

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОВМЕСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Г. Шпекторов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В. И. Ульянова (Ленина)
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, 5
E-mail: spect_ag@mail.ru

Ключевые слова: морские подвижные объекты, сетевые системы, координированное управление

Аннотация: Рассматривается сетевая структура управления совместным движением морских подвижных объектов. Разработана иерархическая программная модель морского подвижного объекта в среде MATLAB-SIMULINK. Предложена структура базовых алгоритмов совместного управления движением на примере сближения двух морских подвижных объектов. Приведены результаты моделирования.

1. Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется процессам на море, в которых задействованы два или более морских подвижных объектов. В качестве примера таких процессов можно привести мероприятия по сбору и ликвидации нефтяных пятен, спасательные операции, грузовые операции у объектов нефтедобычи (платформы, терминалы), передачи грузов на ходу, кабельные операции и др. Эффективность выполнения таких процессов связана с обеспечением взаимной кооперации объектов в режиме реального времени, желательно автоматизированной.

В настоящее время существуют предпосылки для создания подобных автоматизированных систем. Вычислительные мощности современных бортовых компьютеров позволяют вести обработку больших объемов данных в реальном времени. Значительно улучшилось информационное обеспечение морских подвижных объектов, в частности, возможности информационного обмена судов на ограниченной акватории – за счет электронных картографических навигационно-информационных систем и автоматических идентификационных систем. Совершенствуются и технические средства управления движением. К примеру, все чаще в качестве главных движителей используются азимутальные подруливающие устройства, улучшающие управляемость судов по курсу и скорости, что, соответственно, обуславливает возможности создания высокоуровневых систем управления движением: стабилизации на траектории, динамического позиционирования, координированного управления.

Одним из подходов к кооперации морских подвижных объектов является создание сетевых систем, основные исследования которых проводились в связи с развитием и внедрением роботизированных систем. В соответствии с этим вводилось понятие агента – мобильного управляемого объекта, обладающего определенной свободой в принятиях решений по управлению. Целью данной работы является развитие данного подхода, выбор соответствующего математического, алгоритмического и программного ап-

парата, получение конкретных результатов на частном примере сближения морских подвижных объектов.

2. Структура сетевой системы управления морскими подвижными объектами

Основное внимание в исследованиях сетевых систем уделяется следующим вопросам [1]:

- наличие или отсутствие коммуникации между агентами;
- тип координированной стратегии (к примеру, наличие или отсутствие центрального координирующего объекта, степень «самостоятельности» объекта);
- влияние собственной динамики агентов на процессы сетевой системы;
- влияние внешние ограничения на процессы сетевой системы.

Если представить МПО в виде агента сетевой системы, для задач координации необходимо определиться с тремя основными аспектами. Во-первых, насколько агент информирован о состоянии других агентов, во-вторых, взаимосвязь между агентами, которая может быть сильной, слабой или отсутствовать вообще, в-третьих – организация системы, которая может быть централизованной, частично или полностью децентрализованной. Учитывая технические возможности МПО и специфику операций на море, предполагается следующее:

- агенты обладают полной информацией о состоянии других агентов;
- взаимосвязь между агентами является сильной, то есть каждый МПО принимает решение, полностью анализируя действия других МПО;
- система частично децентрализована, один из агентов является ведущим. В зависимости от специфики операции, ведущим может быть любой отдельно взятый агент.

Фундаментальная структура МПО как агента сетевой системы является модульной и представлена на рисунке 1.

Модуль траекторного управления обеспечивает следование агента по заданному маршруту. Фактически в этом модуле могут быть также реализованы алгоритмы динамического позиционирования и координированного управления.

Модуль принятия решений или модуль интеллектуального управления формирует цель и траекторию движения агента, исходя из окружающей обстановки, наличия препятствий, ограничений, положения других агентов. Фактически в этом модуле сосредоточены функции капитана судна.

Модуль информации и коммуникации предназначен для измерения текущего состояния агента, обмена информацией о состоянии с другими агентами. Эти данные являются исходными для модуля принятия решений.

Модуль динамики агента описывается математической моделью движения. Модель определяет полное состояние МПО, а также технических средств управления. Также в данном модуле осуществляется расчет сил и моментов внешних возмущений. Исходные данные предоставляет модуль траекторного управления.

Обобщенная диаграмма моделирования кооперации МПО представлена на рисунке. Движение и управление агентами рассматривается в едином пространстве, формируемом средой моделирования (в качестве этой среды, например, удобно применять MATLAB-SIMULINK). Среда моделирования также содержит модуль внешнего управления. Среди задач этого модуля можно выделить такие, как выбор вида совместных операций, инициализация карты препятствий, выбор ведущего агента, формирование

состава источников информации для каждого агента, формирование исходных данных по внешним возмущениям.

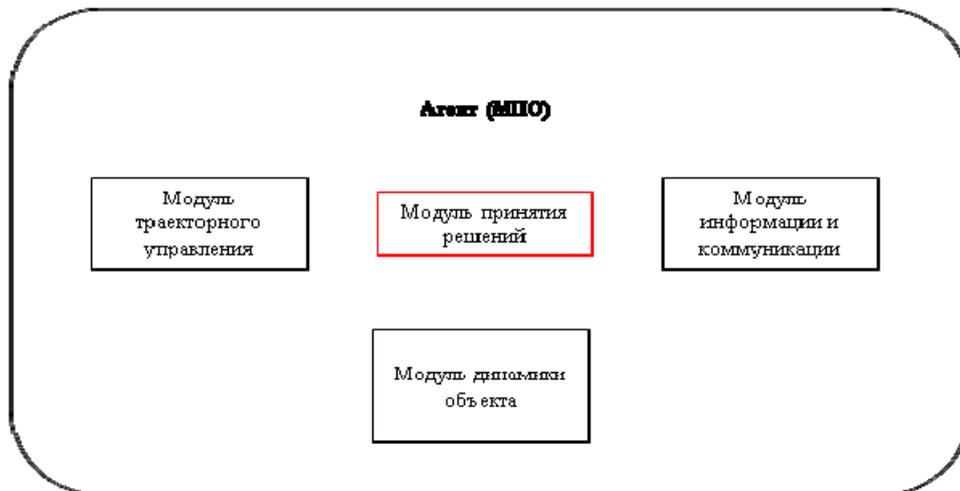


Рис. 1. Модульная структура МПО как элемента сетевой системы.

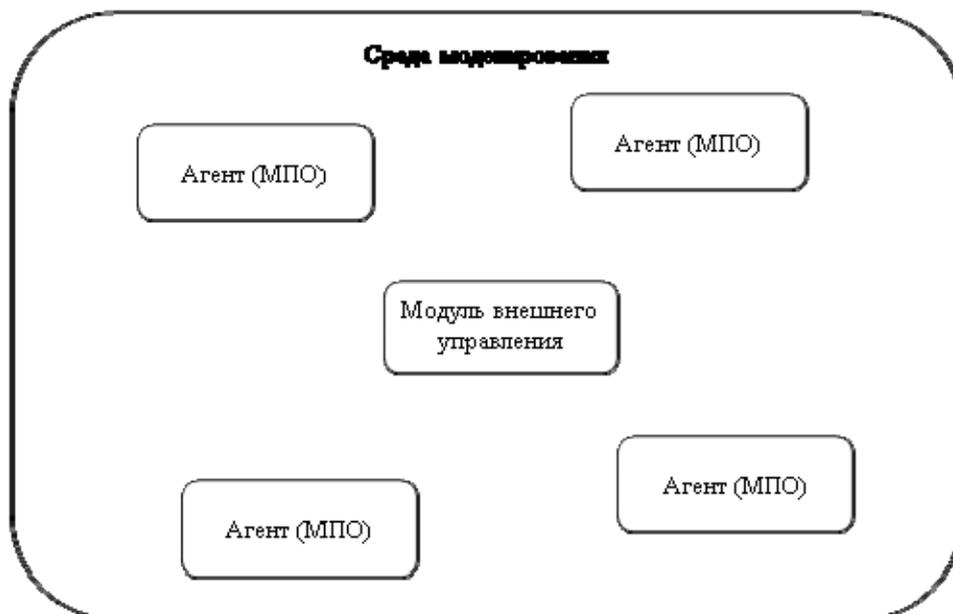


Рис. 2. Диаграмма моделирования координированного движения МПО.

3. Программная модель МПО как элемента сетевой системы

Основной задачей при реализации сетевого управления является построение математической и программной модели агентов – морских подвижных объектов, представленной в модульном виде на рис. 1. В настоящее время существует целый ряд инструментальных пакетов программ, которые используются на этапе формирования компьютерных моделей. Разработки универсальных моделей движения морских подвижных объектов имеются и в России, и за рубежом, особого внимания заслуживает созданный в Норвегии пакет «Имитатор судовых систем» (MSS – The Marine Systems Simulator). Пакет MSS содержит набор библиотечных функций языка MATLAB, а также класси-

фицированную совокупность модулей пакета SIMULINK, позволяющих решать разные задачи моделирования движения и управления МПО. Оболочка пакета MSS представлена на рис. 3.

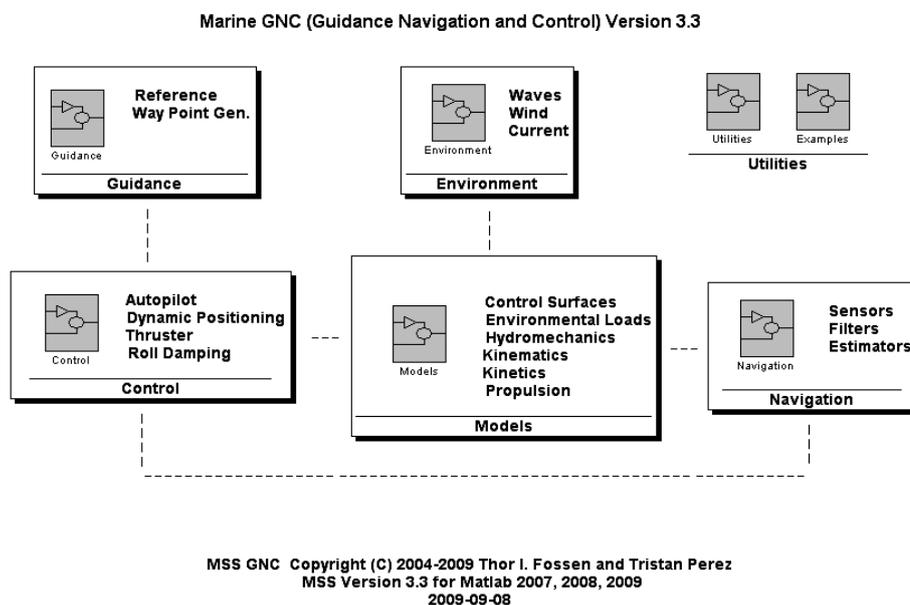


Рис. 3. Библиотека MSS для среды MATLAB-SIMULINK.

Применение библиотеки MSS позволяет слегка упростить поставленную задачу, так как можно использовать модели внешних возмущений и навигационных измерительных средств. Однако частные модели МПО, представленные в библиотеке MSS, достаточно сложно адаптировать для задач движения в горизонтальной плоскости. Поэтому модели собственного движения, законов управления, как и дополнительные блоки управления процессом моделирования, необходимо разработать самостоятельно.

Учитывая многообразие существующих МПО и специфику задач кооперативного управления, при разработке программной модели следует ввести ряд допущений. Большинство судов, участвующих в совместных операциях оборудованы активными техническими средствами, позволяющими создавать произвольную по направлению тягу и поворотный момент. Управление осуществляется от системы динамического позиционирования либо системы координированного управления – так называемой системы класса DYNPOS, обладающей меньшими возможностями в сравнении с системой ДП. В обеих системах заложен одинаковый принцип – раздельного формирования управляющих сил и моментов и распределения их между активными техническими средствами. Кроме того, подобные системы управления поддерживают режим формирования заданного вектора скорости, а также угловой скорости разворота.

С учетом допущений программную модель можно представить согласно рис. 4 [2]. На верхнем уровне модели задаются (передаются из модуля внешнего управления сетевой системы) параметры внешних возмущений и начальных условий для моделирования (подсистема Simulation Conditions), режимы и параметры управления (подсистема Control) – от модуля принятия решений агента, а также моделируются внешние возмущения средствами библиотеки MSS (подсистема Disturbance). Данная модель поддерживает разные режимы прецизионного маневрирования: динамическое позиционирование, движение по джойстику, стабилизация на дугообразной траектории. Для каждо-

го из режимов можно применять регулятор состояния, ПИД-регулятор по ошибке, а также формировать произвольные обратные связи.

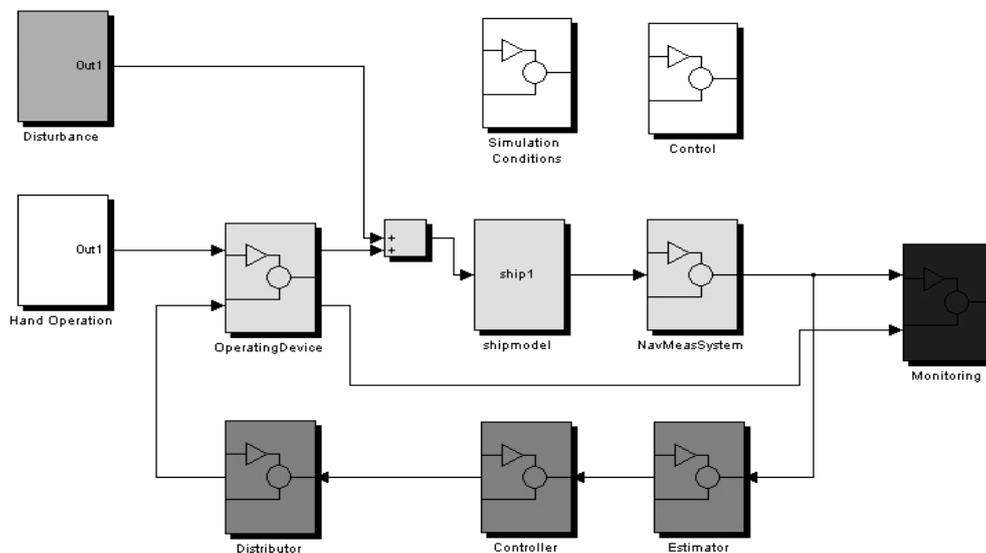


Рис. 4. Компьютерная модель МПО с модулем траекторного управления.

Блок Hand Operation предназначен для реализации «ручного управления» – обработки движения МПО по заданным управляющим сигналам. В блоке OperatingDevice, формирующем силы и моменты исполнительных органов, установлен переключатель, принимающий сигнал либо от контура обратных связей, либо от блока «ручного управления». В блоке shipmodel задается математическая модель МПО, реализованная при помощи аппарата S-функций. Модели датчиков задаются в подсистеме NavMeasSystem, а блок Monitoring объединяет средства визуализации, отображение положения МПО на координатной сетке. В контуре обратных связей представлены три подсистемы: наблюдатель (Estimator), контроллер (Controller), формирующий силы и моменты управления, распределитель упоров по органам управления (Distributor).

С учетом режима формирования вектора скорости математическую модель МПО удобно условно разделить на динамическую и кинематическую. Динамическая модель обеспечивает получение заданных линейной и угловой скоростей, кинематическая позволяет найти линейные и угловые перемещения [3]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_g &= V_x \cos \varphi + V_z \sin \varphi, \\
 \dot{z}_g &= V_z \cos \varphi - V_x \sin \varphi, \\
 \dot{\varphi} &= \omega_y,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где x_g, z_g – перемещения МПО в неподвижной системе координат; φ – угол рыскания МПО; V_x, V_z – продольная и боковая скорости МПО в связанной системе координат, ω_y – угловая скорость рыскания.

Угловые и линейные перемещения и скорости могут быть переданы в модуль внешнего управления через глобальные переменные среды MATLAB, поэтому модуль информации и коммуникации в программной модели не требуется. На реальных МПО информация о состоянии соседних объектов может быть получена через автоматическую идентификационную систему. Кроме того, в настоящее время существует воз-

возможность обработки в реальном времени радиолокационных изображений, что также позволяет получить информацию о состоянии окружающей акватории. На подводных МПО для передачи информации о положении используются гидроакустические навигационные системы.

4. Алгоритмы совместного управления движением МПО

Рассматривается задача сетевого управления на примере сближения двух МПО, например, для передачи груза с борта на борт. В этом случае МПО – «цель», является ведущим. Его движение для начала можно считать независимым. Второй МПО – «преследователь», является ведомым. Модуль внешнего управления (рис. 2) анализирует положение обоих МПО, в зависимости от него выбирает борт «цели», со стороны которого должно произойти сближение.

Следует отметить, что при движении двух МПО на малых расстояниях между ними возникает гидродинамическое взаимодействие в виде дополнительных сближающих сил и моментов. Однако на практике совместные морские операции осуществляются, как правило, на малых скоростях, поэтому эти силы малы и ими можно пренебречь.

Постановка задачи сближения двух МПО проиллюстрирована на рис. 5. В зависимости от положения «преследователя» (2, 2') задается его желаемое положение и ориентация (3, 3') в виде пары координатных осей, движение которых связано с движением «цели». Задача фактически состоит в том, чтобы совместить положение текущей и желаемой пары. При этом основными параметрами являются вектор относительного перемещения r пар осей и угол относительной ориентации φ_0 между ними.

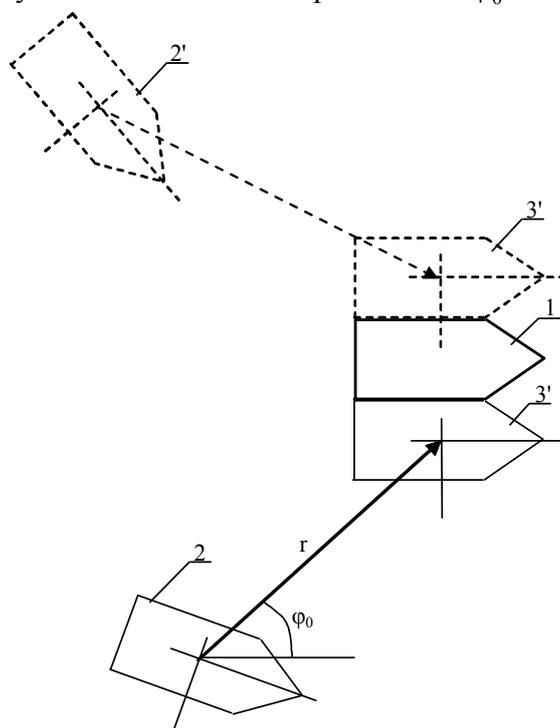


Рис. 5. Постановка задачи сближения двух морских подвижных объектов: 1 – положение «цели»; 2, 2' – текущее положение «преследователя»; 3, 3' – заданное положение «преследователя».

В реальных условиях взаимное положение МПО измеряется относительно их корпусов, поэтому потребуется коррекция измерений. Очевидно, при известных габарит-

ных параметрах «цели» коррекция труда не составляет. Вместо пары осей проще ввести понятие прямоугольной рамки.

Задача сближения двух МПО формализуется следующим образом: задано положение и движение желаемой рамки, описываемое системой уравнений (1) при некоторых начальных значениях $(x_z^{(0)}, z_z^{(0)}, \varphi^{(0)})^T$. Рамка покоится или движется устойчиво на постоянном курсе ($\omega_y = 0$). Цель управления «преследователем» состоит в выработке требуемых значений линейной и угловой скоростей по измерениям относительного перемещения \mathbf{r} и ориентации φ_0 .

Для достижения цели предлагается следующий закон управления

$$(2) \quad \begin{aligned} \mathbf{V} &= k_1 \mathbf{r}, \\ \omega_y &= k_2 \varphi_0 + k_1 \sin \varphi_0, \end{aligned}$$

где $\mathbf{V} = (V_x, V_z)^T$, k_1, k_2 – искомые коэффициенты обратной связи.

Использование закона управления (2) приводит к наличию двух независимых контуров обратной связи по относительному положению и угловому смещению. При выборе параметров обратной связи следует руководствоваться следующим соображением: контур стабилизации относительного угла ориентации должен по быстродействию опережать контур относительного положения.

В качестве объектов моделирования рассматривается пара малогабаритных телеуправляемых подводных аппаратов, аналоги типа «Тайгер» или «Линкс». Такие аппараты имеют четыре винто-рулевые колонки для управления в горизонтальной плоскости, встроенную систему стабилизации курса. Пульт управления оборудован трехкоординатной рукояткой, есть возможность ее калибровки по скорости, в том числе по скорости вращения. Средства управления подводных аппаратов имеют достаточно хорошую динамику, поэтому движение ТПА можно описать математической моделью вида (1). В модель вводятся ограничения на максимальную линейную (5 м/с) и угловую скорость (1 град/с).

На рис. 6 приведены результаты моделирования сближения МПО в случае, когда «цель» неподвижна. Коэффициенты обратной связи: $k_1 = -0.12$, $k_2 = -0.45$. Положение «преследователя» показано направлением его продольной оси через равные интервалы времени. Закон управления (2) обеспечивает достаточно быстрое и безопасное сближение – на малых расстояниях МПО движется, сохраняя ориентацию «цели». В случае, если «цель» движется с некоторой скоростью, в контуре относительного положения возникает статическая ошибка. Для ее ликвидации можно внести дополнительное слагаемое в закон управления (2). С другой стороны, можно учесть, что «цель», как агент системы, также владеет информацией о состоянии «преследователя». И, исходя из поставленной задачи сближения, лучше прекратить движение «цели» в тот момент, когда относительное смещение φ_0 будет скомпенсировано. Результаты моделирования приведены на рис. 7. Длительность процесса сближения – 34 с.

В данном примере принятие решения по управлению МПО-«целью» сводится к простейшему: убрать или оставить скорость. Резонно поставить вопрос: не наделить ли «цель» большими возможностями по управлению, например, по тому же алгоритму (2)?

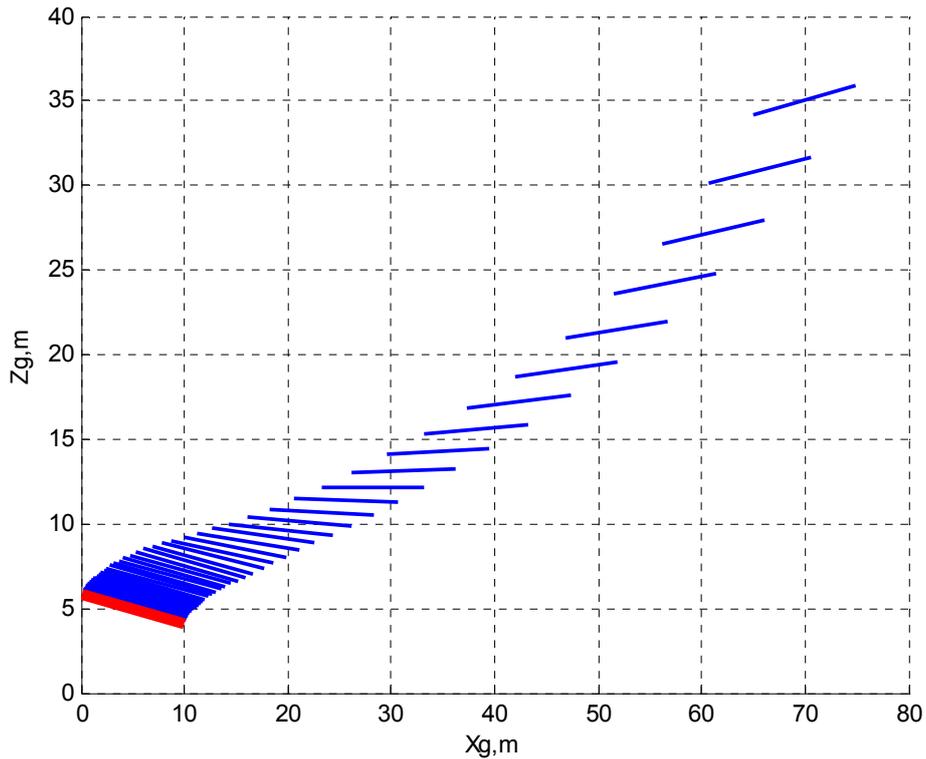


Рис. 6. Результаты моделирования сближения МПО: скорость «цели» $V_x = 0$ м/с.

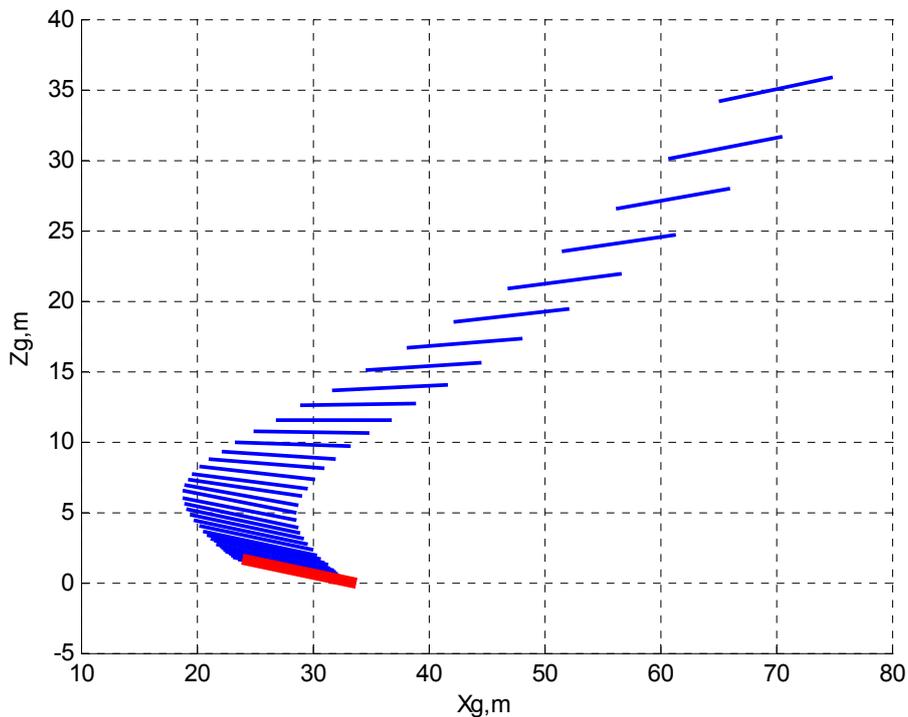


Рис. 7. Результаты моделирования сближения МПО: скорость «цели» $V_x = 1.0$ м/с.

Одним из условий работы сетевой системы является строго регламентированный обмен информацией между ее агентами. В данном примере взаимодействующие объекты имеют информацию о текущих значениях положения, курса и скорости друг друга. В то же время предложенный алгоритм учитывает только физические ограничения на

значения скоростей, не проверяя, допустима ли данная траектория движения. В то же время такая проверка необходима, и для этого должно осуществляться прогнозирование ситуации. Поэтому, в условиях ограниченной информации важно, чтобы траектория одного из взаимодействующих агентов была стабильной. Правила поведения агентов в случае потенциально опасного взаимодействия определяет модуль внешнего управления сетевой системы. В качестве примера может быть предложен следующий алгоритм:

- 1) В соответствии с (1) и (2) строится прогнозируемая траектория движения обоих МПО.
- 2) Для каждого момента времени с некоторой дискретностью анализируется возможность столкновения МПО.
- 3) Если столкновение возможно, определяется прогнозируемое время столкновения и положение обоих МПО.
- 4) МПО-«цель» выполняет маневр заранее согласованный маневр уклонения, МПО-«преследователь» не начинает (или прекращает) процесс сближения.
- 5) По окончании маневра уклонения повторяется п. 1)
- 6) Цикл повторяется, пока не будет найдена безопасная прогнозируемая траектория.

5. Заключение

В работе предложены базовые алгоритмы сближения МПО в рамках взаимодействия сетевой системы. В процессе сближения оба МПО принимают самостоятельные решения при условии обмена информацией о положении друг друга. Реализация подобных алгоритмов предполагает наличие у МПО средств формирования и удержания заданной скорости хода. В дальнейшем предполагается исследовать влияние динамики МПО на работу алгоритмов, а также сформировать систему правил сетевой системы для разрешения конфликтных ситуаций.

Список литературы

1. Carrillo D.M. et al. Simulation environment for the investigation of automatized cooperation of marine crafts // *Math. Comput. Simul.* 2008. Vol. 79, No. 4. P. 947-954.
2. Шпекторов А.Г., Ха Мань Тханг. Компьютерная модель морского подвижного объекта в среде MATLAB // *Навигация и управление движением: Материалы докладов XIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»*. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2011. С. 284-290.
3. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.С. *Навигация и управление движением судов*. СПб.: Элмор, 2002. 360 с.
4. Baillieul J. The Geometry of Sensor Information Utilization in Nonlinear Feedback Control of Vehicle Formations // *Cooperative Control: A Post-Workshop Volume. 2003 Block Island Workshop on Cooperative Control*. P. 1-25.