УДК 681.518.3: 519.714.3: 681.7.014.3
DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_03
EDN: EMKMPF

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АНПА-ВЕДОМОГО НА ОСНОВЕ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПОЛОЖЕНИИ АНПА-ЛИДЕРА

В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец

Статья посвящена разработке метода синтеза высокоточной системы управления строевым движением группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в режиме лидер-ведомые. Синтезированная с помощью этого метода система обеспечивает точное позиционирование ведомых относительно лидера с использованием информации, поступающей от бортовых видеокамер ведомых. Для обеспечения высокой точности управления в предложенном методе формируется оценка параметров движения АНПА-лидера (его скоростей и ускорений) с использованием ранее уже поступившей и сохраненной информации и выполняется прогноз его движения относительно АНПА-ведомых на промежутках времени между обновлениями информации, получаемой от видеокамер. Результаты математического моделирования показывают эффективность предложенного подхода для реализации систем группового управления АНПА в режиме лидер-ведомые.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, групповое управление, обработка изображений, оптимизация, аппроксимация, прогнозирование движения, параметрическая неопределенность, высокоточное управление.

Введение

В настоящее время одним из основных способов повышения эффективности выполнения подводных операций с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является использование групп роботов [1, 2, 3]. При групповом управлении наиболее популярной является стратегия «лидер–ведомые», при которой один АНПА из группы назначается лидером, а остальные – ведомыми. В этом случае АНПА-лидер имеет полную информацию о выполняемой миссии и формирует траекторию движения группы, а АНПА-ведомые следуют за лидером, сохраняя заданное расположение относительно него [1].

Известно большое количество подходов к синтезу систем управления группами роботов различного назначения, движущихся в заданном строю. Эти подходы основаны на различных методах теории автоматического управления и позволяют обеспечить поддержание положения роботов-ведомых в строю с учетом неопределенности их параметров и влияния внешних возмущений [4–8]. При этом полагается, что все роботы группы должны определять свое расположение и получать информацию о положении и параметрах движения лидера. Для АНПА указанная информация должна поступать через гидроакустические каналы связи [9–12], имеющие ограниченную пропускную способность и большие задержки при передаче данных.

Для учета особенностей указанных каналов связи при реализации систем группового управления АНПА предлагаются различные подходы. С целью уменьшения влияния ограниченной пропускной способности этих каналов связи в работе [13] предлагается использовать расширенный фильтр Калмана. Используя этот фильтр, ведомые прогнозируют положение АНПА-лидера на основе данных о его скорости и положении, получаемых с малой частотой. Однако для реализации этого подхода требуется согласование навигационных систем АНПА-ведомых и АНПА-лидера для корректного определения их по-

ложения относительно лидера в абсолютной системе координат (АСК). Для решения этой задачи можно использовать методы, описанные в работах [14–16]. Однако их использование может значительно усложнить синтез систем группового управления.

Другим решением, не требующим использования данных о координатах в АСК АНПА-лидера и ведомых, является формирование сигналов управления на основе данных о положении ведомых относительно лидера, полученных с помощью их бортовых датчиков [17]. В частности, в работе [18] предложен метод управления строем роботов, в котором АНПА-лидер пересылает ведомым по гидроакустическим каналам связи информацию о своей текущей скорости движения об угле курса и угловой скорости по углу курса. При этом ведомые с помощью бортовых гидроакустических датчиков определяют дистанцию и направление на АНПА-лидер, что позволяет быстро вычислить текущее отклонение от заданного положения в строю. Однако эти каналы связи, используемые для обмена данными между АНПА, имеют низкую пропускную способность и большие задержки в передаче данных, что не позволяет обеспечить безопасное и точное движение группы АНПА, находящихся на малой дистанции друг от друга. Одним из способов решения указанных проблем является реализация систем группового управления АНПА на основе данных, получаемых от их бортовых видеокамер. Это позволяет исключить обмен данными по указанным каналам связи и согласования показаний навигационных систем лидера и ведомого. Недостатком такого подхода является движение АНПА на небольших дистанциях между собой (до 15 м). Однако для ряда задач такие дистанции являются рабочими. Например, к указанным работам можно отнести инженерно-геологические исследования, где группа АНПА реализует поле гидрофонов, где они должны точно поддерживать между собой заданные дистанции порядка единиц метров [19], а также действия АНПА-помощника [20], который должен двигаться за водолазом на заданной небольшой дистанции.

Сейчас видеоинформация широко применяется для создания систем автоматической стыковки и управления АНПА [21–23]. В этих системах с использованием световых маяков, установленных на специальных станциях, определяется положение и ориентация АНПА относительно этих станций. При этом в процессе стыковки линейные и угловые скорости движения АНПА относительно станций определяются только движением самого АНПА, так как станции неподвижны. Однако при движении в группе скорость и направление движения лидера могут меняться непредсказуемо, особенно при обходе препятствий. Это требует дополнительной оценки всех переменных при наличии видеоинформации. Кроме того, данные о положении и ориентации АНПА, формируемые на основе видеоинформации, могут обновляться медленно, что сильно снижает точность, требуя высокой частоты формирования сигналов управления. В работе [24] предложен метод решения указанной проблемы для промышленных манипуляторов, следящих за подвижным объектом с помощью видеокамеры. В этом методе при оценке скорости движения подвижного объекта используются фильтр Калмана и специальный предиктор, способный компенсировать задержки, возникающие в процессе получения требуемых оценок. При управлении манипулятором положение видеокамеры и объекта работ формируется в АСК, что позволяет прогнозировать движение объекта независимо от движения манипулятора. Однако для формирования сигналов управления АНПА-ведомыми используются относительное положение и ориентация АНПА-лидера, которые зависят от пространственного движения и ориентации самих ведомых, что требует дополнительного учета этих факторов.

Для решения задачи высокоточного управления движением АНПА-ведомых на основе информации, поступающей от их бортовых видеокамер, в статье предлагается метод, использующий периодические измерения положения и ориентации АНПА-лидера относительно каждого ведомого. При этом производится оценка положения и параметров движения целевой точки (скорости и ускорения), задающей желаемое положение ведомого относительно лидера. Эта оценка формируется в виде полиномиальных функций времени, описывающих изменение координат указанной точки относительно ведомого. Указанный подход позволяет снизить влияние погрешностей, возникающих при измерении положения и ориентации АНПА-лидера, а также уменьшить задержку определения скоростей и ускорений по сравнению с традиционными методами. Кроме того, улучшается точность прогнозирования движения целевой точки в промежутке времени между обновлениями данных, получаемых от видеокамеры с учетом движения АНПА-ведомого с использованием его системы управления. Это позволяет существенно увеличить частоту обновления информации о текущем отклонении АНПА-ведомого от желаемого положения в строю и тем самым обеспечить возможность использования высокоточных систем управления. Указанные прогнозные оценки используются для формирования программных сигналов, которые от-

рабатываются с помощью системы управления, учитывающей неопределенности параметров АНПА-ведомого.

Постановка задачи

В работе рассматривается группа АНПА, состоящая из АНПА-лидера и АНПА-ведомых. Лидер имеет всю информацию о выполняемой миссии и формирует траекторию движения в процессе ее выполнения. Каждый ведомый следует за лидером, поддерживая заданное относительно него положение в строю (точка X_L^* на рис. 1).

Желаемое положение X_L^*каждого АНПА-ведомого задается в системе координат (СК) $x_{LR}y_{LR}z_{LR}$, начало которой совпадает с СК $x_Ly_Lz_L$, связанной с лидером, а ось z_{LR} параллельна оси z АСК. Это при движении лидера в пространстве с изменением углов крена и дифферента обеспечивает расположение ведомых в одной горизонтальной плоскости с лидером.

Полагается, что у каждого ведомого отсутствуют данные о параметрах движения лидера, передаваемые по гидроакустическим каналам связи, и ведомые не имеют информации о своем положении в АСК. Но каждый ведомый имеет бортовые инерциальные датчики, которые позволяют измерять углы ориентации, а также линейные и угловые скорости и ускорения. На АНПА-лидере установлено несколько световых маяков. Их расположение относительно центра масс лидера известно и задается координатами $B = (B_1, B_2, \ldots, B_n)$, где $B_i = (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi})^T$ – координаты i-го маяка в СК АНПА-лидера. Эти маяки имеют характеристики, позволяющие идентифицировать их на изображении, полученном от видеокамеры, и вычислить их пиксельные координаты на этом изображении, формируя вектор $P = (P_1, P_2, \ldots, P_n)$, где $P_i = (p_{xi}, p_{yi})$ – пиксельные координаты i-го маяка на изображении соответствующего кадра. При этом внутренние параметры видеокамеры и параметры дисторсии определяются с помощью стандартных процедур калибровки. Также предполагается, что расположение камеры АНПА-ведомого позволяет ей держать в поле видимости АНПА-лидер, когда ведомый находится в желаемом расположении относительно лидера, а ее ориентация может меняться по двум осям, позволяя удерживать в зоне видимости АНПА-лидер.

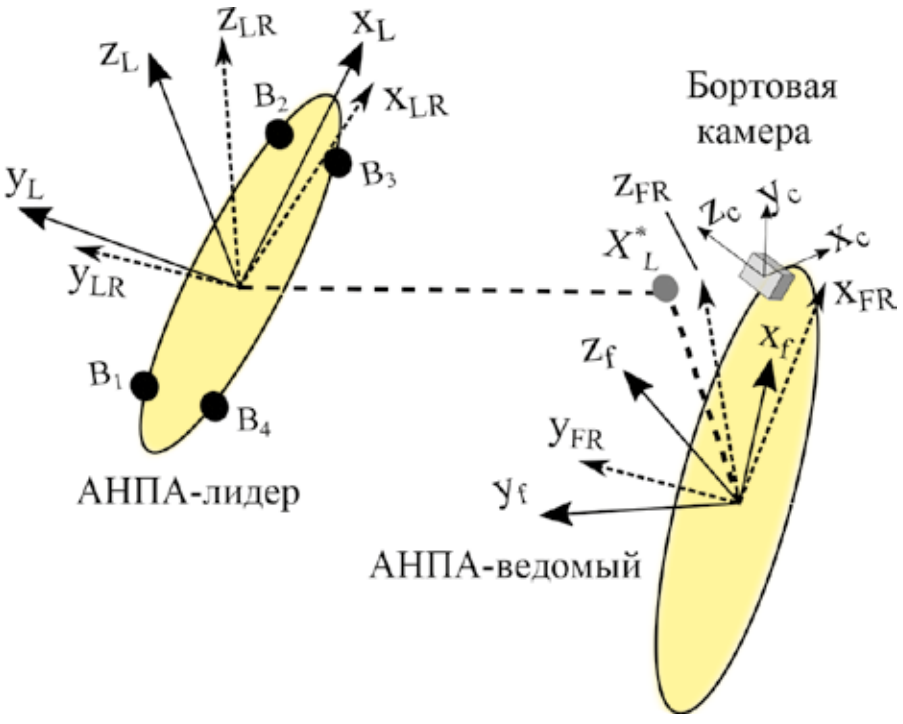

Рис. 1. Схема движения лидер–ведомый

Динамика движения АНПА-ведомых в связанных с ними СК (ССК) описывается системой уравнений [25]:

$$\mathbf{M}\dot{\upsilon}_F + (\mathbf{C}(\mathbf{M},\upsilon_F) + \mathbf{D}(d_1,d_2,\upsilon_F))\upsilon_F + \mathbf{g}(\xi) = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_R + \boldsymbol{M}_A \in R^{6x6}$; $\boldsymbol{M}_R \in R^{6x6}$– матрица инерции АНПА; $\boldsymbol{M}_A \in R^{6x6}$ – матрица инерции присоединенных масс и моментов инерции жидкости; $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{M},\upsilon_F) \in R^{6x6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов, описывающих взаимовлияния между степенями свободы АНПА; $\boldsymbol{D}(d_1,d_2,\upsilon_F) \in R^{6x6}$ – диагональная матрица гидродинамических сил и моментов, элементы которой рассчитываются с помощью выражения $\boldsymbol{D}_{ii} = d_{1i} + d_{2i}|\upsilon_{Fi}|$, $i=(1,\ldots,6)$, где d_{1i} и d_{2i} – гидродинамические коэффициенты; $\boldsymbol{g}(\xi) \in R^6$ – вектор гидростатических сил и моментов; $\xi = [\varphi_F, \theta_F, \psi_F]^T$ – вектор углов ориентации АНПА в АСК; $\tau = [\tau_x, \tau_y, \tau_z, M_x, M_y, M_z]^T$ – вектор сил тяг и моментов, развиваемых движительным комплексом в связанной с АНПА СК; $\upsilon = [\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей АНПА в ССК.

Предполагается, что параметры АНПА точно неизвестны. Поэтому модель (1) можно описать в виде [26]:

$$(\mathbf{M}_n + \mathbf{M}_\Delta)\dot{\upsilon}_F = (\mathbf{C}_n(\mathbf{M}_n,\upsilon_F) + \\ + \mathbf{C}_\Delta(\mathbf{M}_\Delta,\upsilon_F))\upsilon_F + (\mathbf{D}_n(d_{1n},d_{2n},\upsilon_F) + \\ + \mathbf{D}_\Delta(d_{1\Delta},d_{2\Delta},\upsilon_F))\upsilon_F + \mathbf{g}(\xi) = \boldsymbol{\tau}, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{C}_n \in R^{6x6}$, $\boldsymbol{D}_n \in R^{6x6}$ – силы и моменты, возникающие при движении АНПА и зависящие от значений его параметров; $\boldsymbol{C}_\Delta \in R^{6x6}$, $\boldsymbol{D}_\Delta \in R^{6x6}$ – дополнительные силы и моменты, зависящие от значений его неизвестных параметров; $\boldsymbol{M}_n \in R^{6x6}$, $d_{n1} \in R^6$, $d_{n2} \in R^6$ – известные номинальные значения параметров АНПА; $\boldsymbol{M}_\Delta \in R^{6x6}$, $d_{1\Delta} \in R^6$, $d_{2\Delta} \in R^6$ – неопределенные части параметров АНПА.

Полагается, что для матриц $\boldsymbol{M}_n$ и $\boldsymbol{M}_\Delta$, а также элементов матриц $\boldsymbol{M}_\Delta$, $\boldsymbol{C}_\Delta$ *и векторов* $d_{\Delta 1}, d_{\Delta 2}$, выполняются условия:

$$\boldsymbol{M}>0,\ |m_{\Delta,ij}| \le \bar{m}_{\Delta,ij},\ m_{n,ij}+m_{\Delta,ij}>0,\ |c_{\Delta,ij}| \le \bar{c}_{\Delta,ij},\ |d_{\Delta,1j}| \le \bar{d}_{\Delta,1j},$$
$$|d_{\Delta,2j}| \le \bar{d}_{\Delta,2j},\ i=(1\ldots6),\ j=(1\ldots6), \quad (3)$$

где $\bar{m}_{\Delta,ij}$, $\bar{d}_{\Delta,1j}$, $\bar{d}_{\Delta,2j}$, $\bar{c}_{\Delta,ij}$ – максимально возможные отклонения соответствующих параметров АНПА, а также величин элементов соответствующих матриц сил и моментов от их номинальных значений.

Таким образом, в работе ставится следующая задача. На основе информации о пиксельных координатах маркеров, расположенных на борту АНПА-лидера, разработать метод определения положения и скорости движения целевой точки, задающей желаемое положение каждого АНПА-ведомого относительно лидера. При этом вся необходимая информация должна формироваться с заданной дискретностью независимо от частоты получения кадров от бортовых видеокамер. С учетом получаемой информации должна быть синтезирована система управления, обеспечивающая заданную точность позиционирования АНПА-ведомых с неизвестными и изменяющимися параметрами, описываемых выражениями (3), относительно лидера.

Формирование положения, ориентации и скоростей движения АНПА-лидера относительно ведомых с заданным периодом

Для решения поставленной задачи в работе предлагается система управления, схема которой показана на рис. 2. Из этой схемы видно, что формирование сигнала управления тягой АНПА-ведомого включает несколько шагов.

Вначале с помощью стандартных алгоритмов обработки изображений на кадрах, получаемых от бортовой видеокамеры, выделяются маяки АНПА-лидера и формируется вектор РВ их пиксельных координат. Этот вектор используется для определения положения и ориентации лидера относительно ведомого и для последующего расчета положения $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ целевой точки каждого АНПА-ведомого в его СК. Информация о $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ содержат неточности, возникающие ввиду погрешностей определения пиксельных координат маяков и параметров видеокамеры. Эти неточности приводят к ошибкам определения скорости v_f^* и ускорения a_f^* движения целевой точки АНПА-ведомого в связанной с ним СК, а это в итоге снижает точность управления движением указанного ведомого.

Для повышения точности движения предлагается формировать специальные полиномиальные функции, аппроксимирующие координаты $\hat{\mathbf{X}}_F^*$ целевых точек АНПА-ведомых на промежутках времени между поступлением очередной информации от их бортовых видеокамер, точно прогнозируя изменения этих координат. При этом формируются аналитиче-

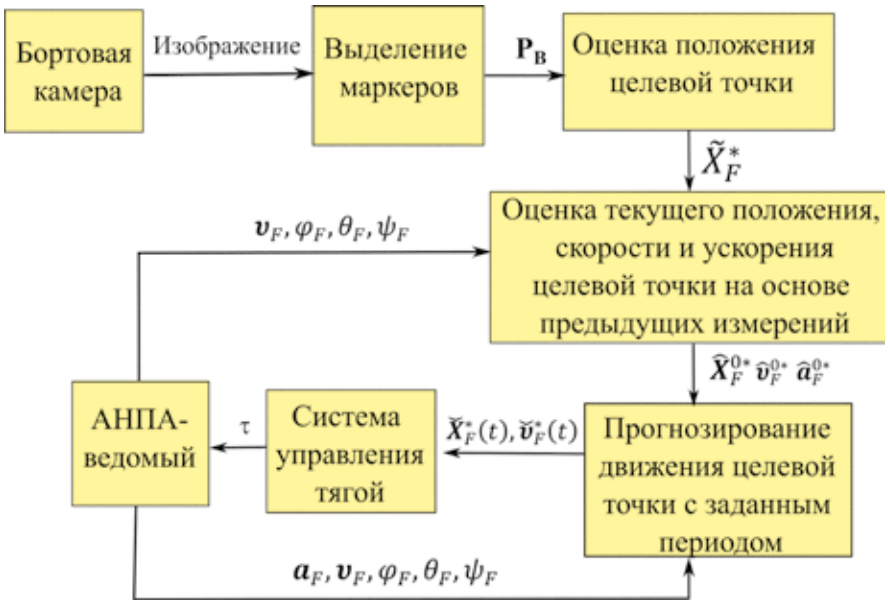

Рис. 2. Структура системы управления АНПА-ведомого

ские описания движения этих точек, которые используются для определения их скоростей $\hat{\mathbf{o}}_F^*$ и ускорений $\hat{\mathbf{a}}_F^*$ на промежутках времени между обновлением соответствующих данных.

Полученные величины скоростей и ускорений движения целевой точки относительно АНПА-ведомого позволяют осуществить прогноз его последующего перемещения с желаемым периодом, что обеспечит требуемую высокую частоту формирования сигналов управления АНПА-ведомыми.

После формирования положения и параметров движения каждой целевой точки относительно соответствующего ведомого рассчитываются программные сигналы движений, учитывающие кинематические особенности этого ведомого. Указанные программные сигналы отрабатываются системой управления тягой АНПА, обеспечивающей заданную точность требуемого перемещения относительно лидера при любых изменениях их параметров в диапазонах (3).

Далее последовательно рассмотрим реализацию всех этапов работы системы.

■ Оценка положений и параметров движения целевых точек каждого АНПА-ведомого на основе информации, получаемой от их бортовых видеокамер

В начале работы системы определяется положение и ориентации АНПА-лидера относительно каждого ведомого с использованием вектора выделенных пиксельных координат маяков P_B, вектора c_p внутренних параметров видеокамеры и вектора U параметров дисторсии, полученных с помощью стандартных процедур калибровки.

Пиксельные координаты p_i i-го маркера на кадре, а также положение и ориентация АНПА-лидера в СК видеокамеры с учетом модели преобразования координат точки в пространстве в пиксельные координаты изображения [27] определяются системе уравнений:

$$\mathbf{p}_i = F_{B2p}(c_p, U, \mathbf{B}_i, \mathbf{X}_L^C, \mathbf{A}_L^C), \mathbf{X}_{Bi}^C = \mathbf{R}_L^C(\mathbf{A}_L^C)\mathbf{B}_i + \mathbf{X}_L^C, \quad i = (1\ldots n), \tag{4}$$

где $\mathbf{X}_L^C = (x_L^C, y_L^C, z_L^C)$ – положение АНПА-лидера в СК видеокамеры АНПА-ведомого; $\mathbf{A}_L^C = (\phi_L^C, \theta_L^C, \psi_L^C)$ – вектор углов ориентации АНПА-лидера относительно осей СК видеокамеры ведомого; $\mathbf{R}_L^C$ – матрица поворота СК лидера относительно СК видеокамеры.

Система (4) содержит 6 неизвестных переменных, входящих в векторы $\mathbf{X}_L^C$ и $\mathbf{A}_L^C$. Для определения этих переменных на борту АНПА-лидера необходимо расположить не менее 3 маркеров.

Уравнения вида (4) являются существенно нелинейными и не могут быть решены аналитически. Поэтому для определения величин $\mathbf{X}_L^C$ и $\mathbf{A}_L^C$ целесообразно использовать метод численной оптимизации Ливенберга–Маркгварда, который имеет достаточно быструю сходимость и относительно небольшую вычислительную сложность. Это позволит использовать его в бортовых системах управления, работающих в реальном масштабе времени.

При этом в процессе движения ведомого желательно изменять ориентацию камеры так, чтобы геометрический центр всех пиксельных координат маяков на кадре совпадал с центром кадра. Это позволит уменьшить влияние искажений камеры на точность определения положения и ориентации лидера, а также постоянно удерживать лидера в поле зрения камеры.

Полученные в результате работы алгоритма Ливенберга–Маркгвардта величины $\mathbf{X}_L^C$ и $\mathbf{A}_L^C$, заданные в СК бортовой камеры, необходимо пересчитать в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$ с помощью следующих преобразований:

$$\tilde{\mathbf{X}}_L^{FR} = \mathbf{R}_F^R(\mathbf{R}_C^F\tilde{\mathbf{X}}_L^C + \mathbf{X}_C^F), \mathbf{R}_L^{FR} = \mathbf{R}_F^R\mathbf{R}_C^F\mathbf{R}_L^C,$$

$$\tilde{\phi}_L^{FR} = \arctan(r_{32}/r_{33}), \tilde{\theta}_L^{FR} = -\arctan(r_{31}/(r_{32}^2 + r_{33}^2)^{1/2}), \tilde{\psi}_L^F = \arctan(r_{21}/r_{11}), \tag{5}$$

где $\tilde{\mathbf{X}}_L^{FR} = (\tilde{x}_L^{FR}, \tilde{y}_L^{FR}, \tilde{z}_L^{FR})$, $\tilde{\mathbf{A}}_L^{FR} = (\tilde{\phi}_L^{FR}, \tilde{\theta}_L^{FR}, \tilde{\psi}_L^{FR})$ – векторы положения и ориентации соответственно АНПА-лидера в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$; $\mathbf{R}_C^F$ – матрица текущей ориентации СК видеокамеры относительно СК ведомого; $\mathbf{R}_F^R = \mathbf{R}_z(\psi_F)^T\mathbf{R}_F^A(\phi_F, \theta_F, \psi_F)$ – матрица перевода из ССК ведомого в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$; $\boldsymbol{R}_F^A$ – матрица перевода из ССК ведомого в АСК; $\boldsymbol{R}_z$ – матрица поворота вокруг оси z АСК; $\mathbf{X}_C^F$ – вектор координат видеокамеры в ССК ведомого; r_{ii} – элементы матрицы $\mathbf{R}_L^{FR}$ ориентации АНПА-лидера в $СК$ $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$.

Положение целевой точки $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ для АНПА-ведомого, задающей в горизонтальной плоскости его желаемое расположение относительно АНПА-лидера, независимо от величин углов крена и дифферента ведомого, определятся выражением:

$$\tilde{\mathbf{X}}_F^* = \mathbf{R}_z(\tilde{\psi}_L^{FR})^T\mathbf{X}_L + \tilde{\mathbf{X}}_L^{FR}. \tag{6}$$

Полученная оценка будет существенно зависеть от характеристик бортовой камеры (разрешения и точности определения ее внутренних параметров) и дистанции между лидером и ведомым. При увеличении дистанции или относительно малом разрешении видеокамеры точность оценки вектора $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ будет снижаться, что приведет к появлению шумов в указанной оценке. Для реализации высокоточного управления движением АНПА-ведомых в условиях неопределенности и переменности их параметров необходимо кроме положения целевой точки иметь информацию о скоростях ее движения относительно этих АНПА. Эту информацию рассчитать напрямую на основе вектора $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ из-за наличия шумов при его определении. Для устранения этого недостатка при уточнении координат точек $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ а также векторов их скоростей и ускорений в работе предлагается использовать следующий подход, который проиллюстрирован на рис. 3.

На этом рисунке показаны положения АНПА-лидера и одного АНПА-ведомого в четыре момента времени (в моменты получения данных от видеокамеры). Рассчитанные положения и ориентации АНПА-лидера отличаются от реальных. Это приводит к ошибкам определения положений целевых точек для текущих позиций ведомых (черные кружки $\mathbf{X}_F^*$ вблизи штриховой линии – программные положения целевых точек, а белые – $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ – положения, рассчитанные на основе данных от видеокамер). Для формирования информации о скоростях и ускорениях перемещения указанных целевых точек предлагается использовать аппроксимацию последовательности $\{\tilde{\mathbf{X}}_F^*(0), \tilde{\mathbf{X}}_F^*(-t_\Delta), ..., \tilde{\mathbf{X}}_F^*(-Mt_\Delta)\}$ ранее рассчитанных точек $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ (где M – количество ранее измеренных положений целевой точки, t_Δ – период измерений) с помощью гладкой полиномиальной функции.

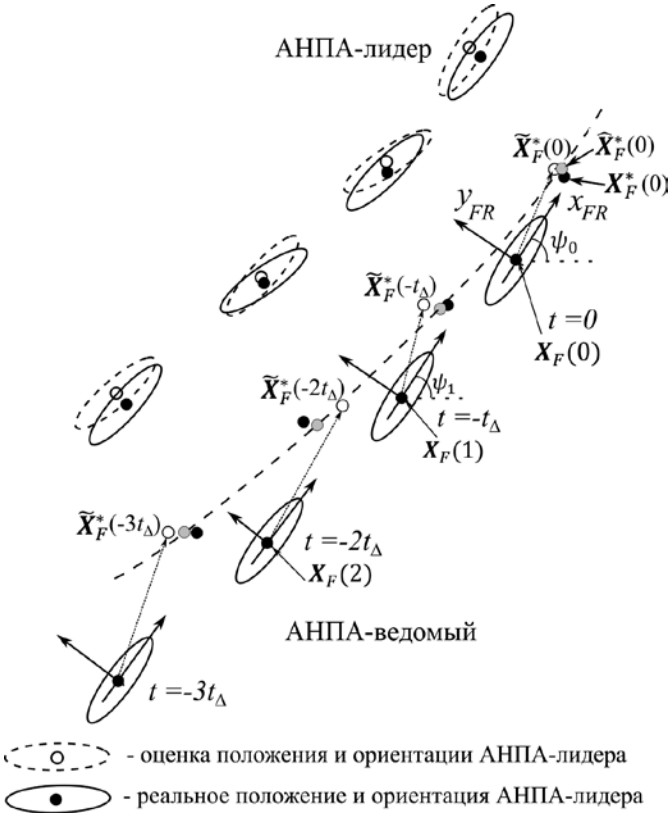

Рис. 3. Задание последовательности измерений для определения положения и параметров движения целевой точки относительно ведомого

После аппроксимации указанную последовательность можно описать функцией $\hat{\mathbf{X}}_F^*(t, \boldsymbol{\lambda})$, графически изображенной на рис. 3 штриховой линией, где $\lambda \in \boldsymbol{R}^N$ – вектор коэффициентов полиномиальной функции, N – заданный порядок полинома. При этом точки $\hat{\mathbf{X}}_F^*(-it_\Delta)$, i = (0, …, M) (серые кружки на штриховой линии) соответствуют новым оценкам положения точки $\mathbf{X}_F^*$ в момент времени ($-it_\Delta$). То есть изменение положения точки $\mathbf{X}_F^*$ по каждой координате будет описываться выражениями следующего вида:

$$x_F^*(t) = x_F^{0*} + \upsilon_{Fx}^{0*} t + a_{Fx}^{0*} t^2 / 2 + k_{x1} t^3 + ... + k_{xN-2} t^N, \quad (7)$$

где x_F^{0*} – начальные значения координаты вектора $\hat{\mathbf{X}}_F^*(t)$; υ_{Fx}^{0*} – начальные значения скоростей изменения этих координат; а a_{Fx}^{0*}, – начальные значения их ускорений; k_{x1}, … , k_{xN-2} a_{Fx}^{0*} – коэффициенты соответствующих аппроксимирующих полиномов.

Для расчета вектора коэффициентов полинома используется метод наименьших квадратов, что позволит достаточно точно описывать перемещение целевой точки $\mathbf{X}_F^*$ с помощью аппроксимирующей кривой (штриховая линия на рис. 3).

С помощью описанного подхода удается:

– уменьшить погрешности расчета $\mathbf{X}_F^*$ за счет сглаживания полиномиальной функцией последовательности значений $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$;

– уточнить значения элементов векторов $\hat{\mathbf{X}}_F^*$, $\hat{\mathbf{o}}_F^*$ и $\hat{\mathbf{a}}_F^*$ без внесения дополнительных задержек при определении требуемых сигналов;

– получить аналитическое описание движения точки , которое используется для прогнозирования ее движения относительно ведомого между измерениями.

В процессе движения АНПА-ведомого формируется массив Ω размером M + 1, содержащий положения целевых точек в момент времени $t = it_\Delta$, i = (0 ,…, M) относительно связанной с ним СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$ в момент времени, соответствующий t = 0.

Формирование указанного массива происходит с помощью выражений:

$$\mathbf{X}_F^{i+1} = \mathbf{X}_F^i - \mathbf{R}_z(\psi_0)^T \mathbf{R}_F^{Ai} \mathbf{v}_F^i t_\Delta, \quad \tilde{\mathbf{X}}_{Fi}^{0*} = \mathbf{R}_z(\psi_i - \psi_0)\tilde{\mathbf{X}}_{Fi}^* + \mathbf{X}_F^i, \tag{8}$$

где $\tilde{\mathbf{X}}_{Fi}^{0*}$ – координаты целевой точки в момент $-it_\Delta$ относительно СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$ соответствующего ведомого в момент времени $t = 0$; $\mathbf{X}_F^i$ – положение этого ведомого в момент времени $-it_\Delta$ в его ССК в момент времени $t = 0$ ($\mathbf{X}_F^0 = (0,0,0)^T$); ψ_0 и ψ_i – углы курсов ведомых в моменты времени 0 и $-it_\Delta$ соответственно.

Вектор λ коэффициентов аппроксимирующих полиномов по отдельным координатам вектора $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$ рассчитывается с помощью выражения [28]:

$$\boldsymbol{\lambda} = [\boldsymbol{\Phi}^T\boldsymbol{\Phi}]^{-1}\boldsymbol{\Phi}^T\mathbf{S}, \tag{9}$$

где $\boldsymbol{\Phi} \in R^{(M+1)\text{x}(N+1)}$ – матрица, каждая строчка которой имеет вид $[1 \ -it_\Delta \ (it_\Delta)^2/2 \ \ldots \ (-it_\Delta)N]$, $i = (0\ldots M)$; $\boldsymbol{S} \in R^{(M+1)}$ – вектор, содержащий информацию об изменении соответствующей координаты вектора $\tilde{\mathbf{X}}_F^*$.

Если период внесения новых данных в вектор $\boldsymbol{S}$ постоянен, то матрица $[\boldsymbol{\Phi}^T\boldsymbol{\Phi}]^{-1}\boldsymbol{\Phi}^T$ тоже остается неизменной и может быть вычислена заранее. Это существенно снижает вычислительную сложность созданного алгоритма, при использовании которого следует выбрать размер M массива Ω и порядок N аппроксимирующего полинома.

Алгоритм (7)–(9) оценивает вектора $\hat{\mathbf{X}}_F^{0*} = [\hat{x}_F^{0*}, \hat{y}_F^{0*}, \hat{z}_F^{0*}]^T$ положений, $\hat{\mathbf{v}}_F^{0*} = [\hat{v}_{Fx}^{0*}, \hat{v}_{Fy}^{0*}, \hat{v}_{Fz}^{0*}]^T$ скоростей и $\hat{\mathbf{a}}_F^{0*} = [\hat{a}_{Fx}^{0*}, \hat{a}_{Fy}^{0*}, \hat{a}_{Fz}^{0*}]^T$ ускорений движения всех целевых точек для всех ведомых в текущий момент времени в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$. Указанные оценки не учитывают реальные движения ведомых при формировании входных сигналов для их систем управления, которые минимизируют рассогласования между реальными текущими положениями ведомых и положениями их целевых точек. При этом полученные оценки используются на следующем этапе, на котором формируется прогноз движений целевых точек в промежутках времени между обновлениями данных, поступающих от видеокамер, но уже с учетом реальных движений АНПА-ведомых.

Прогнозирование изменений положений, скоростей и ускорений движения целевых точек

В процессе прогнозирования будем полагать, что изменения положений целевых точек относительно положений ведомых в момент последнего получения данных от видеокамер описываться выражением:

$$\hat{\mathbf{X}}_F^*(t) = \hat{\mathbf{X}}_F^{0*} + \hat{\mathbf{v}}_F^{0*}t + \hat{\mathbf{a}}_F^{0*}t^2/2. \tag{10}$$

В выражении (10) отсутствуют коэффициенты при высоких степенях аппроксимирующего полинома (7), так как промежутки времени прогнозирования выбираются достаточно малыми и основное влияние в полиноме будут оказывать его первые члены.

Положение целевых точек в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$ с учетом движения АНПА-ведомых определятся выражением:

$$\mathbf{X}_{F,p}^*(t) = \mathbf{R}_z(\psi_\Delta)^T(\hat{\mathbf{X}}_F^*(t) - \mathbf{X}_{F\Delta}(t)), \quad \mathbf{X}_{F\Delta} = \int_{t0}^{t0+\Delta} \mathbf{R}_z(\psi_{F0})^T \mathbf{R}_F^A \mathbf{v}_F dt, \tag{11}$$

где $\psi_\Delta = \psi_F - \psi_{F0}$ – приращение углов курса ведомых с момента времени последнего обновления видеоданных, $\boldsymbol{X}_{F\Delta}$ – перемещения ведомых с момента последнего обновления данных от видеокамеры, t_0 – начало промежутка прогнозирования, Δ – промежуток времени, на котором выполняется прогнозирование.

Продифференцировав уравнение (11), получим:

$$\mathbf{v}_{F,p}^*(t) = \mathbf{R}_z(\psi_\Delta)^T\hat{\mathbf{v}}_F^*(t) + \dot{\mathbf{R}}_z(\psi_\Delta)^T(\hat{\mathbf{X}}_F^*(t) - \mathbf{X}_{F\Delta}(t))\dot{\psi}_F - \mathbf{R}_F^R\mathbf{v}_F, \tag{12}$$

где $\hat{\mathbf{v}}_F^*(t) = \hat{\mathbf{v}}_F^{0*} + \hat{\mathbf{a}}_F^* t$; $\mathbf{R}_F^R = \mathbf{R}_z(\psi_\Delta)^T\mathbf{R}_z(\psi_{F0})^T\mathbf{R}_F^A$.

Продифференцировав уравнение (12), получим:

$$\begin{aligned}\mathbf{a}_{F,p}^*(t) = {} & \mathbf{R}_z(\psi_\Delta)^T\hat{\mathbf{a}}_F^{0*} + \dot{\mathbf{R}}_z(\psi_\Delta)^T((\hat{\mathbf{v}}_F^*(t) - \\ & -\mathbf{R}_z(\psi_{F0})^T\mathbf{R}_F^A\mathbf{v}_F)\dot{\psi}_F + \\ & +(\hat{\mathbf{X}}_F^*(t) - \mathbf{X}_{F\Delta}(t))\ddot{\psi}_F + \\ & +\ddot{\mathbf{R}}_z(\psi_\Delta)^T(\hat{\mathbf{X}}_F^*(t) - \mathbf{X}_{F\Delta}(t))\dot{\psi}_F - \\ & -\mathbf{R}_F^R\mathbf{a}_F - \mathbf{R}_z(\psi_F)^T\dot{\mathbf{R}}_F^A\mathbf{v}_F\end{aligned} \tag{13}$$

где $\dot{\mathbf{R}}_F^A = \dot{\mathbf{R}}_x\mathbf{R}_y\mathbf{R}_z\dot{\phi}_F + \mathbf{R}_x\dot{\mathbf{R}}_y\mathbf{R}_z\dot{\theta}_F + \mathbf{R}_x\mathbf{R}_y\dot{\mathbf{R}}_z\dot{\psi}_F$, $\boldsymbol{R}_x$, $\boldsymbol{R}_y$, $\boldsymbol{R}_z$ – матрицы элементарных поворотов.

Уравнения (11)–(13) используются для оценки параметров движения целевых точек относительно АНПА-ведомых в промежутках времени между обновлением данных, получаемых от видеокамер о текущем положении и ориентации АНПА-лидера.

Прогнозирование изменения координат $\mathbf{X}_{F,p}^*(t)$ с учетом текущего движения ведомых предлагается производить с помощью алгоритма, использующего фильтр Калмана.

На этапе инициализации этого алгоритма задаются начальные значения матриц ковариации $\boldsymbol{P}_p \in R^{6\text{x}6}$, $\boldsymbol{Q}_p \in R^{6\text{x}6}$, $\boldsymbol{R}_p \in R^{6\text{x}6}$, а также начальные значения вектора

состояния фильтра $\div^*_{F,p}(0)=[\tilde{\mathbf{o}}^*_{F,p};\tilde{\mathbf{X}}^*_{F,p}]\in R^6$, содержащие оценки скорости движения и положения целевых точек относительно ведомых, которые обычно принимаются нулевыми.

После инициализации работает основной цикл фильтра, содержащий два этапа – прогнозирование, где с заданным периодом оцениваются положения и скорости движения каждой целевой точки относительно ведомых, и коррекция, где на основе данных, получаемых от бортовых видеокамер, уточняются ранее спрогнозированные значения.

На этапе прогнозирования используется выражение:

$$\begin{gathered}\boldsymbol{\chi}^*_{F,p}(k)=\mathbf{A}_p\boldsymbol{\chi}^*_{F,p}(k-1)+\mathbf{B}_p\mathbf{a}^*_{F,p}(k),\\ \mathbf{P}^+_p(k)=\mathbf{A}_p\mathbf{P}^+_p(k-1)\mathbf{A}_p{}^T+\mathbf{Q},\end{gathered}\qquad(14)$$

где $\boldsymbol{A}_p=[\boldsymbol{I}\,0;\,h_\Delta\boldsymbol{I}\,\boldsymbol{I}]$; $\boldsymbol{B}_p=[\,h_\Delta\boldsymbol{I};\,h_\Delta{}^2\boldsymbol{I}/2]$; $\boldsymbol{I}\in R^{3x3}$ – единичная диагональная матрица, $h_\Delta<t_\Delta$ – период расчета прогнозных значений вектора $\div^*_{F,p}$; $\mathbf{P}^+_p$ – матрица ковариации, рассчитанная на этапе прогнозирования.

Из (14) видно, что входным сигналом для модели является вектор ускорения движения целевой точки, полученный на основе выражения (13).

Этап прогнозирования продолжается до тех пор, пока от бортовой видеокамеры не поступят обновленные данные. Векторы $\chi^*_{F,p}$ являются оценками ошибок по положениям и скоростям движения АНПА-ведомых и используются для формирования сигналов управления их движениями.

После обновления данных, получаемых от видеокамер, начинается этап коррекции, на котором происходит уточнение ранее спрогнозированных значений с использованием последних измерений.

Модель измерения имеет вид:

$$\hat{\mathbf{Z}}(k)=\boldsymbol{\chi}^*_{F,p},\qquad(15)$$

где $\hat{\mathbf{Z}}=[\hat{\mathbf{v}}^{0*}_F;\hat{\mathbf{X}}^{0*}_F]$.

Указанная коррекция осуществляется с помощью выражений:

$$\begin{gathered}\mathbf{Y}(k)=\hat{\mathbf{Z}}(k)-\boldsymbol{\chi}^*_{F,p}(k),\mathbf{H}(k)=\mathbf{P}^+_p(k)+\mathbf{R},\mathbf{K}(k)=\\ =\mathbf{P}^+_p(k)\mathbf{H}(k)^{-1},\mathbf{P}_p(k)=(\mathbf{I}-\mathbf{K}(k))\mathbf{P}^+_p(k),\\ \breve{\boldsymbol{\chi}}_{F,p}(k)=\boldsymbol{\chi}^*_{F,p}(k)+\mathbf{K}(k)\mathbf{Y}(k),\end{gathered}\qquad(16)$$

где $\breve{\div}_{F,p}(k),\breve{\mathbf{P}}_p(k)$ – вектор состояния и матрица ковариации, скорректированные с использованием новых данных, поступивших от видеокамеры. После коррекции начинается этап прогнозирования, на котором в качестве исходных значений вектора состояния и матрицы ковариации используются уже скорректированные значения $\breve{\div}_{F,p}(k),\breve{\mathbf{P}}_p(k)$. При этом вектор $\div^*_{F,p}$ используется для формирования сигналов управления ведомыми.

Синтез систем управления движениями АНПА-ведомых

Каждый АНПА-ведомый должен двигаться в группе, ориентируясь по направлению к своей целевой точке так, чтобы она находилась на оси x_f, связанной с ним СК, совпадающей с его продольной осью. Тогда желаемые значения углов его ориентации по дифференту $\theta_F{}^*$ и курсу $\psi_F{}^*$, а также скорости их изменения рассчитываются по формулам:

$$\begin{gathered}\theta^*_F=\arctan(z^*_F/|x^*_F|),\psi^*_F=\arctan(y^*_F/x^*_F)+\psi_F,\\ \omega^*_y=\upsilon^*_{Fz}\cos(\theta^*_F)-\upsilon^*_{Fx}\sin(\theta^*_F),\\ \omega^*_z=\upsilon^*_{Fy}\cos(\psi^*_F)-\upsilon^*_{Fx}\sin(\psi^*_F),\end{gathered}\qquad(17)$$

где ω^*_y,ω^*_z – скорости изменения желаемых значений углов θ^*_F и ψ^*_F соответственно. Когда АНПА-ведомый находится вблизи целевой точки, то можно принять $\theta^*_F=z^*_F$ и $\psi^*_F=y^*_F$.

С четом того, что сигналы управления АНПА-ведомых задаются в связанных с ними СК, а положения их целевых точек $\mathbf{X}^*_F$ формируются в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$, модель движения АНПА-ведомого можно записать в виде:

$$\begin{gathered}\dot{\mathbf{E}}=\mathbf{V}^*-\boldsymbol{\upsilon}_F,\\ \mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\upsilon}}_F+(\mathbf{C}(\mathbf{M},\boldsymbol{\upsilon}_F)+\mathbf{D}(d_1,d_2,\boldsymbol{\upsilon}_F))\upsilon_F+\mathbf{g}(\xi)=\boldsymbol{\tau},\end{gathered}\qquad(18)$$

где $\boldsymbol{E}=[\boldsymbol{E}_x;\,\boldsymbol{E}_{AF}]$, $\boldsymbol{V}^*=[\upsilon^*;\,\omega^*]$; $\boldsymbol{\upsilon}^*=(\mathbf{R}^R_F)^T\boldsymbol{\upsilon}^*_{F,p}+\boldsymbol{\upsilon}_F$, $\boldsymbol{\omega}^*=\mathbf{R}^{-1}_\omega\boldsymbol{\omega}^*_R$, $\boldsymbol{\omega}^*_R=[0,\omega^*_y,\omega^*_z]^T$ – вектор желаемых линейных и угловых скоростей движения ведомого в связанной с ним СК, $\boldsymbol{R}_\omega$ – матрица пересчета угловых скоростей из связанной СК в производные углов Эйлера [25].

Для управления движениями ведомых применена комбинированная система управления, состоящая из нелинейного регулятора, синтезированного на основе модели (1) и формирующего тягу его движителей τ_n и обеспечивающего высокую точность движения ведомого при номинальных значениях их параметров, и регулятора с переменной структурой, формирующего тягу τ_s и компенсирующего отклонения параметров ведомых в диапазонах (3) [26]. При этом общая тяга ведомого равнялась

$$\tau=\tau_n+\tau_s.\qquad(19)$$

Нелинейный регулятор имеет вид:

$$\alpha = \mathbf{V}^* + \Lambda\mathbf{E}, \quad \boldsymbol{\tau}_n = \mathbf{M}_n\dot{\alpha} + (\mathbf{C}_n + \mathbf{D}_n)\alpha + \mathbf{g}, \qquad (20)$$

где Λ – диагональная матрица положительных коэффициентов.

Регулятор с переменной структурой имеет вид:

$$\boldsymbol{\tau}_s = K_s \,|\, \mathbf{E} \,|\, sign(s), s = \mathbf{E}_v + \Lambda\mathbf{E}, \qquad (21)$$

где $\mathbf{E}_v = \mathbf{V}^* - \boldsymbol{\upsilon}_F = (\mathbf{R}_F^R)\boldsymbol{\upsilon}_{F,p}^*$; K_s – диагональная матрица положительных коэффициентов.

При синтезе этого регулятора используем функцию Ляпунова, которая часто применяется для исследования устойчивости систем с переменной структурой [29]:

$$V=0.5s^T\boldsymbol{M}s.$$

Производная функции V с учетом (2) имеет вид:

$$\dot{V} = s^T\mathbf{M}\dot{s} = s^T\mathbf{M}(\dot{\mathbf{V}}^* - \dot{\boldsymbol{\upsilon}}_F + \Lambda\dot{\mathbf{E}}) =$$
$$= s^T(\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}}^* + (\mathbf{C}+\mathbf{D})\boldsymbol{\upsilon}_F + \mathbf{g} + \mathbf{M}\Lambda\dot{\mathbf{E}} - \boldsymbol{\tau}). \qquad (22)$$

Подставив в (22) выражения (19)–(21), с учетом модели (2) получим:

$$\dot{V} = s^T(\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}}^* + (\mathbf{C}+\mathbf{D})\boldsymbol{\upsilon}_F + \mathbf{g} + \mathbf{M}\Lambda\dot{\mathbf{E}} -$$
$$-\mathbf{M}_n\dot{\alpha} - (\mathbf{C}_n + \mathbf{D}_n)\alpha - \mathbf{g} - \boldsymbol{\tau}_s) =$$
$$= s^T(\mathbf{M}_\Delta\dot{\alpha} + (\mathbf{C}_\Delta + \mathbf{D}_\Delta)\boldsymbol{\upsilon}_F -$$
$$-(\mathbf{C}_n + \mathbf{D}_n)s - \boldsymbol{\tau}_s) = s^T(\mathbf{M}_\Delta\dot{\alpha} + (\mathbf{C}_\Delta + \mathbf{D}_\Delta)\boldsymbol{\upsilon}_F -$$
$$-K_s \,|\, \mathbf{E} \,|\, sign(s)) - s^T\mathbf{C}_n s - s^T\mathbf{D}_n s. \qquad (23)$$

Поскольку $s^T\boldsymbol{C}_n s \equiv 0$ [25], а $s^T\boldsymbol{D}_n s \geq 0$, то для выполнения условия $\dot{V} < 0$ K_s выбиралась в соответствии с неравенством:

$$K_{sii} > \max(\mathbf{M}_\Delta\dot{\alpha} + (\mathbf{C}_\Delta + \mathbf{D}_\Delta)\boldsymbol{\upsilon}_F)_i / E_{i\min}, \qquad (24)$$

где E_{imin} – допустимая динамическая ошибка управления по степеням свободы АНПА.

Переменные $\boldsymbol{E}_v$ и $\boldsymbol{E}$ для синтеза закона управления (19)–(21) формируются с помощью алгоритма прогнозирования (12)–(16).

Результаты моделирования

Для проверки работоспособности и эффективности предложенной системы, включающей алгоритмы (9), (14)–(16) прогнозирования движения целевой точки и систему управления (19)–(21), было проведено математическое моделирование, в процессе которого исследовались особенности работы указанной системы при движении АНПА-ведомого за лидером, перемещающимся по пространственной траектории.

Моделирование проводилось с использованием программной среды CoppeliaSim, которая позволяет исследовать работу робототехнических систем и их оборудования в трехмерных сценах. В этой среде были описаны АНПА-лидер с установленными на его корпусе световыми маяками и АНПА-ведомый с закрепленной на нем бортовой видеокамерой, работа которой также моделировалась в указанной среде. Сформированное в этой среде изображение лидера передавалось от видеокамеры во внешнюю программу для дальнейшей обработки и формирования данных о положении и ориентации АНПА-лидера. Движения лидера и ведомого, а также работа предложенной системы моделировались в этой внешней программе, а результаты расчетов передавались в среду CoppeliaSim для размещения их трехмерных моделей в рассчитанных позициях с рассчитанной ориентацией.

При моделировании динамика АНПА-ведомого описывалась системой дифференциальных уравнений (1) со следующими номинальными параметрами [26]:

– матрица инерции АНПА $\boldsymbol{M}_R = diag$(170 кг, 170 кг, 170 кг, 10.2 кгм^2, 23.4 кгм^2, 23.4 кгм^2);

– матрица инерции присоединенных масс и моментов инерции $\boldsymbol{M}_A = diag$(15 кг, 85 кг, 85 кг, 5 кгм^2, 9.6 кгм^2, 9.6 кгм^2);

– гидродинамические коэффициенты d_1 = (18 Нс/м, 105 Нс/м, 105 Нс/м, 20Нмс, 80 Нмс, 80 Нмс), d_2 = (18 Нс^2/м^2, 105 Нс^2/м^2, 105 Н с^2/м^2, 20 Нмс^2, 80 Нмс^2, 80 Нмс^2).

В процессе моделирования считалось, что АНПА-ведомый имеет нулевую плавучесть, а расстояние между его центром масс и центром плавучести было равно 0.01 м по оси z связанной СК. Также полагалось, что параметры АНПА отличаются он номинальных на следующие величины:

– $\boldsymbol{M}_\Delta = diag$(140 кг, 140 кг, 140 кг, 4 кгм^2, 7 кгм^2, 7 кгм^2);

– $d_{\Delta 1}$ = (9 Нс/м, 50 Нс/м, 50 Нс/м, 10 Нмс, 30 Нмс, 30 Нмс);

– $d_{\Delta 2}$ = (9 Нс^2/м^2, 50 Нс^2/м^2, 50 Нс^2/м^2, 10 Нмс^2, 30 Нмс^2, 30 Нмс^2).

Параметры синтезированной системы управления имели значения $K_s = diag$(100, 100, 100, 100, 100, 100), $\Lambda = diag$(0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.4, 0.4).

Период обновления данных, поступающих от бортовой видеокамеры, равен 0.1 с. Прогнозирование движения целевой точки осуществлялось с периодом 0.001 с. Параметры алгоритма восстановления параметров движения целевой точки имели значения: M=50, N= 4.

При моделировании АНПА-лидер и его ведомый перемещались в абсолютной СК по траектории, состоящей из двух частей. Первая часть соответствовала движению лидера в АСК по прямой x=3.0+1.2t (м), y = 0 (м), z = 1.2 (м) с постоянной скоростью 1.2 м/с. Вторая часть траектории движения лидера задавалась уравнениями x=3.0+1.2t (м), y=-7.5+7.5cos(0.1(t-32)) (м), z=6.2-5.0cos(0.05(t-32)) (м) В процессе моделирования продольная ось АНПА-лидера всегда ориентировалась вдоль траектории его движения. При движении лидера вектор, задающий программное положение ведомого в СК, связанной с АНПА-лидером, был постоянен X_L^*=[-1.5, -6.0]. Также в процессе моделирования считалось, что в начале движения АНПА-лидер уже находится в зоне видимости видеокамеры ведомого. Следует отметить, что способ задания траектории лидера не влияет на результаты исследования качества работы предложенной системы управления движением АНПА-ведомого, так как ведомый не использует аналитическую информацию о траектории лидера.

Вначале были проведены два исследования созданного алгоритма прогнозирования (уравнения (9), (14)–(16)) и обеспечивающего движение целевой точки ведомого, управляемого системой управления (19)–(21). В первом исследовании полагалось, что текущие положение и ориентация АНПА-лидера известны точно. Это позволило оценить не только качество работы указанного алгоритма прогнозирования, но и влияние возможных погрешностей прогноза на точность управления движением АНПА-ведомого.

Во втором исследовании положение и ориентация лидера рассчитывались на основе видеоданных, сформированных в среде CoppeliaSim. Это исследование позволило оценить качество работы всей синтезированной системы в целом уже при использовании данных, получаемых после обработки изображений маяков лидера.

Результаты первого исследования показаны на рис. 4. На этом рисунке серыми кривыми показаны изменения координат и скоростей движения целевой точки, движущейся по программной траектории ведомого, в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$, связанной с ним. Черными кривыми показаны оценки указанных координат и скоростей в этой СК, рассчитанные с помощью алгоритмов (9), (14)–(16).

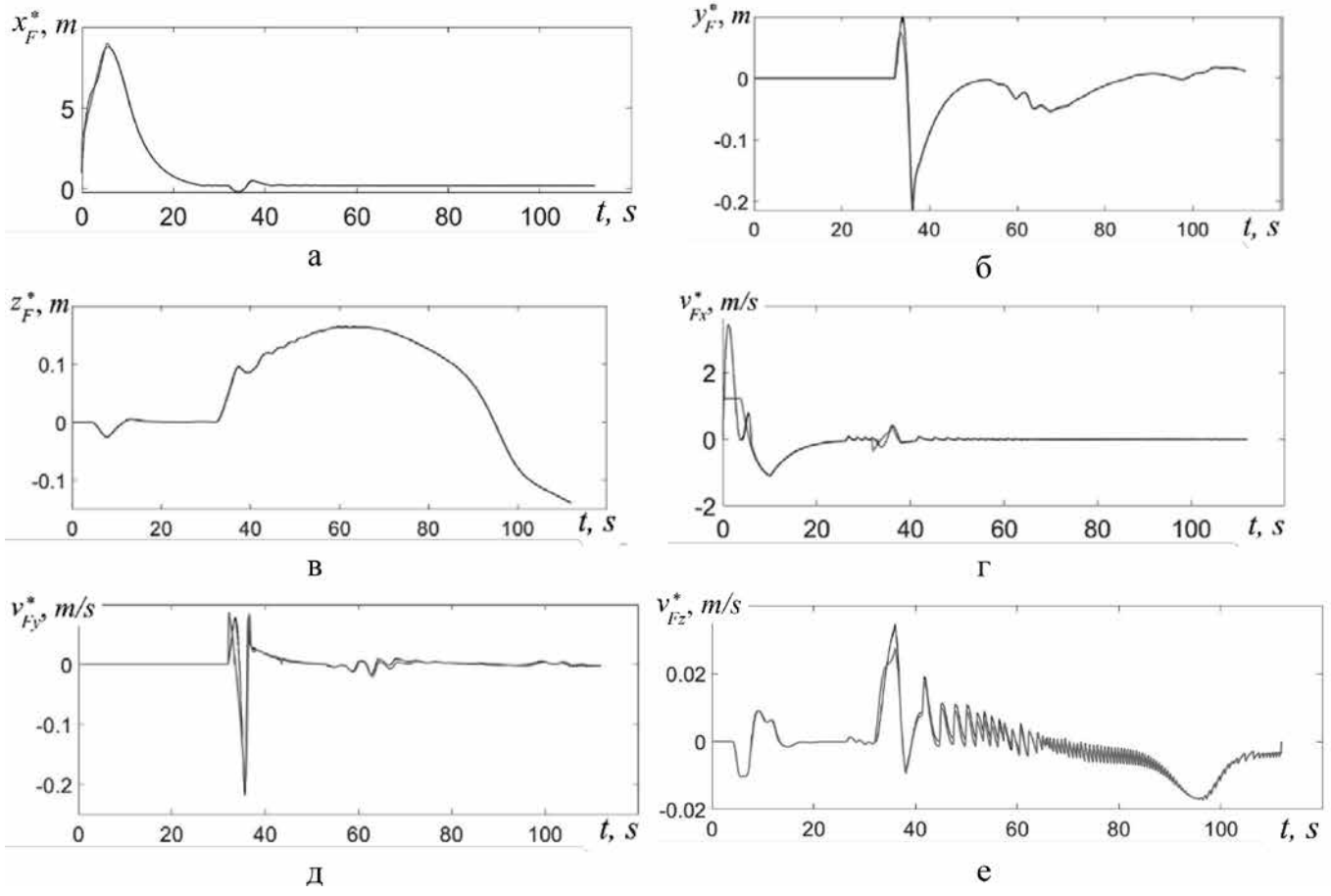

Рис. 4. Изменения расчетных и реальных величин координат и скоростей движения целевой точки в СК , связанной АНПА-ведомого

Перед началом движения в исходном положении главные оси лидера и ведомого совпадают с осями абсолютной СК, массив Ω заполнен нулевыми значениями, координаты АНПА-лидера в абсолютной СК были – (3, 0, 1.2), а АНПА-ведомого – (- 1.5, - 6, 1.2). То есть ведомый в исходном положении специально ставился по оси xFR дальше от своего программного положения относительно ведущего, а по координатам y_{FR} и z_{FR} оставались прежними. Более того, при моделировании движение АНПА-ведомого начиналось через 4 секунды после начала движения лидера. За это время положение программной точки по координате x_{FR} изменилось с 3 м до 7.8 м (см. рис. 4, а). Это делалось для проверки точности восстановления системой требуемого программного положения ведомого относительно лидера при внешних возмущениях.

Начальное рассогласование между целевой точкой и АНПА-ведомым (см. рис. 4, а) по оси x_{FR} отрабатывалось его системой управления до 0.2 м к моменту t = 28 с и в дальнейшем не возрастало. За это время скорость движения целевой точки относительно ведомого по оси xFR (см. рис. 4, г) изменялась от 1.2 м/с (серая кривая) до -1.1 м/с (на этапе разгона ведомого). Затем изменения этой скорости по модулю не превышали 0.02 м/с, что говорит о синхронизации движения АНПА-лидера и АНПА-ведомого.

Отрицательные значения скоростей на рис. 4, г-е означают, что ведомый по соответствующей координате движется быстрее лидера, приближаясь к целевой точке, а положительные – что он движется медленнее лидера, удаляясь от целевой точки.

Из рис. 4, а и 4, г также видно, что в течение 6 с после начала движения ведомого прогнозирование изменения величины положения и скорости движения целевой точки по координате x_{FR} происходит со значительными ошибками до момента, пока массив Ω не заполнится данными, необходимыми для нормальной работы алгоритма аппроксимации (9). После заполнения этого массива в установившемся режиме работы отклонения ведомого от целевой точки по координате x_{FR} не превышают 0.02 м, по координате y_{FR} – 0.002 м, а по координате z_{FR} – 0.01 м. Это вполне достаточно для качественного управления ведомым.

Анализ особенностей работы системы показал (см. рис. 4, в), что на начальном этапе движения возможно появление кратковременных отклонений целевой точки по координате z_{FR} от нулевого значения. Это объясняется взаимовлияниями между некоторыми степенями свободы АНПА, когда ускорение по оси x связанной СК приводит к появлению момента по углу дифферента и смещению АНПА-ведомого по оси z_{FR}. После проявления это взаимовлияние быстро компенсируется системой управления ведомого.

В момент изменения вида траектории движения АНПА-лидера (t = 32 с на рис. 4) в СК $x_{FR}y_{FR}z_{FR}$ происходит резкое рассогласование программных и прогнозных значений координат и скоростей движения целевой точки. Это объясняется тем, что не все данные, содержащиеся в массиве Ω, с помощью которого рассчитываются скорости и ускорения движения целевой точки, соответствуют новой траектории движения АНПА-лидера. Однако это сильное рассогласование быстро (за несколько секунд) отрабатывается системой. Исследования показали, что описанный эффект возникает только при резком переходе от прямолинейной к криволинейной траектории. Если эти переходы сглажены, то описанный эффект проявляется слабо.

Таким образом, представленные результаты моделирования в целом подтверждают возможность обеспечения высокоточного движения группы АНПА с помощью предложенной системы управления, если АНПА-лидер перемещается со скоростью до 1.4 м/с, даже при большом периоде (0.1 с) обновления данных о его положении относительно ведомого.

Результаты второго исследования работы системы управления (19)–(21) движением ведомого, когда учитывались погрешности в определении положения и ориентации АНПА-лидера, представлены на рис. 5.

Величины возникающих погрешностей тем больше, чем реже обновляются данные, получаемые от видеокамеры, и больше скорость движения АНПА-лидера, так как в промежутке времени между обновлениями данных АНПА-ведомый движется в соответствии с формируемым прогнозом. Однако наличие указанных погрешностей все равно позволяет обеспечить работоспособность системы управления (19)–(21) и движение АНПА-ведомого с динамическими точностями, достаточными для выполнения всех типов подводных операций. Даже при резком увеличении ошибки по соответствующим каналам управления происходит ее быстрая отработка системой управления, в том числе с помощью скользящего режима. Это происходит при правильном формировании оценок положения и скорости движения целевой точки относительно ведомого.

Таким образом, результаты моделирования полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенного нового способа формирования группового управления АНПА с использованием световых маркеров, которые могут помещаться не

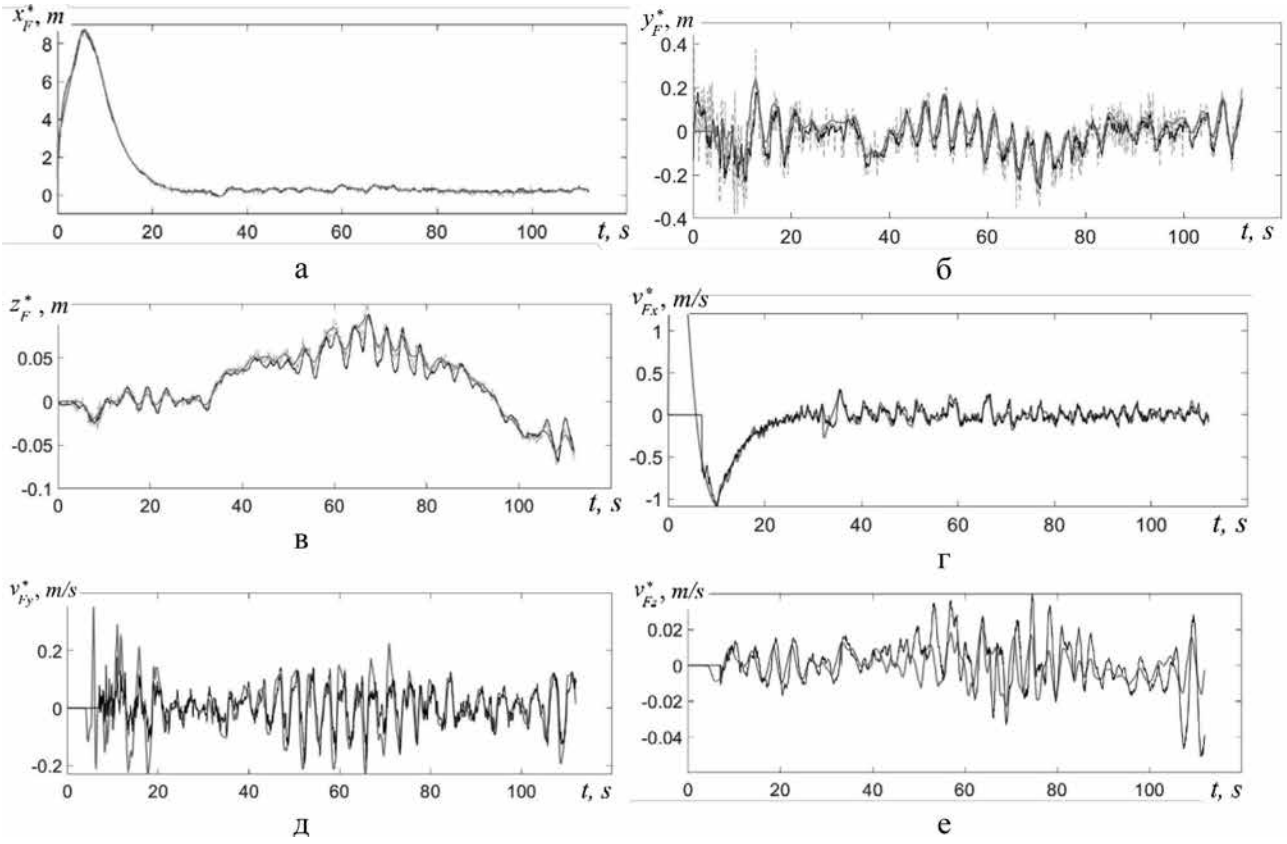

Рис. 5. Изменения расчетных и реальных величин координат и скоростей движения целевой точки в СК xFRyFRzFR, связанной АНПА-ведомого при наличии погрешностей в определении положения и ориентации АНПА-лидера

только на АНПА-лидере, но и на следующих за ним ведомых, образуя сложное построение группы с использованием более простого по оснащению бортового оборудования АНПА-ведомых.

Заключение

В работе создан новый метод синтеза систем управления пространственным движением связки АНПА-лидер и группа АНПА-ведомых при их согласованном (упорядоченном) совместном перемещении в пространстве. Синтезированная с помощью этого метода система обеспечивает точное заданное позиционирование ведомых относительно лидера с использованием информации, поступающей с низкой частотой только от соответствующих бортовых видеокамер ведомых. С целью повышения точности работы созданной системы помимо использования визуальной информации при реализации управления ведомыми в предложенном методе используется оценка параметров движения АНПА-лидера (его скоростей и ускорений) для прогноза его движения относительно АНПА-ведомых на промежутках времени между обновлениями информации, получаемой от видеокамер, с использованием ранее уже поступившей и сохраненной информации.

Главным преимуществом предложенного подхода является создание группового движения в режиме лидер–ведомые без использования медленного обмена данными между ними по гидроакустическим каналам связи, а также без использования ведомыми дорогостоящих гидроакустических навигационных систем.

Следует отметить, что в работе рассматривались только теоретические вопросы построения систем группового управления АНПА на основе визуальной информации. При этом вопросы для дальнейших исследований включают оценку характеристик бортовых видеокамер, необходимых для реализации предложенного метода, возможные конструктивные особенности размещения бортовой видеокамеры и управления ориентацией, особенности движения больших групп АНПА и их движение в обстановке с препятствиями, а также стратегию действий АНПА-ведомых при потере визуального контакта с лидером.

Работа поддержана РНФ (грант 22-29-01156).

ЛИТЕРАТУРА

1. Das B., Subudhi B., Pati B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: An overview // International Journal of Automation and Computing. 2016. Vol.13, no. 3. P. 199–225.
2. Bagnitckii A., Inzartsev A., Lebedko A., Panin A., Pavin A. A survey of underwater areas using a group of AUVs // Proceedings of the 2017 IEEE OES International Symposium on Underwater Technology. 2017. Paper no. 7890315.
3. Спорышев М.С., Щербатюк А.Ф. Об использовании групп морских роботов для охраны водных акваторий: краткий обзор // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 21–27.
4. Besseghieur K. L., Trębiński R., Kaczmarek W., Panasiuk, J. From trajectory tracking control to Leader–Follower formation control // Cybernetics and Systems. 2020. Vol. 51, no. 4. P. 339–356.
5. Das K., Fierro R., Kumar V., Ostrowski J. P., Spletzer J., Taylor C. J. A vision-based formation control framework // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2002. Vol. 18, no. 5. P. 813–825.
6. Bazoula A., Maaref H. Fuzzy separation bearing control for mobile robots formation // Proc. World Acad. Sci. 2007. Vol. 1, no.5. P. 1–7.
7. Li, Xiao J., Cai Z. Backstepping Based Multiple Mobile Robots Formation Control // Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), Edmonton, Canada, 2005. P. 887–892.
8. Subudhi B., Madan Mohan R., Filaretov V., Zuev A. Design of A Consensus Based Flocking Control Of Multiple Autonomous Underwater Vehicles Using Sliding Mode Approach // Proc. of the 28th DAAAM International Symposium. Zadar, Croatia, 2017. P. 4–13.
9. Maki T., Matsuda T., Sakamaki T., Ura T., Kojima J. Navigation Method for Underwater Vehicles Based on Mutual Acoustical Positioning With a Single Seafloor Station // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2013. Vol. 38. P. 167–177.
10. Atwood D.K., Leonard J.J., Bellingham J.G., Moran B.A. An Acoustic Navigation System for Multiple Vehicles // Proc. Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology. 1995. P. 202–208.
11. Filaretov V., Yukhimets D. The method of path planning for AUV-group moving in desired formation in unknown environment with obstacles // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, no. 2. P. 14650–14655.
12. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. 2013. Bergen, 2013. P. 1–8.
13. Rout R., Subudhi B. A backstepping approach for the formation control of multiple autonomous underwater vehicles using a leader-follower strategy // Journal of Marine Engineering & Technology. 2016. Vol. 15, no. 1. P. 38–46.
14. Eustice R. M., Whitcomb L. L., Singh H., Grund M. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, 2007. P. 4257–4264.
15. Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanci P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D. Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs // Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016. Shanghai, China, 2016. P. 1–9.
16. Filaretov V., Subudhi B., Yukhimets D., Mursalimov E. The method of matching the navigation systems of AUV-leader and AUV-followers moving in formation // Proceedings of 2019 International Russian Automation Conference. Sochi, Russia, 2019. Number of paper 8867597.
17. Zhao Y., Zhang Y., Lee J. Lyapunov and sliding mode based leader-follower formation control for multiple mobile robots with an augmented distance-angle strategy // International Journal of Control, Automation and Systems. 2019. doi:10.1007/s12555-018-0194-7.
18. Yan Z., Xu D., Chen T., Zhou J. Formation control of unmanned underwater vehicles using local sensing means in absence of follower position information // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2021. Vol. 18, no. 1. doi:10.1177/1729881420986745.
19. Indiveri G. Geotechnical Surveys with Cooperative Autonomous Marine Vehicles: the EC WiMUST project // Proceedings 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV). 2018. P. 1–6. doi: 10.1109/AUV.2018.8729794.
20. Streenan A., Du Toit N. Diver relative AUV navigation for joint human-robot operations // Proceedings of the 2013 OCEANS. San Diego, 2013. P. 1–10. doi: 10.23919/OCEANS.2013.6741209.
21. Родионов А.Ю., Щербатюк А.Ф. Перспективы использования оптических систем связи и ориентации в подводной робототехнике // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 4(38). С. 37–49.
22. Lwin K. N., Myint M., Mukada N., Yamada D., Matsuno T., Saitou K., Minami M. Sea docking by dual-eye pose estimation with optimized genetic algorithm parameters // Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. 2019. Vol. 96, no. 2. P. 245–266.
23. Figueiredo A. B., Ferreira B. M., Matos A. C. Vision-based localization and positioning of an AUV // Proc. of the OCEANS 2016, Shanghai, 2016.
24. Xiao H., Chen X. Robotic target following with slow and delayed visual feedback // International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2020. Vol. 4, no. 4. P. 378–389.
25. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Chichester, UK: Jonh Willey & Sons, 2011. 582 p.
26. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Двухконтурная система с эталонной моделью для управления пространственным движением грузового необитаемого подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление, 2021. Vol.22, no. 3. P.134–144.
27. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2008.
28. Ikonen E., Najim K. Advanced process identification and control. Marcel Dekker, 2002, 310 p.
29. Wang D., Shen Y., Wan J., Sha Q., Li G., Chen G., He B. Sliding mode heading control for AUV based on continuous hybrid model-free and model-based reinforcement learning // Applied Ocean Research. 2022. Vol. 118. Paper no. 102960.

Сведения об авторах

ФИЛАРЕТОВ Владимир Федорович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5

Научные интересы: теория управления, адаптивные системы управления, робастные системы управления, робототехника, подводные роботы, промышленные роботы

Тел.: +7(423)313783, **E-mail**: filaret@iacp.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-8900-8081

ЮХИМЕЦ Дмитрий Александрович, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о-в Русский, п. Аякс, 10

Научные интересы: робототехника, информационно-управляющие системы, адаптивные и робастные системы управления

Тел.: +7(924)2328644

E-mail: yukhimets.da@dvfu.ru

ORCID: 0000-0003-2676-9902

DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_03

CONTROL METHOD OF AUV-FOLLOWER ON THE BASE OF VISUAL INFORMATION ABOUT AUV-LEADER POSITION

V.F. Filaretov, D.A. Yukhimets

Paper dedicated to development of synthesis method of high accuracy control system of AUV formation control in leader-follower strategy. The synthesized control system obtains accurate positioning AUV-followers relative AUV-leader with using information from onboard video cameras of AUV-followers. To ensure high control accuracy in the proposed method, an estimate of the movement parameters of the AUV-leader (its speeds and accelerations) is formed using previously received and stored information, and a prediction of its movement relative to the AUV-followers is made at intervals between updates of information received from video cameras. The results of mathematical simulation show the effectiveness of the proposed approach for the implementation of A UV formation control systems in the leader-follower strategy.

Keyword: autonomous underwater vehicle, formation control, image processing, optimization, approximation, motion prediction, parametric uncertainty, high accuracy control.

References

1. Das B., Subudhi B., Pati B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: An overview, *International Journal of Automation and Computing*, 2016, vol.13, no. 3, pp.199-225.

2. Bagnitckii A., Inzartsev A., Lebedko A., Panin A., Pavin A. A survey of underwater areas using a group of AUVs, *Proceedings of the 2017 IEEE OES International Symposium on Underwater Technology*, 2017, paper no. 7890315.

3. Sporyshev M.S., Scherbatuk A.F. About using of groups of underwater robots for guarding marine aria: short survey, *Underwater investigation and robotics*, 2018, vol. 26, no 2, pp. 21–27.

4. Besseghieur K. L., Trębiński R., Kaczmarek W., Panasiuk, J. From trajectory tracking control to Leader–Follower formation control, *Cybernetics and Systems*, 2020, vol. 51, no. 4, pp. 339-356.

5. Das K., Fierro R., Kumar V., Ostrowski J. P., Spletzer J., Taylor C. J. A vision-based formation control framework, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, vol. 18, no. 5, pp. 813-825.

6. Bazoula A., Maaref H. Fuzzy separation bearing control for mobile robots formation, *Proc. World Acad. Sci*. 2007, vol. 1, no.5, pp.1–7.

7. Li, Xiao J., Cai Z. Backstepping Based Multiple Mobile Robots Formation Control, *Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), Edmonton, Canada,* 2005, pp. 887–892.

8. Subudhi B., Madan Mohan R., Filaretov V., Zuev A. Design of A Consensus Based Flocking Control Of Multiple Autonomous Underwater Vehicles Using Sliding Mode Approach, *Proc. of the 28th DAAAM International Symposium. Zadar, Croatia, 2017, pp. 4-13.*

9. Maki T., Matsuda T., Sakamaki T., Ura T., Kojima J. Navigation Method for Underwater Vehicles Based on Mutual Acoustical Positioning With a Single Seafloor Station, *IEEE J. of Oceanic Engineering,* 2013, vol. 38, pp. 167–177.

10. Atwood D.K., Leonard J.J., Bellingham J.G., Moran B.A. An Acoustic Navigation System for Multiple Vehicles, *Proc. Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology*, 1995, pp.202-208.

11. Filaretov V., Yukhimets D. The method of path planning for AUV-group moving in desired formation in unknown environment with obstacles, *IFAC-PapersOnLine,* 2020, vol. 53. no. 2, pp. 14650–14655.

12. Caiti A., Calabrò V., Fabbri T., Fenucci D., Munafò A. Underwater communication and distributed localization of AUV teams, *Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS. 2013. Bergen.* 2013, pp. 1–8.

13. Rout R., Subudhi B. A backstepping approach for the formation control of multiple autonomous underwater vehicles using a leader-follower strategy, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 38–46.

14. Eustice R. M., Whitcomb L. L., Singh H., Grund M. Experimental Results in Synchronous-Clock One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma,* 2007, pp. 4257-4264.

15. Cario G., Casavola A., Djapic V., Gjanci P., Lupia M., Petrioli C., Spaccini D. Clock Synchronization and Ranging Estimation for Control and Cooperation of Multiple UUVs, *Proc. of the MTS/IEEE Int. Conf. OCEANS 2016. Shanghai, China.*, 2016, pp. 1–9.

16. Filaretov V., Subudhi B., Yukhimets D., Mursalimov E. The method of matching the navigation systems of AUV-leader and AUV-followers moving in formation, *Proceedings of 2019 International Russian Automation Conference. Sochi, Russia, 2019, Number of paper 8867597.*

17. Zhao Y., Zhang Y., Lee J. Lyapunov and sliding mode based leader-follower formation control for multiple mobile robots with an augmented distance-angle strategy, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, doi:10.1007/s12555-018-0194-7.

18. Yan Z., Xu D., Chen T., Zhou J. Formation control of unmanned underwater vehicles using local sensing means in absence of follower position information, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2021, vol.18, no. 1, doi:10.1177/1729881420986745.

19. Indiveri G. Geotechnical Surveys with Cooperative Autonomous Marine Vehicles: the EC WiMUST project, *Proceedings 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUV.2018.8729794.

20. Streenan A., Du Toit N. Diver relative AUV navigation for joint human-robot operations, *Proceedings of the 2013 OCEANS - San Diego*, 2013, pp. 1-10, doi: 10.23919/OCEANS.2013.6741209.

21. Rodionov A.Yu., Scherbatuk A.F. The perspectives of using optical systems of communication and orientation in the underwater robotics, *Underwater investigation and robotics*, 2021, vol.38, no.4, pp. 37–49.

22. Lwin K. N., Myint M., Mukada N., Yamada D., Matsuno T., Saitou K., Minami M. Sea docking by dual-eye pose estimation with optimized genetic algorithm parameters, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2019, vol. 96, no. 2, pp. 245-266.

23. Figueiredo A. B., Ferreira B. M., Matos A. C. Vision-based localization and positioning of an AUV, *Proc. of the OCEANS 2016, Shanghai*, 2016.

24. Xiao H., Chen X. Robotic target following with slow and delayed visual feedback, *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 378-389.

25. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, Jonh Willey & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.

26. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Two-Loop System with Reference Model for Control of Spatial Movement of Cargo Underwater Vehicle. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp.134-144.

27. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library, Sebastopol, CA: O'Reilly, 2008.

28. Ikonen E., Najim K. Advanced process identification and control, *Marcel Dekker,* 2002*,* 310 p.

29. Wang D., Shen Y., Wan J., Sha Q., Li G., Chen G., He B. Sliding mode heading control for AUV based on continuous hybrid model-free and model-based reinforcement learning, *Applied Ocean Research*, 2022, Vol. 118, paper no. 102960.

About the authors

FILARETOV Vladimir Fedorovich, Doctor of Science, professor, Chief Researcher
Institute of Automation and Control Processes Far East Branch of RAS
Address: 690041, Vladivostok, Radio str., 5
Research interests: control theory, adaptive system, robust system, robotics, underwater robots, industrial robots
Phone: +7(423)313783
E-mail: filaret@iacp.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-8900-8081

YUKHIMETS Dmitry Alexandrovich, Doctor of Science, associated professor, Lead Researcher
Far Eastern Federal University
Research interests: robotics, information-control systems, adaptive and robust control systems
Address: 690922, Vladivostok, Russian isl., Ayaks stl., 10
Phone: +7(924)2328644
E-mail: yukhimets.da@dvfu.ru
ORCID: 0000-0003-2676-9902

Recommended citation:

Filaretov V.F., Yukhimets D.A. CONTROL METHOD OF AUV-FOLLOWER ON THE BASE OF VISUAL INFORMATION ABOUT AUV-LEADER POSITION. Underwater investigations and robotics. 2022. No. 4 (42). P. 25–39. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_03. EDN: EMKMPF.