

УДК 629.5.061

А.В. Маттис

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Маттис Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, окончил машиностроительный факультет Ульяновского государственного технического университета по специальности «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств». Заместитель главного конструктора ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет публикации в области моделирования и разработки АСУ. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

В статье синтезируются алгоритмы оптимального управления и оценивания параметров движения морского комплекса, состоящего из надводного судна и подводного аппарата (ПА). Приводятся результаты моделирования движения комплекса на ЭВМ.

Ключевые слова: моделирование, оптимальное управление, система автоматического управления движением, координированное управление движением, судно, подводный аппарат.

Alexey Valeryevich Mattis, Candidate of Engineering, graduated from the Faculty of Machine-Building at the Ulyanovsk State Technical University in the profession 'Technology, Equipment and Automation of Machine-Building Productions'; deputy chief designer of FRPC OJSC 'RPA 'Mars'; author of papers in the field of modeling and development of C2 systems. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article synthesizes algorithms of optimal control and evaluation of maritime-system movement parameters, which consists of a surface vessel and an under-water vehicle. It also cites the results of modeling of the system movement using computers.

Key words: modeling, optimal control, system of automatic movement-control, coordinated movement-control, vessel, under-water vehicle.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для проведения подводных океанологических исследований создаются и широко используются морские подвижные комплексы (МПК), состоящие из надводного судна и необитаемого подводного аппарата. Работа комплекса происходит, как правило, в условиях случайных ветро-волновых возмущений, поверхностных и подводных течений, сопровождается ошибками в определении местоположения судна и ПА и характеризуется высокой сложностью управления. Для повышения эффективности работ создаются различные системы автоматического управления движением (САУД), реализующие режимы отслеживания заданной траектории и динамического позиционирования.

Однако существующие системы управления (СУ) ориентированы на относительно простые, в основном, прямолинейные, траектории, задаваемые набором путевых точек в базовой (неподвижной) системе координат (СК). Управление движением при этом реализуется в связанной с объектом (подвижной) СК и сводится, по сути, к управлению только курсом. При этом алгоритмы координированного управления движением комплекса в базовой СК исследованы недостаточно. Также не исследованы алгоритмы сов-

местного оценивания параметров движения судна и ПА. Вместе с тем, именно создание, моделирование и оптимизация алгоритмов совместного оценивания параметров и координированного управления в базовой СК позволит обеспечить движение комплекса с высокой точностью по различным криволинейным траекториям, что приведет к уменьшению затрат на проведение исследований Мирового океана.

ТИПОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Рассмотрим типовую СУ движением комплекса по заданной траектории (рис. 1), содержащую два независимых контура управления для судна и ПА соответственно.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: ИНС – инерциальная навигационная система; СНС – спутниковая навигационная система; ГАНС – гидроакустическая навигационная система; ГАЛ – гидроакустический лаг.

Измерения спутниковой и инерциальной навигационных систем совместно с заданной траекторией судна поступают на вход вычислительного блока, где с использованием алгоритмов оценивания и управления формируются управляющие воздействия и выдаются на исполнительные механизмы.



Рис. 1. Схема типовой СУ движением комплекса по заданной траектории

Подобная схема используется и при управлении движением ПА. Отличительной особенностью здесь является отсутствие измерений абсолютных координат ПА, поэтому существующие СУ движением ПА реализуют, как правило, только режим удержания заданной позиции относительно судна по измерениям ГАНС.

Отметим, что важнейшими элементами СУ являются модели движения судна и ПА. Рассмотрим модели более подробно.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

Модель пространственного движения в общем случае описывается системой 12 обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений для координат центра масс, углов Эйлера, составляющих линейной и угловой скоростей в связанной СК [1–3]. Эта модель чрезвычайно сложна для синтеза алгоритмов.

Для упрощения будем рассматривать движение комплекса в горизонтальной плоскости: судна – по поверхности воды, ПА – на заданной глубине. При этом будем использовать базовую СК, начало которой связано с некоторой точкой на поверхности Земли, ось $O_g X_g$ направлена на Север, ось $O_g Z_g$ – на Восток; и связанную СК, начало

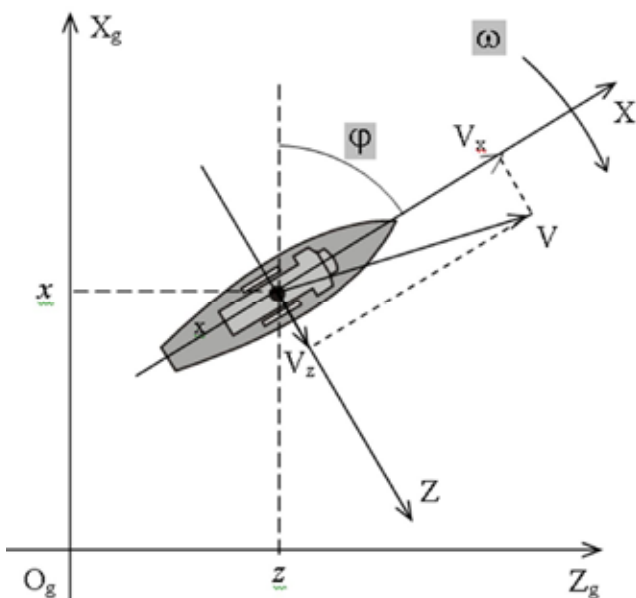


Рис. 2. Базовая и связанная системы координат

которой совмещено с центром масс объекта, ось OX направлена вдоль диаметральной плоскости, ось OZ – перпендикулярно OX в направлении правого борта (рис.2).

Параметры линейной и угловой скоростей объекта определяются с помощью уравнений динамики в связанной СК:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= \frac{1}{m_x} (F_x - m_z V_z \omega_y - \lambda_{35} \omega_y^2), \\ \frac{dV_z}{dt} &= \frac{1}{m_z} (F_z + m_x V_x \omega_y), \\ \frac{d\omega_y}{dt} &= \frac{1}{J_y} (M_y - (m_x - m_z) V_x V_z + \lambda_{35} V_x \omega_y); \end{aligned} \tag{1}$$

а координаты и курс – с помощью кинематических уравнений связи:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= V_x \cos \varphi - V_z \sin \varphi, \\ \frac{dz}{dt} &= V_x \sin \varphi + V_z \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \omega_y. \end{aligned} \tag{2}$$

В приведенных уравнениях используются следующие обозначения: m – масса; J_{yy} – момент инерции; λ_{ij} – присоединенные массы и моменты инерции; V_x, V_z, ω_y – составляющие линейной и угловой скорости в связанной СК; F_x, F_z, M_y – составляющие вектора и момента внешних сил, представляющие собой сумму сил тяги и сил сопротивления.

Использование моделей в связанной СК для реализации управления движением элементом комплекса по произвольным криволинейным траекториям вызывает значительные трудности, поэтому необходимо разработать модели в базовой СК.

Для этого запишем выражения (3) для составляющих скорости судна в базовой СК:

$$\begin{aligned} V_{xg} &= V_x \cos \varphi - V_z \sin \varphi, \\ V_{zg} &= V_x \sin \varphi + V_z \cos \varphi. \end{aligned} \tag{3}$$

Найдем связь (3) со значениями линейного и углового ускорения объекта в связанной СК, определяемыми правыми частями уравнения (1). Для этого продифференци-

руем по времени соотношения (3):

$$\begin{aligned} \frac{dV_{xg}}{dt} &= \frac{dV_x}{dt} \cos \varphi - V_x \sin \varphi \omega - \\ &\quad - \frac{dV_z}{dt} \sin \varphi - V_z \cos \varphi \omega, \\ \frac{dV_{zg}}{dt} &= \frac{dV_x}{dt} \sin \varphi + V_x \cos \varphi \omega + \\ &\quad + \frac{dV_z}{dt} \cos \varphi - V_z \sin \varphi \omega. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом (3) выражение (4) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dV_{xg}}{dt} &= \frac{dV_x}{dt} \cos \varphi - \frac{dV_z}{dt} \sin \varphi - \omega V_{zg}, \\ \frac{dV_{zg}}{dt} &= \frac{dV_x}{dt} \sin \varphi + \frac{dV_z}{dt} \cos \varphi + \omega V_{xg}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив в (5) формулы (1) с учетом (2), получим:

$$\frac{dx}{dt} = V_{xg}, \quad \frac{dz}{dt} = V_{zg}, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega_y. \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_{xg}}{dt} &= \frac{1}{m_x} (F_x - m_z V_z \omega_y - \lambda_{35} \omega_y^2) \cos \varphi - \\ &\quad - \frac{1}{m_z} (F_z + m_x V_x \omega_y) \sin \varphi - \omega V_{zg}, \\ \frac{dV_{zg}}{dt} &= \frac{1}{m_x} (F_x - m_z V_z \omega_y - \lambda_{35} \omega_y^2) \sin \varphi + \\ &\quad + \frac{1}{m_z} (F_z + m_x V_x \omega_y) \cos \varphi + \omega V_{xg}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J_y} (M_y - (m_x - m_z) V_x V_z + \lambda_{35} V_x \omega_y). \end{aligned} \quad (7)$$

Выражения 6, 7 являются математической моделью движения в базовой СК.

Для реализации моделей на ЭВМ необходимо записать их в дискретном времени с помощью замены производных конечными разностями.

Объединим кинематические параметры движения объекта в связанной СК в один вектор:

$$\bar{x} = (x, z, \varphi, V_x, V_z, \omega)^T \quad (8)$$

и запишем математическую модель движения в связанной СК в дискретном времени:

$$\bar{x}_i = F_{i-1} \cdot \bar{x}_{i-1} + B_{i-1} \cdot \bar{u}_{i-1} \quad i = i_0, i_0+1, \dots, i_N \quad (9)$$

$$F_{i-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cos(\varphi_{i-1}) \cdot \Delta t & -\sin(\varphi_{i-1}) \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \sin(\varphi_{i-1}) \cdot \Delta t & \cos(\varphi_{i-1}) \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B_{i-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \Delta t / m_x & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t / m_z & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t / J_y \end{pmatrix},$$

$$\bar{u}_{i-1} = (F_x - m_z V_z \omega_y - \lambda_{35} \omega_y^2, F_z + m_x V_x \omega_y, M_y - (m_x - m_z) V_x V_z + \lambda_{35} V_x \omega_y)^T.$$

По аналогии запишем выражения для математической модели в базовой СК в дискретном времени.

$$\bar{x} = (x, z, \varphi, V_{xg}, V_{zg}, \omega)^T. \quad (10)$$

$$\bar{x}_i = F_{i-1} \cdot \bar{x}_{i-1} + B_{i-1} \cdot \bar{u}_{i-1}, \quad i = i_0, i_0+1, \dots, i_N \quad (11)$$

где

$$B_{i-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\cos(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_x} & -\frac{\sin(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_z} & 0 \\ \frac{\sin(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_x} & \frac{\cos(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_z} & 0 \\ 0 & 0 & dt / J_y \end{pmatrix},$$

$$\bar{u}_{i-1} = (F_x - m_z V_z \omega_y - \lambda_{35} \omega_y^2, F_z + m_x V_x \omega_y, M_y - (m_x - m_z) V_x V_z + \lambda_{35} V_x \omega_y)^T.$$

Для определения необходимого интервала дискретизации было проведено исследование погрешности, возникающей при моделировании движения на больших интервалах времени.

В результате исследования установлено, что с уменьшением интервала дискретизации результаты моделирования движения в базовой СК стремятся к результатам, полученным с использованием модели в связанной СК (табл. 1). Однако при одном и том же интервале дискретизации модели в базовой СК проигрывают моделям в связанной СК по точности и по количеству вычислительных операций.

Таблица 1

Погрешности моделирования движения судна в связанной и базовой СК на больших интервалах времени

Интервал дискретизации, с	Погрешность определения координат за 3600 с, м	
	Модель в связанной СК	Модель в базовой СК
0,0039	44,69	203,30
0,002	21,91	96,44
0,001	10,72	46,86
0,0005	5,17	22,97
0,0002	2,41	11,25
0,0001	1,03	5,44

Примечания: 1) Использовался простой одношаговый метод интегрирования;

2) Сравнение с результатами моделирования движения в связанной СК с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка с интервалом дискретизации 0,0001 с.

Таким образом, разработанные математические модели движения в базовой СК могут использоваться для имитации движения на малых интервалах времени, например, при разработке рекуррентных алгоритмов оценивания и управления.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ КОМПЛЕКСА ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

Рассмотрим теперь решение задачи оптимального управления движением морского комплекса по заданной траектории с использованием разработанной модели в базовой СК.

Модели движения судна и ПА описываются выражением (12).

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}_s}{dt} &= F_s(t)\bar{x}_s(t) + B_s(t)\bar{u}_s(t) + \bar{\xi}_s(t), \\ \frac{d\bar{x}_a}{dt} &= F_a(t)\bar{x}_a(t) + B_a(t)\bar{u}_a(t) + \bar{\xi}_a(t). \end{aligned} \tag{12}$$

Требуемые траектории движения судна и ПА в базовой СК зададим уравнением (13), определяющим распределение требуемых параметров движения во времени. Заметим, что с помощью выражения (13) можно задать практически любые траектории [4].

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}_{Ts}}{dt} &= F_{Ts}(t)\bar{x}_{Ts}(t) + \bar{\xi}_{Ts}(t), \\ \frac{d\bar{x}_{Ta}}{dt} &= F_{Ta}(t)\bar{x}_{Ta}(t) + \bar{\xi}_{Ta}(t). \end{aligned} \tag{13}$$

Поставим основной задачей управления минимизацию локального квадратичного критерия качества управления, характеризующего точность и экономичность системы (14). Здесь Q – весовая функция ошибок оценивания параметров движения по заданной траектории; K – матрица, определяющая затраты энергии на управление.

$$I = M \left\{ (\bar{x}_T(t) - \bar{x}(t))^T Q (\bar{x}_T(t) - \bar{x}(t)) + \int_0^t \bar{u}(t)^T K \bar{u}(t) dt \right\}. \tag{14}$$

Тогда оптимальное управление будет находиться по формулам (15):

$$\begin{aligned} \bar{u}_s(t) &= -K_s^{-1} B_s^T Q_s (\bar{x}_{Ts}(t) - \hat{x}_s(t)), \\ \bar{u}_a(t) &= -K_a^{-1} B_a^T Q_a (\bar{x}_{Ta}(t) - \hat{x}_a(t)). \end{aligned} \tag{15}$$

Следует отметить, что выбор приведенного функционала качества и законов управления обусловлен их успешным использованием в авиационных системах управления.

Такие же выражения для оптимального управления можно получить и в дискретном времени.

Модель:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{si} &= F_{s(i-1)}\bar{x}_{s(i-1)} + B_{s(i-1)}\bar{u}_{s(i-1)} + \bar{\xi}_{si}, \\ \bar{x}_{ai} &= F_{a(i-1)}\bar{x}_{a(i-1)} + B_{a(i-1)}\bar{u}_{a(i-1)} + \bar{\xi}_{ai}, \\ i &= i_0, i_0+1, \dots, i_N \end{aligned} \tag{16}$$

Требуемая траектория:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{Tsi} &= F_{Ts(i-1)}\bar{x}_{Ts(i-1)} + \bar{\xi}_{Tsi}, \\ \bar{x}_{Tai} &= F_{Ta(i-1)}\bar{x}_{Ta(i-1)} + \bar{\xi}_{Tai}. \end{aligned} \tag{17}$$

Локальный критерий качества управления:

$$I = M \left\{ (\bar{x}_{Ti} - \bar{x}_i)^T Q (\bar{x}_{Ti} - \bar{x}_i) + \sum_{k=1}^i \bar{u}_k^T K \bar{u}_k \right\}, \tag{18}$$

$$\text{где } Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_x & 0 & 0 & q_{Vx} & 0 & 0 \\ 0 & q_z & 0 & 0 & q_{Vz} & 0 \\ 0 & 0 & q_\phi & 0 & 0 & q_\omega \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_z & 0 \\ 0 & 0 & k_\phi \end{pmatrix}.$$

Оптимальное управление:

$$\begin{aligned} u_{s(i-1)} &= (K_s + B_{s(i-1)}^T Q_s B_{s(i-1)})^{-1} \times \\ &\quad \times B_{s(i-1)}^T Q_s (F_{Ts} \bar{x}_{Ts(i-1)} - F_{si} \hat{x}_{s(i-1)}), \\ u_{a(i-1)} &= (K_a + B_{a(i-1)}^T Q_a B_{a(i-1)})^{-1} \times \\ &\quad \times B_{a(i-1)}^T Q_a (F_{Tai} \bar{x}_{Ta(i-1)} - F_{ai} \hat{x}_{a(i-1)}). \end{aligned} \tag{19}$$

Существенную роль при реализации оптимальной СУ играют матрицы K и Q . Соотношения между коэффициентами матриц позволяют реализовать различные режимы оптимального управления. Заметим, что управление будет оптимальным только в случае получения оптимальных оценок параметров движения судна и ПА, входящих в выражение (19).

УРАВНЕНИЯ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Для получения оценок вектора состояния (20) введем вектор наблюдений (21) и запишем известные уравнения Калмановской фильтрации в дискретном времени (22):

$$\bar{x} = (x, z, \phi, V_{xg}, V_{zg}, \omega)^T \tag{20}$$

$$\bar{z}_i = H_i \bar{x}_i + \bar{\xi}_{Hi}, \tag{21}$$

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{\text{зи}} + K_i (\bar{z}_i - H_i \hat{x}_{\text{зи}}), \tag{22}$$

где $K_i = P_i H_i^T V_{Hi}^{-1}$,

$$P_i = P_{\text{зи}} (E + H_i^T V_{Hi}^{-1} H_i P_{\text{зи}})^{-1},$$

$$\hat{x}_{\text{зи}} = F_{i-1} \hat{x}_{i-1} + B_{i-1} \bar{u}_{i-1},$$

где

$$F_{i-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\omega \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega \cdot \Delta t & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B_{i-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\cos(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_x} & \frac{-\sin(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_z} & 0 \\ \frac{\sin(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_x} & \frac{\cos(\varphi_{i-1}) \cdot dt}{m_z} & 0 \\ 0 & 0 & dt / J_y \end{pmatrix},$$

$$P_{\sigma i} = F_{i-1} P_{i-1} F_{i-1}^T + V_{\xi i}.$$

Отметим, что для получения оценок используется линейный фильтр, вместе с тем модель движения является нелинейной ввиду зависимости матрицы F и B от компонент вектора состояния. В результате моделирования на ЭВМ было установлено, что в случае линеаризации модели относительно заданных значений курса и угловой скорости процесс фильтрации начинает расходиться при сравнительно малых дисперсиях случайных ветро-волновых возмущений.

В случае линеаризации модели относительно оценок курса и угловой скорости, полученных на предыдущей итерации фильтра, процесс фильтрации значительно более устойчив.

Таким образом, представленный алгоритм координированного управления движением судна и ПА по заданным траекториям позволяет задавать и отслеживать сложные криволинейные траектории в базовой СК и может использоваться в интегрированных системах управления движением [5].

Выводы

Таким образом, в работе получены следующие результаты:

1. Предложены и исследованы математические модели движения МПК в горизонтальной плоскости в базовой СК. Установлено, что математические модели движения в базовой СК адекватны моделям в связанной СК. Однако при обеспечении одинаковой точности модели в базовой СК уступают моделям в связанной СК по количеству вычислительных операций в 9–10 раз, вследствие чего их целесообразно использовать для имитации движения на малых интервалах времени, например, при разработке рекуррентных алгоритмов оценивания и управления.

2. Разработан алгоритм оптимального оценивания параметров и управления движением МПК, позволяющий с использованием модели в базовой СК реализовать различные режимы оптимального управления, в том числе при движении по заданной криволинейной траектории и динамическом позиционировании.

3. Разработан алгоритм координированного управления движением элементов МПК, при котором судно и НПА должны следовать каждый по своей траектории с точным соблюдением заданной скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев К. К., Маттис А.В. Моделирование и оптимизация систем управления движением морских подвижных комплексов // Автоматизация процессов управления. – 2010. – № 2 (20). – С. 13–19.
2. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Схороходов Д.А. Навигация и управление движением судов : учебник. – СПб. : Элмор, 2002. – 360 с.
3. Маттис А. В. Математическое моделирование алгоритмов раздельного и совместного оценивания параметров движения морского подвижного комплекса // Автоматизация процессов управления. – 2010. – № 3 (21). – С. 23–27.
4. Авиационные системы радиопередачи. Принципы построения радиопередачи. Основы синтеза и анализа / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М. : Радиотехника, 2003. – Т.1. – 192 с.
5. Корноухов Ю.Л, Маттис А.В. Выбор и обоснование варианта построения интегрированной системы управления движением судна и телеуправляемого подводного аппарата // Автоматизация процессов управления. – 2009. – № 1 (15). – С.79–83.