

Методы и подходы к решению задач группового управления автономными подводными аппаратами*

И.В. Бычков, М.Ю. Кензин, Р.И. Козлов, Н.Н. Максимкин,
Н.В. Нагул, С.А. Ульянов

Институт динамики система и теории управления СО РАН
e-mail: mnn@iccc.ru

Л.В. КИСЕЛЕВ

Институт проблем морских технологий ДВО РАН
e-mail: kiselev@marine.febras.ru

В настоящее время в океанографии и в прикладных подводных работах различного назначения интенсивно развиваются автоматизированные распределенные системы взаимодействующих неподвижных и движущихся платформ. Функционирование подобных систем основано, как правило, на использовании группировок автономных подводных аппаратов (АНПА). При этом решается ряд задач, связанных с осуществлением коллективных миссий АНПА, организацией согласованного поведения в реальной подводной среде. Методам и подходам к решению такого рода задач и посвящен доклад.

1. Децентрализованное равномерное распределение группы подводных роботов

Для исследования группой автономных необитаемых подводных аппаратов акватории значительных размеров, как правило, оказывается необходимым разделить ее на несколько *областей*. За каждой областью может быть закреплен *координатор*, одной из функций которого будет являться регулирование количества АНПА, выполняющих в области некоторые миссии. В качестве таких координаторов могут выступать не только специализированные подводные аппараты, но и донные буи (маяки), надводные аппараты, корабли и пр. Будем считать, что каждый АНПА должен выходить на связь со своим координатором (например, приближаясь к нему на расстояние, меньшее радиуса действия своего передатчика) через некоторые конечные отрезки времени, и в эти моменты связи координатор отдает АНПА команду остаться в области или переместиться из текущей области в другую. Будем предполагать, что между координаторами отсутствует какая-либо связь, и, следовательно, они не обладают информацией о действиях друг друга. Тогда в общем случае список координатора будет неточен из-за ограниченного радиуса связи между АНПА и координаторами и того факта, что несколько координаторов могут изменять число АНПА в каждой из областей. Таким образом, в распоряжении координаторов имеются лишь оценки числа аппаратов в каждой приписанной ему области.

Для моделирования функционирования описанной системы предложено использовать ее представление в виде дискретно-событийной системы [1], [2]. Дискретно-событий-

*Работа выполнена при поддержке Президиума СО РАН (проект №45), ДВО РАН (проект 09-П-СО-03-001), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 29.

ные системы (ДСС) — это модели динамических систем, в которых изменение состояния системы происходит из-за возникновения некоторых событий через возможно нерегулярные промежутки времени. В рассматриваемой системе интерес представляют следующие события: перемещение координатором АНПА из области в область; обнаружение координатором в области аппаратов, ранее не внесенных им в свой список; обнаружение координатором отсутствия в области аппаратов из списка подчиненных ему АНПА.

Взаимосвязь область-координатор удобно представлять двудольным графом, в котором области формируют одну долю графа, а координаторы — другую. В этом графе вершина-координатор связана ребрами только с теми вершинами-областями, которые контролирует этот координатор. В [1], [2] рассмотрена топология двудольного графа, представляющая собой кольцо, однонаправленное или допускающее сокращения путей по кольцу.

В отличие от работ [1] и [2], покажем, как результаты теории устойчивости (В.И. Зубов [3] и др.), адаптированные для ДСС ([4]), позволяют исследовать свойства рассмотренной модели. Множество

$$\mathcal{X}_I = \{x \in \mathcal{X} : |x_i - x_j| \leq 1 \text{ для всех } i, j \in N\},$$

где N — общее число областей, x_i — число АНПА в i -ой области, \mathcal{X} — пространство состояний системы, размерность которого зависит от выбранной топологии графа, описывает равномерное распределение аппаратов по областям. Обозначим через

$$M(k) = \max_{i=1, N} x_i(k)$$

— максимальное число АНПА по всем областям в момент перераспределения k , отвечающий некоторому реальному времени. Аналогично

$$m(k) = \min_{i=1, N} x_i(k)$$

— минимальное число АНПА по всем областям в момент k . Рассмотрим функцию $V(x(k)) = M(k) - m(k)$. Можно показать, что $V(x(k))$ не возрастает с течением времени. Кроме того, несложно показать, что $V(x(k)) \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. Таким образом, функция $V(x(k))$ удовлетворяет всем условиям теоремы Э. Мишеля об устойчивости инвариантных множеств ДСС [4], и получаем следующую теорему:

ТЕОРЕМА 1. *Для описанной модели замкнутое инвариантное множество \mathcal{X}_I асимптотически устойчиво по Ляпунову. Более того, оно является асимптотически устойчивым в целом.*

Естественным обобщением описанной модели является назначение областям некоторых приоритетов — величин, определяющих долю от общего числа имеющихся в наличии аппаратов. В [1] предложен алгоритм, позволяющий, пусть и локально, выровнять число АНПА в соседних областях, учитывая их приоритеты. Разработка на основе теории ДСС такого алгоритма перераспределения АНПА по областям, который бы использовал короткие пути в кольце и обеспечивал равномерное (в том или ином смысле) распределение при наличии у областей приоритетов, является предметом наших последующих исследований.

2. Динамическое планирование группового движения АНПА

При осуществлении обзорно-поисковых работ на некотором участке морского дна группой АНПА возникает задача распределения множества отдельных заданий (целей) между аппаратами группы и нахождения рационального порядка их обхода (маршрута) для каждого аппарата при действующих ограничениях. Управление при обходе множества целей должно строиться путем планирования и перепланирования маршрутов для всей группы. Перепланирование требуется при любых существенных изменениях во внешней и внутренней среде группы.

На действия группы накладывается ряд ограничений: длина маршрутов АНПА ограничена энергоемкостью их аккумуляторов, по ходу выполнения миссии каждый аппарат должен быть в состоянии связаться с любым другим аппаратом из группы, при этом канал связи может быть установлен только в условиях прямой видимости и на ограниченном расстоянии.

Множество целей, их приоритеты (степень важности их выполнения) и энергетические затраты, необходимые на преодоление расстояний между ними, а также точки старта/завершения миссии задают полный взвешенный граф $G = (V, E)$. Поставим в соответствие каждой вершине v_i графа G неотрицательную величину p_i , выражающую приоритет i -ой цели. Определим вектор, задающую общий вид маршрута для группы АНПА на графе G :

$$r = ((r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1l_1}), (r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2l_2}), \dots, (r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{kl_k})), \quad (1)$$

где r_{ij} – индекс вершины в графе, соответствующей j -ой цели i -ого аппарата, l_i – количество целей в маршруте для i -ого аппарата.

Обозначим через R множество всех решений, допустимых с точки зрения ограничения на длину маршрутов. Ставится задача максимизации эффективности работы группы АНПА:

$$F(r) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{l_k} p_{r_{ij}} \rightarrow \max, r \in R.$$

В качестве метода решения поставленной задачи на графе были выбраны генетические алгоритмы (ГА), удовлетворяющие таким требованиям как способность решать задачи большой размерности, ану-time структура алгоритма и др. [5]

В качестве хромосомы в нашем случае выступает вектор (1). Оценка приспособленности особи производится целевой функцией $F(r)$. Выбор особей для создания новых поколений осуществляется с помощью механизма рулетки, кроме того, используется принцип элитизма. В качестве оператора скрещивания используется классический одноточечный кроссовер. Оператор мутации помимо стандартного изменения случайного элемента в хромосоме расширен четырьмя дополнительными функциями. Применяется принцип островов, позволяющий в некоторой мере решить проблему сходимости решения к локальному экстремуму.

Учет дополнительного ограничения по связи выводит задачу из чисто графовой постановки. В этом случае предлагается введенный выше граф наложить на карту рельефа дна. Ребра графа будут представлять собой траектории аппаратов между целями, маршрут отдельного аппарата – направленную ломаную ограниченной длины. Предположим, что скорость движения аппаратов постоянная и равная для всех АНПА. Это

дает возможность рассчитывать их местоположение по ходу выполнения миссии на построенных с помощью ГА маршрутах. Тогда указанное ограничение можно переформулировать следующим образом: через каждый заданный промежуток времени сеть АНПА должна образовывать связный граф с длинами дуг (расстояниями между аппаратами) не большими, чем радиус действия связи.

Наличие ограничений на связь не дает возможности проверять допустимость хромосомы при ее генерации. Это приводит к тому, что при создании начальной популяции случайным образом алгоритм может не сгенерировать ни одного допустимого решения. Для решения этой проблемы были предложены два метода их направленной генерации, позволяющие получать допустимые хромосомы даже при жестких ограничениях на связь.

Генетический алгоритм, представленный в [6], адаптирован для работы на трехмерном рельефе: маршруты аппаратов при перемещении между целями просчитываются при помощи модификации алгоритма A^* , позволяющей учитывать ограничения на передвижение аппаратов в пространстве, разработан алгоритм определения наличия связи внутри группы, разграничены сущности препятствия и запретной зоны. Так как некоторые цели исследования невозможно задать в виде одной пары координат (например, протяженные объекты), маршруты части аппаратов могут быть построены “вокруг” фиксированной миссии одного или нескольких АНПА.

Предложенный подход позволяет получать рациональные решения в приемлемое время, а использование различных эвристик в генетическом алгоритме дает возможность существенного повышения его эффективности.

3. Устойчивость конфигураций движущихся АНПА

При групповом управлении подвижными объектами возникает необходимость разработки алгоритмов децентрализованного координированного управления, обеспечивающих выполнение таких задач, как формирование заданной конфигурации группы (относительного расположения объектов в пространстве), поддержание конфигурации группы при маневрировании, а также перемещение группы по предписанной траектории. Важной проблемой управления группами движущихся объектов является задача устойчивости конфигураций.

Одним из возможных способов обеспечения устойчивости конфигурации группового движения является управление по принципу “лидер-ведомый”, когда все объекты связаны попарно этим отношением. Ведомые управляют своим движением на основе измерения параметров собственного движения, а также движения своего лидера (лидеров). Задача состоит в обеспечении (с определенной точностью) заданных навигационных и динамических параметров, определяющих желаемую конфигурацию группировки. Один из объектов не является ведомым ни в одной паре, так что он есть лидер всей формации и задает ее движение в целом. Его маневры, ограниченные некоторыми пределами, являются причиной непрерывного нарушения желаемой конфигурации, которое отрабатывают ведомые. Необходимо также устранить или уменьшить начальные отклонения от желаемой конфигурации аппаратов за ограниченный промежуток времени.

В предположении, что отношения “лидер-ведомый” являются односторонними, т.е. граф этих отношений не содержит замкнутых контуров, предлагается общая математическая модель формаций с децентрализованным управлением. Дается строгое опре-

деление желаемой динамики в виде свойств внутренней робастной устойчивости или диссипативности конфигураций, которые в отличие от большинства известных постановок задач устойчивости формаций [7–9], ориентированных в основном на линейные модели, учитывают неполноту измерения параметров собственного и взаимного движения агентов, погрешности, ограниченность управления и измерителей, неопределенности объектов и внешние возмущения. Получены основанные на методе вектор-функций Ляпунова (ВФЛ) [10–12] теоремы о достаточных условиях названных динамических свойств формаций, существенно использующие структурные особенности графа связей между агентами. Разработаны алгоритмы построения подходящих ВФЛ (сублинейного типа) и динамического анализа, включающие вычисление оценок точности стабилизации и других показателей качества, а также параметрического синтеза управления с оптимальными оценками качества.

Дано приложение к задаче децентрализованного автономного (без обмена информацией) управления для отряда движущихся подводных роботов с конфигурацией в виде дерева. Лидер группировки задает ее движение в целом и может совершать заранее не известные остальным членам группы маневры. Ведомые управляют своим вектором скорости так, чтобы удерживать заданную дистанцию до своего лидера и угол пеленга. Управление строится с использованием измерителей дистанций и углов пеленга, а также наблюдателей первого порядка для получения оценок скоростей (неполнота измерений). Рассмотрены различные варианты формирования стабилизирующих управлений, в том числе дискретных, учитывались неопределенности масс аппаратов и сил сопротивления, погрешности элементов системы и другие факторы, присущие реальной ситуации. Приводятся результаты численного моделирования для конфигураций типа “цепочка” и “стая”.

Список литературы

- [1] MOORE B.J., PASSINO K.M. Decentralized redistribution for cooperative patrol // Int. J. Robust Nonlinear Control. 2008. Vol 18. P. 165-195.
- [2] MOORE B.J., PASSINO K.M. Distributed Coordination Strategies for Wide-Area // Patrol. J Intell Robot Syst. 2009. Vol 56. P. 23-45.
- [3] ЗУБОВ В.И. Методы А.М. Ляпунова и их применения. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. 241 с.
- [4] MICHEL A.N., KAINING W.K., BO H. Qualitative Theory of Dynamical Systems. N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 2001. 706 p.
- [5] WU X., ZENG Z., ZHU J., ALLEN R. GA-based path planning for multiple AUVs // International Journal of Control. 2007. Vol. 80, № 7. P. 1180-1185.
- [6] БЫЧКОВ И.В., МАКСИМКИН Н.Н., ХМЕЛЬНОВ А.Е., КЕНЗИН М.Ю., КИСЕЛЕВ Л.В., ИНЗАРЦЕВ А.В. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2/8. С. 34-43.
- [7] TANNER H.G., PAPPAS G.J., KUMAR V. Leader-to-formation stability // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2004. Vol. 20. Issue 3. P. 443-455.
- [8] FAX J.A. MURRAY R.M. Information flow and cooperative control of vehicle formations // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49. Issue 9. P. 1465-1476.

- [9] CASALINO G., AICARDI M., VICCHI A., BALESTRINO A. Closed loop steering and patch-following for underactuated marine vehicles: a simple Lyapunov function based approach // IEEE Robotics and Automation Magazine. 2005. № 2(1). P. 27-35.
- [10] Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости / Под ред.: А.А. Воронов, В.М. Матросов. М.: Наука, 1987. 312 с.
- [11] МАТРОСОВ В.М. Метод векторных функций Ляпунова: анализ динамических свойств нелинейных систем. М.: Физматлит, 2001. 384 с.
- [12] ВАСИЛЬЕВ С.Н. Метод редукции и качественный анализ динамических систем, I-II // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2006. № 1. С. 21–29; № 2. С. 5–17.