления  $K_0$  при высокочастотных невязках определяются из уравнения Риккати  $\dot{P} = \hat{A}P + P\hat{A}^T - PC^T R^{-1} CP + Q$ , причем  $K_0 = (K_{ij}) = PC^T R^{-1}$ , как и в оптимальном фильтре Калмана, а коэффициенты  $K_1$  при низкочастотных невязках методами моделирования, причем коэффициенты  $K_1$  могут меняться в достаточно широком диапазоне, не влияя, как показало моделирование, на устойчивость рассматриваемого фильтра. Данный алгоритм отличается от классических Калмановских алгоритмов тем, что учитывает оценки внешних возмущений  $\hat{F}$ , получаемых с помощью аperiodического звена с периодом времени  $T$ .

**Алгоритмы управления.** Классические законы управления МПО описываются в виде нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{u} = f(\sigma) - k_u u, \quad (11)$$

где функция  $f(\sigma)$  описывается в виде

$$f(\sigma) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\sigma| < \sigma_0 \\ du_0(\sigma - \sigma_0) / (\sigma_1 - \sigma_0), & \text{если } \sigma_0 \leq \sigma \leq \sigma_1 \\ du_0, & \text{если } \sigma > \sigma_1 \\ du_0(\sigma + \sigma_0) / (\sigma_1 - \sigma_0), & \text{если } -\sigma_1 \leq \sigma \leq -\sigma_0 \\ -du_0, & \text{если } \sigma < -\sigma_1 \end{cases},$$

где  $u$  – управляющее воздействие,  $du_0$  определяет скорость кладки руля,  $\sigma_0, \sigma_1$  – известные величины, Если  $u > u_{\max}$ , то  $u = u_{\max}$ . Если же  $u < u_{\min}$ , то  $u = u_{\min}$ . Величины  $\sigma$  для вертикальных и горизонтальных рулей, как правило, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_x = k_x \hat{x} - k_u u = k_\eta (\hat{\eta} - \eta_{zad}) + k_{d\eta} d\hat{\eta} - k_{u\eta} u_\eta, \\ \sigma &= \sigma_x = k_x \hat{x} - k_u u = k_\psi (\hat{\psi} - \psi_{zad}) + k_{d\psi} d\hat{\psi} - k_{u\psi} u_\psi, \\ \sigma &= \sigma_x = k_x \hat{x} - k_u u = k_\phi (\hat{\phi} - \phi_{zad}) + k_{d\phi} d\hat{\phi} - k_{u\phi} u_\phi,\end{aligned}\quad (12)$$

где  $\eta_{zad}, \psi_{zad}, \phi_{zad}$  – заданные значения глубины, дифферента и курса.

Эти законы управления работают лишь в условиях отсутствия внешних возмущений и линейной модели движения. В реальной жизни движение объекта описывается системой сложных нелинейных уравнений, на который действуют внешние возмущения. Поэтому в законах управления необходимо учитывать оценки этих возмущений, получаемых с помощью алгоритма фильтрации (10).

Благодаря оценкам внешних возмущений предлагаются более совершенные алгоритмы управления (13), позволяющие компенсировать неизвестные возмущения, включающие в себя и неточность самой модели движения и тем самым повысить качество управления МПО.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_x + \sigma_f = k_x \hat{x} + k_f \hat{F} - k_u u = k_\eta (\hat{\eta} - \eta_{zad}) + k_{d\eta} d\hat{\eta} + k_p \hat{P} + k_m \hat{M} - k_{u\eta} u_\eta, \\ \sigma &= \sigma_x + \sigma_f = k_x \hat{x} + k_f \hat{F} - k_u u = k_\psi (\hat{\psi} - \psi_{zad}) + k_{d\psi} d\hat{\psi} + k_p \hat{P} + k_m \hat{M} - k_{u\psi} u_\psi, \\ \sigma &= \sigma_x + \sigma_f = k_x \hat{x} + k_f \hat{F} - k_u u = k_\phi (\hat{\phi} - \phi_{zad}) + k_{d\phi} d\hat{\phi} + k_p \hat{P} + k_m \hat{M} - k_{u\phi} u_\phi. \end{aligned} \quad (13)$$

При исследовании решаемой задачи на аппаратно-программном стенде получена зависимость коэффициента  $k_f = (k_p, k_m)^T$  от скорости движения

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

На рис. 1 представлена структурная схема системы адаптивного к возмущениям управления МПО при включении в контур управления фильтра с разделением невязок.

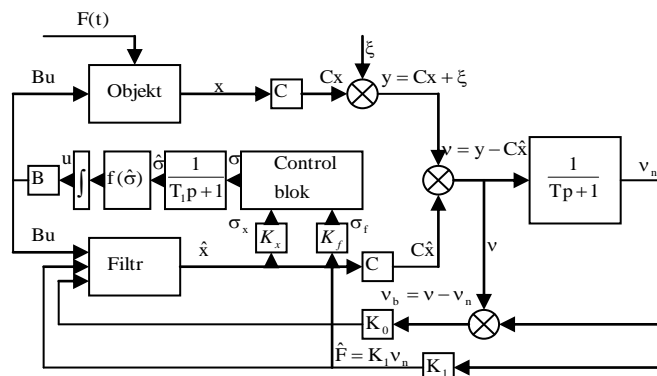


Рис. 1. Блок-схема системы управления МПО с восстановлением неизвестных внешних воздействий

Данная структура, как было сказано ранее, позволяет получать не только оценки фазовых координат  $\hat{x} = (\hat{v}_x, \hat{v}_y, \hat{v}_z, \hat{\omega}_x, \hat{\omega}_y, \hat{\omega}_z, \hat{\psi}, \hat{\phi}, \hat{\theta}, \hat{\eta})^T$  объекта в различных режимах плавания, но и восстанавливать неизвестные внешние возмущения  $\hat{F} = K_1 v_n$ , действующие на объект, с помощью апериодического звена  $W = \frac{1}{Tp + 1}$ .

Блок управления, входящий в структурную блок-схему осуществляет формирование и распределение сигналов управления  $\sigma$  для различных органов управления МПО в зависимости от величины действующих возмущений. При этом часть управляющих органов обеспечивают качество переходных процессов, а другая часть компенсирует внешние возмущения. Сглаживание сигнала управления осуществляется с помощью апериодического звена  $W = \frac{1}{T_1 p + 1}$ , входящего в структурную блок-схему.

Постоянные времени  $T$  и  $T_1$  выбирается из табл. 1 и 2 соответственно.

**Исследование точности оценивания внешних возмущений от постоянной времени апериодического звена  $T$ .** Коэффициент усиления  $K_0$  высокочастотной составляющей невязки  $v - v_n$  определяется, как отмечалось ранее, из уравнения Риккати  $\dot{P} = \hat{A}P + P\hat{A}^T - PC^T R^{-1} CP + Q$ , причем  $K_0 = (K_{ij}) = PC^T R^{-1}$  и позволяет сглаживать высокочастотные входные и помехи измерения. Эти коэффициенты зависят от статистических характеристик входных шумов и шумов измерения и сравнительно невелики.

Для восстановления внешних возмущений, представляющих собой совокупность внешних воздействий и незнания модели движения, коэффициенты усиления в обратной связи должны быть много больше коэффициентов  $K_0$ . Поэтому в работе рассмотрено разделение невязки  $V$  на высоко  $v - v_n$  и низкочастотные  $V_n$  составляющие. Рассматривая устойчивость алгоритма фильтрации (10), методом моделирования была получена зависимость точности восстановления внешних возмущений  $\Delta F = F - \hat{F}$  от времени апериодического звена  $T$ . Эта зависимость представлена в табл. 1, где  $F$  и  $\hat{F}$  – обобщенное возмущение и его оценка.

Таблица 1

**Зависимость точности восстановления внешних возмущений от времени апериодического звена**

$T(сек)$	1.0	10.0	50.0	100.0	250.0	500.0	1000.0	5000.0
$\Delta F$	2.0	0.20	0.05	0.03	0.08	0.12	0.4	0.5

Из таблицы видно, что при малых значениях времени  $T < 10.0 c$  ошибка оценивания внешних возмущений велика из-за высокочастотных помех сигнала  $V_n$ . При больших значениях  $T > 400.0 c$  ошибка оценивания возмущений также велика из-за сглаживания внешних возмущений. Поэтому рекомендуемое значение коэффициента  $T$  принадлежат отрезку  $[50 - 200c]$ .

**Исследование точности оценивания внешних возмущений от постоянной времени апериодического звена  $T_1$ .** Постоянная времени  $T_1$  апериодического звена  $W = \frac{1}{T_1 p + 1}$  существенно влияет на качество управляющего сигнала  $u(t)$ , а,

следовательно, и на качество переходных процессов.

При малых значениях величины  $T_1 \leq 5c$  управляющий сигнал представляет собой высокочастотный сигнал большой амплитуды, а при больших  $T_1 > 30c$  возникает колебательный процесс. В табл. 2 представлены ошибки оценивания фазовых координат  $\Delta x = \hat{x}_{max} - \hat{x}_{min}$ , амплитуды  $\Delta u = u_{max} - u_{min}$  и частоты колебаний управляющего сигнала  $u(t)$  в зависимости от скорости движения и от изменения постоянной времени  $T_1$ .

Таблица 2

**Ошибки оценивания фазовых координат движения МПО**

$V$	$T_1$	$\Delta u = u_{max} - u_{min}$	$\Delta x = \hat{x}_{max} - \hat{x}_{min}$	$\nu$
5	5	12	1	0,09
	10	10	2	0,07
	15	8	3	0,04
	20	6	4	0,03
	25	3	5	0,02
	30	5	6	0,02
7	5	11	0,5	0,06
	10	6	1	0,04
	15	5	2	0,03
	20	4	1	0,02
	25	6	6	0,02
	30	10	26	0,02
10	5	8	0	0,05
	10	3	1	0,03
	15	5	6	0,02

Однако, точные значения оценок возмущения, подаваемых на регулятор, приводят управляющие органы, повторяющие эти возмущения, к быстрому износу. Менее же точные, но более гладкие оценки внешних возмущений позволяют управляющим органам работать в щадящем режиме. Поэтому рекомендуемое значение постоянной времени апериодического звена  $T_1$  принадлежит интервалу  $[10 - 20c]$ .

**О выборе матрицы  $A$  в модели фильтра.** Важным вопросом в выборе модели фильтра  $\dot{x} = Ax + G(u) + F(x) + w$  является точность элементов матрицы  $A$ . В идеальном случае они представляют собой линеаризованные характеристики гидродинамических параметров полной модели движения МПО. Если в Калмановских алгоритмах фильтрации неточный выбор элементов матрицы состояния  $A$  влияет на качество оценок фазовых координат, то в предлагаемом фильтре точная информация о матрице состояния не важна, т.к. величина  $Ax$  входит в обобщенное возмущение, восстанавливается в текущем времени и используется в законах управления.

**Моделирование.** Моделирование алгоритмов фильтрации и управления проводилось на модели движения МПО, описываемой нелинейной системой дифференциальных уравнений (1) при действии волновых (4) и медленно меняющихся (5) возмущений. В качестве модели фильтра рассматривалась линейная модель (2) с неизвестными внешними возмущениями.

**Сравнительные характеристики работы Калмановских алгоритмов и алгоритма с разделением невязок.** На рис. 2 представлены переход МПО с глубины 20 м. на 50 м., вертикальные рули  $U_b$  и ошибка оценивания глубины  $\Delta\eta = \hat{\eta} - \eta$ , полученных с помощью фильтра Калмана, а на рис. 3 изображены аналогичные параметры, полученные с помощью фильтра с разделением невязок.

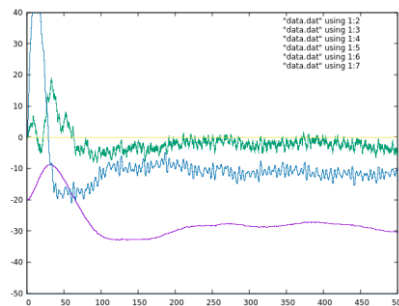


Рис. 2. Переход по глубине с 20 на 50 м. Вертикальные рули  $U_b$  и ошибка оценивания глубины  $\Delta\eta = \hat{\eta} - \eta$  с использованием фильтра Калмана

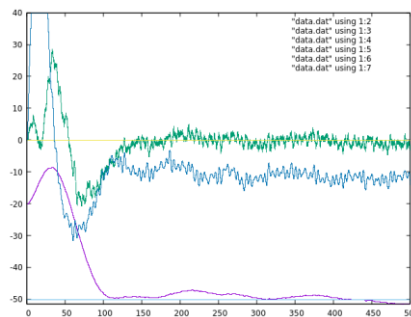


Рис. 3. Переход по глубине с 20 на 50 м., вертикальные рули  $U_b$  и ошибка оценивания глубины  $\Delta\eta = \hat{\eta} - \eta$  с использованием фильтра с разделением невязок



Из рисунков видно, что качество оценок фазовых координат в последнем случае намного выше т.к. ошибки оценивания являются несмещенными. Это хорошо видно на переходных процессах МПО по глубине. Закон управления (11), использующий оценки фазовых координат, получаемых с помощью фильтра Калмана, не обеспечивает требуемого качества переходных процессов (рис. 2). В то же время закон управления (12) с оценками, получаемыми с помощью фильтра с разделением невязок, устраняет данный недостаток благодаря восстановлению внешних возмущений, включающих в себя как незнание модели движения, так и внешние воздействия среды (рис. 3). Эти оценки позволяют корректировать классические законы управления (11) и повышать качество управления МПО.

**Оценивание неизвестных внешних возмущений.** Оценка неизвестных внешних возмущений осуществляется с помощью апериодического звена с постоянной времени  $T$ . На рис. 4 изображены: обобщенное внешнее возмущение  $F$ , включающее в себя медленно меняющиеся и волновые возмущения, а также неточность модели движения и ошибка оценки возмущений  $\Delta F = F - \hat{F}$  при постоянной  $T = 50c$ . На рис. 5 представлены обобщенное внешнее возмущение  $F$  и его оценка  $\hat{F}$  при  $T = 5000c$ .

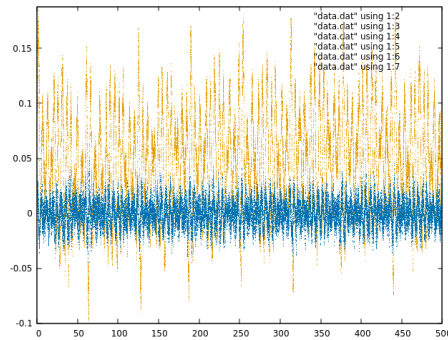


Рис. 4. Обобщенное внешнее возмущение и ошибка оценка возмущения при  $T=50 c$

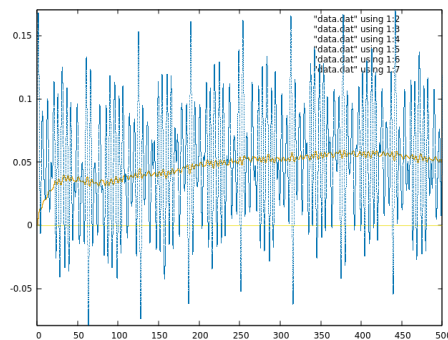


Рис. 5. Обобщенное внешнее возмущение и его оценка при  $T 5000 c$

Из рисунков видно, что при малых  $T$  оценки внешних возмущений достаточно хорошо приближаются к истинным возмущениям (рис. 4). Однако использование таких оценок приводит к быстрому износу управляющих органов, т.к. высокочастотный сигнал проходит на регулятор. Для устранения данного недостатка используется апериодическое звено с большим временем  $T$ , где оценка возмущений носит осредненный более плавный характер.

**Уменьшение нагрузки на управляющие органы.** На управляющие органы поступает сигнал  $\sigma = k_x \hat{x} + k_f \hat{F} - k_u u$ , зависящий как от оценок фазовых координат, так и от оценок внешних возмущений. Сглаживание оценок внешних возмущений осуществляется, как было показано выше, с помощью аperiodического звена  $T$ , а для сглаживания управляющих воздействий аperiodическое звено с постоянной времени  $T_1$ .

На рис. 6 изображены вертикальные рули  $U_b$  и переходной процесс по глубине с 20 м на 50 м при постоянной времени  $T_1 = 0$  с., а на рис. 7 аналогичные процессы при  $T_1 = 15$  с.

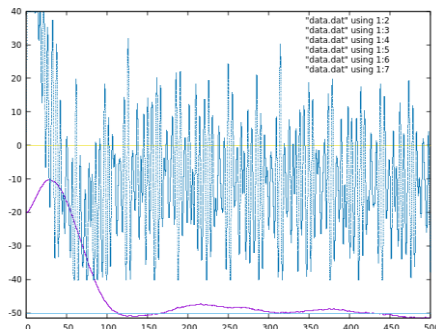


Рис. 6. Вертикальные рули  $U_b$  и переход по глубине при  $T_1 = 0$  с

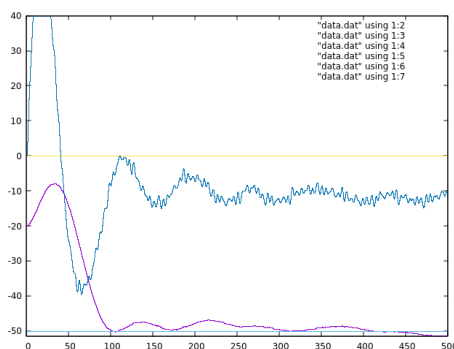


Рис. 7. Вертикальные рули  $U_b$  и переход по глубине при  $T_1 = 15$  с

Из рисунков видно, что качество переходных процессов практически не меняется, а износ рулей во втором случае намного меньше, что в свою очередь приводит к более малозумному движению.

#### Выводы

1. Предложен алгоритм фильтрации, позволяющий восстанавливать не только фазовые координаты, но и неизвестные внешние возмущения, включающие в себя как внешние воздействия со стороны моря, так и неточность модели движения МПО. Рассматриваемые алгоритмы основаны на разделении невязок на высоко и низкочастотные составляющие с использованием аperiodического звена первого порядка.

2. Рассмотрены возможные и рекомендуемые диапазоны изменения постоянной времени  $T$  апериодического звена, позволяющего получать оценки неизвестных возмущений.
3. Получена возможность влиять на качество управляющего сигнала помощью апериодического звена с постоянной времени  $T_1$  для уменьшения нагрузки на управляющие органы и уменьшения шумности управляемого объекта.
4. Предложенные алгоритмы фильтрации позволяют модифицировать классические законы управления, за счет введения в них не только оценок фазовых координат, но и оценок внешних возмущений, что, в свою очередь, позволяет повысить качество управления МПО за счет устранения статистических погрешностей.
5. Проведенное полномасштабное моделирование подтверждает работоспособность предлагаемых алгоритмов фильтрации и управления.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Квакернаак Х., Сиван Р.* Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 656 с.
2. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Мир, 1980. – 407 с.
3. *Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л.* Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974. – 248 с.
4. *Тарасов Н.Н., Тахтамышев М.Г.* Алгоритмы получения несмещенных оценок при действии неизвестных внешних возмущений // Проблемы управления. – 2012. – № 6. – С. 69-74.
5. *Данилова С.К., Тарасов Н.Н., Кусков И.М.* Управление подводным аппаратом при неполной информации о модели движения и внешних возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 354-360.
6. *Евланов Л.Г.* Контроль динамических систем. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
7. *Коуэн К.Ф.Н., Грант П.М.* Адаптивные фильтры. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
8. *Джонсон С.* Теория регуляторов, приспособляющихся к возмущениям. В кн. Фильтрация и стохастическое управление динамических системах / под ред. Леондеса К.Т. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
9. *Мартин У., Стабберуд А.* Процесс обновления в задачах идентификации. В кн. Фильтрация и стохастическое управление динамических системах / под ред. Леондеса К.Т. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
10. *Казаков И.Е., Артемьев В.М.* Оптимизация динамических систем случайной структуры. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
11. *Клячко Л.М., Тарасов Н.Н., Острецов Г.Э.* Алгоритмы фильтрации с интегральными невязками при управлении судном в условиях развитого волнения // Морской вестник. – 2014. – № 1 (49).
12. *Данилова С.К., Кусков И.М.* Теоретические и методические основы анализа и синтеза оперативного управления БЖКС // Автоматизация процессов борьбы за живучесть корабля, судна. Коллективная монография. – СПб.: ИАП БЖКС, эл. изд. второе, испр. и доп., 2015. – С. 319-335.
13. *Васильев С.Н., Данилова С.К.* Имитационное моделирование как метод исследования и проектирования комплексной системы управления классом морских подводных объектов // Труды 6-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2013, Казань). – Казань: Изд-во «ФЭН» Академии наук РТ, 2013. – № 1. – С. 35-45.
14. *Данилова С.К., Лапицкий А.Д., Миненок А.Е.* Интеллектуальные компьютерные технологии проектирования перспективных систем управления одним классом многоцелевых морских подвижных объектов // Материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Седьмой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах»: в 2 т. Т. I. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 137-149.

15. Данилова С.К., Кусков А.М., Кусков И.М., Тарасов Н.Н. Модель движения и управления ТНПА в сложной динамической системе // Материалы десятой всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" и шестой молодежной школы-семинара "Управление и обработка информации в технических системах": в 2 т. Т. 1. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 125-139.
16. Шлейер Г.Э., Борисов В.Г. Управление движением морских и речных судов. – М.: ИПУ, 1981. – 62 с.
17. Лукомский Ю.А., Корчанов В.М. Управление морскими подвижными объектами. – СПб.: Изд-во «Элмор», 1996. – 320 с.
18. Данилова С.К., Борисов В.Г. Методология исследования и разработки многорежимной комплексной алгоритмической структуры системы управления морскими эргатическими объектами // Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог-Домбай, 2013). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 228-236.
19. Данилова С.К., Борисов В.Г. Среда моделирования для создания интеллектуальных средств поддержки операторов управления морскими подводными объектами // Труды 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог, 2012). – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 254-259.
20. Аминев Б.Д., Громов П.С., Кусков И.М., Латицкий А.Д., Миненок А.Е., Хримпач К.М. К постановке проблемы разработки системы интеллектуального управления морским подводным объектом в нормальных и аварийных целях эксплуатации // Труды 7-ой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог, 2012). – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 227-233.

## REFERENCES

1. Kvakernaak Kh., Sivan R. Lineynye optimal'nye sistemy upravleniya [Linear optimal control systems]. Moscow: Mir, 1977, 656 p.
2. Fil'tratsiya i stokhasticheskoe upravlenie v dinamicheskikh sistemakh [Filtration and stochastic management in dynamic systems], ed. by K.T. Leondes. Moscow: Mir, 1980, 407 p.
3. Seydzh E.P., Melsa Dzh.L. Identifikatsiya sistem upravleniya [Identification of control systems]. Moscow: Nauka, 1974, 248 p.
4. Tarasov N.N., Takhtamyshev M.G. Algoritmy polucheniya nesmeshchennykh otsenok pri deystvii neizvestnykh vneshnikh vozmushcheniy [Algorithms for obtaining unbiased estimates under the action of unknown external disturbances], *Problemy upravleniya* [Problems of management], 2012, No. 6, pp. 69-74.
5. Upravlenie podvodnym apparatom pri ne-polnoy informatsii o modeli dvizheniya i vneshnikh vozmushcheniy [Control of underwater vehicle with non-complete information about the motion model and external disturbances], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2016, Vol. 17, No. 5, pp. 354-360.
6. Evlanov L.G. Kontrol' dinamicheskikh sistem [Control of dynamic systems]. Moscow: Nauka, 1979, 432 p.
7. Kouen K.F.N., Grant P.M. Adaptivnye fil'try [The adaptive filters]. Moscow: Mir, 1988, 392 p.
8. Dzhonson S. Teoriya regulyatorov, prispособlivayushchikhsya k vozmushcheniyam [The theory of regulators to adapt to disturbances], *V kn. Fil'tratsiya i stokhasticheskoe upravlenie dinamicheskikh sistemakh* [In the book. Filtering and stochastic control of dynamical systems], ed. by Leondes K.T. Moscow: Mir, 1980, 406 p.
9. Martin U., Stabberud A. Protsess obnovleniya v zadachakh identifikatsii [The upgrade process in the task identification], *V kn. Fil'tratsiya i stokhasticheskoe upravlenie dinamicheskikh sistemakh* [In the book. Filtering and stochastic control of dynamical systems], ed. by Leondes K.T. Moscow: Mir, 1980, 406 p.
10. Kazakov I.E., Artem'ev V.M. Optimizatsiya dinamicheskikh sistem sluchaynoy struktury [Optimization of dynamic systems with random structure]. Moscow: Nauka, 1980, 384 p.
11. Klyachko L.M., Tarasov N.N., Ostretsov G.E. Algoritmy fil'tratsii s integral'nymi nevyazkami pri upravlenii sudnom v usloviyakh razvitogo volneniya [Filtering with integrated residuals in the management of the vessel in terms of developed disturbances], *Morskoy vestnik* [Herald of the Sea], 2014, No. 1 (49).

12. Danilova S.K., Kuskov I.M. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy analiza i sinteza operativnogo upravleniya BZhKS [Theoretical and methodological foundations of analysis and synthesis of operational management.], *Avtomatizatsiya protsessov bor'by za zhivuchest' korablya, sudna. Kollektivnaya monografiya* [Automation of processes of struggle for survivability of the ship, ship. The collective monograph]. St. Petersburg: IAP BZhKS, electronic second edition, revised and enlarged, 2015, pp. 319-335.
13. Vasil'ev S.N., Danilova S.K. Imitatsionnoe modelirovanie kak metod issledovaniya i proektirovaniya kompleksnoy sistemy upravleniya klassom morskikh podvodnykh ob"ektov [Simulation as a research method and designing a comprehensive system of classroom management of subsea objects], *Trudy 6-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2013, Kazan')* [Proceedings of 6-th all-Russian scientific-practical conference "simulation. Theory and practice" (IMMOD-2013, Kazan)]. Kazan: Izd-vo «FEN» Akademii nauk RT, 2013, No. 1, pp. 35-45.
14. Danilova S.K., Lapitskiy A.D., Minenok A.E. Intellektual'nye kompyuternye tekhnologii proektirovaniya perspektivnykh sistem upravleniya odnim klassom mnogotselevykh morskikh podvizhnykh ob"ektov [Intellectual computer technologies of designing advanced control systems for a class of multi-purpose marine mobile objects], *Materialy Odinnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» i Sed'moy molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Proceedings of Eleventh all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems" and on the Seventh youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]: in 2 vol. Vol. I. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2016, pp. 137-149.
15. Danilova S.K., Kuskov A.M., Kuskov I.M., Tarasov N.N. Model' dvizheniya i upravleniya TNPA v slozhnoy dinamicheskoy sisteme [Model the movement and management of TNLA in a complex dynamic system], *Materialy desyatoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" i shestoy molodezhnoy shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"* [Materials tenth all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems" and the sixth youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]: in 2 vol. Vol. 1. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 125-139.
16. Shleyer G.E., Borisov V.G. Upravlenie dvizheniem morskikh i rechnykh sudov [Motion control of marine and river vessels]. Mjscow: IPU, 1981, 62 p.
17. Lukomskiy Yu.A., Korchanov V.M. Upravlenie morskimi podvizhnymi ob"ektami [Management of marine mobile objects]. St. Petersburg: Izd-vo «Elmor», 1996, 320 p.
18. Danilova S.K., Borisov V.G. Metodologiya issledovaniya i razrabotki mnogorezhimnoy kompleksnoy algoritmicheskoy struktury sistemy upravleniya morskimi ergaticheskimi ob"ektami [The methodology of the research and development of multi-mode integrated algorithmic structure systems management of marine ergatic objects], *Materialy 8-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» (Taganrog-Dombay, 2013)* [Materials of the 8th all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems" (Taganrog-Dombay, 2013)]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, pp. 228-236.
19. Danilova S.K., Borisov V.G. Sreda modelirovaniya dlya sozdaniya intellektual'nykh sredstv podderzhki operatorov upravleniya morskimi podvodnymi ob"ektami [Simulation environment for intelligent support tools to operators in the management of marine underwater objects], *Trudy 7-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» (Taganrog, 2012)* [Proceedings of 7-th all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems" (Kazan, 2012)]. Taganrog: TTI YuFU, 2012, pp. 254-259.
20. Aminev B.D., Gromov R.S., Kuskov I.M., Lapitskiy A.D., Minenok A.E., Khrimpach K.M. K postanovke problemy razrabotki sistemy intellektual'nogo upravleniya morskim podvodnym ob"ektom v normal'nykh i avariynykh tselyakh ekspluatatsii [Problem statement developing a system of intelligent management of the marine underwater object in normal and emergency exploitation], *Trudy 7-oy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya» (Taganrog, 2012)* [Proceedings of 7-th all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems" (Kazan, 2012)]. Taganrog: TTI YuFU, 2012, pp. 227-233.

Статья рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.М. Глумов.

**Данилова Светлана Кузьминична** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН; e-mail: lab45\_1@ipu.ru; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: +79151387098; к.т.н.; в.н.с.

**Кусков Антон Михайлович** – e-mail: ravenkus2@gmail.com; тел.: +79067520757; старший инженер-программист.

**Кусков Иван Михайлович** – e-mail: butovokus@gmail.com; тел.: +79639627801; ведущий инженер-программист.

**Тарасов Николай Николаевич** – e-mail: tnn53@rambler.ru; тел.: +74996172900; к.т.н.; с.н.с.

**Danilova Svetlana Kuzminichna** – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: lab45\_1@ipu.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +79151387098; cand. of eng. sc.; leading researcher.

**Kuskov Anton Mikhailovich** – e-mail: ravenkus2@gmail.com; phone: +79067520757; senior software engineer.

**Kuskov Ivan Mikhailovich** – e-mail: butovokus@gmail.com; phone: +79639627801; leading software engineer.

**Tarasov Nikolai Nikolaevich** – e-mail: tnn53@rambler.ru; phone: +74996172900; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 004.003, 004.896:62-5: 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-234247

**В.И. Городецкий, О.В. Карсаев**

### **САМООРГАНИЗАЦИЯ ГРУППОВОГО ПОВЕДЕНИЯ КЛАСТЕРА МАЛЫХ СПУТНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ**

*Системы комического наблюдения являются важным источником информации, необходимой для оперативного решения широкого круга задач гражданского и военного назначения. Эффективность функционирования таких систем зависит от многих факторов. Наряду с множеством технических, информационных, технологических, инфраструктурных, экономических и других факторов, их эффективность в значительной степени зависит от качества планирования миссий космических аппаратов и управления в реальном времени процессом исполнения миссии. В работе сформулирована проблема построения самоорганизующейся системы группового управления поведением кластера малых спутников, реализующего автономное исполнение заявок на сервис по добычанию информации о наземных объектах средствами космического наблюдения. В ней предлагается новая концепция группового управления в системе космического наблюдения. В основу этой концепции положен принцип самоорганизации группового поведения кластера спутников. Такая система управления оказывается в состоянии реализовать автономное планирование и оперативное управление космической группировкой, в которой все базовые функции процесса управления реализуются ее бортовыми средствами. Теоретический фундамент этой концепции строится на моделях коллективной робототехники, которые в настоящее время активно развиваются в области многоагентных систем. В работе приведен краткий обзор современного состояния исследований в области систем управления кластерами малых спутников, дана достаточно общая постановка задачи, в которой кластер малых спутников рассматривается как полностью автономная система, предназначенная для выполнения заказов на сбор и доставку космической информации о наземных объектах. При этом полагается, что система управления самостоятельно в реальном времени распределяет задачи наблюдения на множестве спутников группировки, планирует и составляет расписание выполнения наблюдений в соответствии с пространственно-временными требованиями заказчика, выполняет оперативное управление распределенным исполнением построенного расписания и выполняет коррекцию распределения задач и*