

Реализация системы видеопозиционирования подводного аппарата

Кропотов А.Н.*, **Макашов А.А.****, **Плясунов В.М.*****

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, МГТУ

им. Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия

**e-mail: alex.kropotov@sm.bmstu.ru*

***e-mail: amakashov@bmstu.ru*

****e-mail: sm42@sm.bmstu.ru*

Аннотация

В статье рассматривается реализация системы видеопозиционирования подводного аппарата, предназначенной для определения локальных параметров движения аппарата, на основе обработки видеоинформации. Приводится описание принципов построения и алгоритмов работы такой системы. Исследован вопрос адаптации алгоритма для его применения на малоразмерном подводном аппарате с высокими динамическими характеристиками. Приведены результаты численного моделирования, и полунатурных испытаний системы.

Ключевые слова: локальная навигация, видеообработка, подводный аппарат, система управления, компьютерное зрение, сопоставление изображений, динамическое позиционирование.

В современных условиях расширения подводно-технических работ с целью поиска и добычи подводных месторождений, океанографических исследований подводной среды, аварийно-спасательных работ актуальной задачей для подводных аппаратов в придонном режиме плавания является обеспечение возможности высокоточного позиционирования подводного аппарата вблизи объекта работ. Такая задача высокоточного позиционирования актуальна, не только при проведении подводных работ, но и в других областях мобильной робототехники, например, при зависании беспилотных летательных аппаратов.

Основной проблемой в таком режиме является высокоточное измерение локальных перемещений подводного аппарата (ПА) с целью замыкания обратных связей его системы управления. Использование информации о скорости с абсолютных гидроакустических лагов или линейных ускорениях с устройств инерциальной навигации вносит накапливающуюся со временем неустранимую ошибку по координатам, вызванную погрешностями этих датчиков, так как значения координат определяются путем интегрирования их показаний по времени.

Перспективным направлением решения данной проблемы является компьютерная обработка видеоизображений, поступающих с видеокамеры, размещенной на подводном аппарате.

В МГТУ им. Баумана ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки систем видеопозиционирования (СВП) подводных аппаратов различного назначения. В данной работе рассматривается реализация такой системы для обитаемого подводного аппарата, а также ее адаптация для малых телеуправляемых подводных аппаратов.

СВП осуществляют обработку видеоинформации, получаемой с видеокамеры ПА, с целью определения его локальных параметров движения, которые используются для замыкания обратных связей в контурах системы управления подводного аппарата. Для этого используются специально разработанные алгоритмы обработки видеоизображений.

Предлагаемая СВП осуществляет измерение маршевых и лаговых координат ПА, отстояния аппарата от дна, скорости ПА по маршу и лагу и курсового угла аппарата. Сложность реализации такой системы вызвана необходимостью сохранять ее устойчивую работоспособность в условиях слабой контрастности подводной среды, переменной освещенности рабочей сцены, высокой частоты замыкания контуров системы управления.

В настоящее время различные методы определения параметров движения подводного аппарата посредством обработки видеоизображений активно изучаются и рассматриваются в научно-технической литературе, например [1,2,3,4].

В работе [1] предложен метод, основанный на сопоставлении изображений при помощи дескрипторов SURF, с последующей коррекцией. Однако исследование проводилось при постобработке уже отснятых изображений, и вопрос о его применимости в системе реального времени, как отметили авторы, пока не решён. Подход на основе корреляционных алгоритмов и сопоставления особенностей, выявленных детектором Харриса, изложен в работе [2].

В работе [3] для сопоставления видеоизображений в последовательности предлагается строить аккумулятор, аналогичный используемому в преобразовании

Хафа. Однако, как и изложенный выше, такой подход характеризуется низкой частотой работы предложенного алгоритма.

В отличие от предыдущих подходов, осуществляющих позиционирование по произвольным изображениям, в работе [4] рассматривается вопрос позиционирования аппарата над поверхностью с нанесёнными маркерами специального вида.

Как можно заметить, все предложенные методы позиционирования являются вычислительно затратными, либо предполагают позиционирование объекта с использованием специализированных маркеров, что во многих реальных ситуациях невозможно. Таким образом, актуальной является задача реализации метода позиционирования, который бы обеспечил, помимо точностных характеристик, быстродействие, устойчивость и сходимост ь переходных процессов в использующей его системе управления в режиме реального времени.

Выбор метода обработки видеоизображения СВП с получением из него относительных координат был произведён на основании сравнения корреляционно-экстремальных алгоритмов и метода оптического потока. Целью сравнения был выбор устойчивого метода, позволяющего вычислять координаты носителя в реальном масштабе времени на встраиваемой вычислительной технике. По его результатам для вычисления линейных и угловых перемещений было предложено использовать модифицированный метод Лукаса-Канаде [5], представляющего собой один из методов оценивания оптического потока. Остальные рассмотренные варианты не предоставляли возможности работы в реальном масштабе времени. Впоследствии проводилось сравнение с методами, основанными на сопоставления

дескрипторов [6-8]. Данное сравнение показало затруднительность применения в системах реального времени дескрипторов SIFT и SURF. Применение дескрипторов BRISK позволяло работать в режиме реального времени, но устойчивость их выделения на слабоконтрастном изображении была недостаточной.

При разработке алгоритма СВП сделано допущение, что в поле зрения видеокамеры находится неподвижная поверхность, имеющая приблизительно плоскую форму. Такое допущение позволило перейти от нелинейной модели гомографии, требующей оценки 8 параметров движения камеры, к упрощённой линейной модели аффинного движения, характеризующейся 4 параметрами. В дальнейшем было экспериментально установлено, что данная модель сохраняет работоспособность при углах крена и дифферента подводного аппарата, не превышающих 30° . Изображение, получаемое с видеокамеры, проходит предварительную обработку, в частности, устраняются оптические искажения, вносимые объективом видеокамеры. Для обеспечения возможности работы в реальном времени используется изображение разрешением 320×240 пикселей.

Алгоритм вычисления перемещений ПА работает в два этапа. На первом этапе, на некотором кадре, используемом в качестве опорного, выделяются яркостные неоднородности, представляющие собой квадратные ячейки размера $csize \times csize$, где $csize = 4 \dots 32$ пикселей, обладающие достаточной контрастностью. Затем данные неоднородности ищутся на текущем кадре и определяются их смещения. Традиционно, для этой цели применяются методы, основанные на анализе функции взаимной корреляции изображений, являющемся чрезвычайно вычислительно ёмкой

задачей. Поэтому, для уменьшения количества вычислений, было использовано приближение корреляционной функции с помощью функционала схожести [9]:

$$F(a,b) = \sum_{x=n}^{x+n} \sum_{y=m}^{y+m} f(x,y,a,b) \quad (1),$$

$$f(x,y,a,b) = |Video(x+a,y+b) - Sample(x,y)|$$

где $Video(x, y)$ — яркость текущего кадра в точке (x, y) ; $Sample(x, y)$ — яркость опорного кадра в точке (x, y) ; $m, n = csize / 2$ — половина размера ячейки по соответствующей координате, пиксел, а используемая система координат показана на рисунке 1.

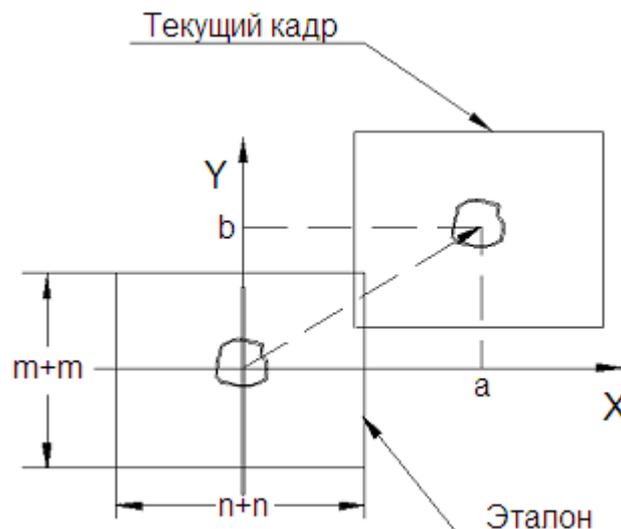


Рисунок 1. Определение смещения яркостной неоднородности в системе координат изображения

Очевидно, что в случае отсутствия шумов и геометрических искажений функционал (1) будет равен нулю в точке, совпадающей с максимумом корреляционной функции. Однако, из-за наличия в реальном изображении различных шумов и искажений $F(a, b) = c > 0$ в точке минимума. На рисунке 2

представлен вид функционала схожести для одномерного случая, когда изображения искажены гауссовским шумом различной амплитуды, N_{amp} .

В основе алгоритма лежит аппроксимация двухмерного функционала схожести конусом, что позволяет осуществлять более простой итерационный поиск его вершины, используя в качестве начального приближения ее положения прогноз, основанный на допущении об инерционности подводного аппарата в условиях водной среды.

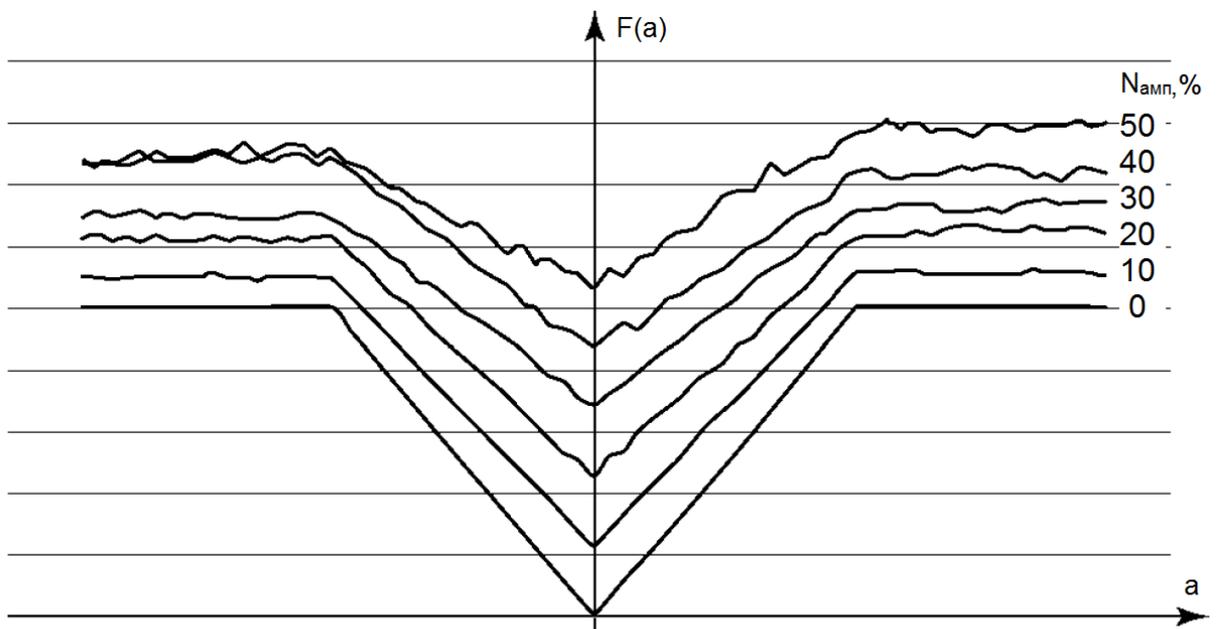


Рисунок 2. Вид функционала схожести для одномерного случая, при искажении изображений гауссовским шумом.

В случае если средняя вычисленная величина межкадровых смещений яркостных неоднородностей (в пикселях) превышает определенный порог, опорный кадр обновляется, заменяясь текущим, иначе опорный кадр сохраняется, что позволяет избежать статической ошибки ухода измерений.

На втором этапе, межкадровые смещения яркостных неоднородностей интерпретируются как трехмерное движение видеокамеры по трем линейным координатам: ΔX_k , ΔY_k , ΔZ_k (в системе координат скрепленной с камерой) и $\Delta\theta_k$ — углу поворота камеры относительно оси Z_k , перпендикулярной плоскости кадра.

Для каждого объекта (яркостной неоднородности) можно записать 2 уравнения:

$$\begin{cases} \Delta x_i = \left(\frac{\Delta X_k}{Z_k} + x_i \cos \theta_k + y_i \sin \theta_k \right) \frac{Z_k + \Delta Z_k}{Z_k} \\ \Delta y_i = \left(\frac{\Delta Y_k}{Z_k} + x_i \sin \theta_k - y_i \cos \theta_k \right) \frac{Z_k + \Delta Z_k}{Z_k} \end{cases}, i = 1..N; \quad (2),$$

где $\Delta X_e, \Delta Y_e, \Delta Z_e$ - перемещение камеры в связанной с ней системе координат, θ_e - поворот камеры вокруг оси, перпендикулярной плоскости кадра, x_i, y_i - экранные координаты объектов на опорном кадре, $\Delta x_i, \Delta y_i$ - экранные межкадровые смещения объектов, Z_e - расстояние до опорной поверхности. Так как считается, что угол θ_e при рассмотрении межкадрового смещения мал, то уравнения могут быть линеаризованы по углу поворота.

Таким образом, получаем переопределённую систему уравнений с четырьмя неизвестными, $\Delta X_e, \Delta Y_e, \Delta Z_e, \Delta\theta_e$ и числом уравнений, равным удвоенному числу выделенных яркостных неоднородностей. Она решается методом наименьших квадратов, определяются величина перемещения камеры за время между текущим и эталонным кадром, с точностью до масштабного коэффициента Z_k , представляющего собой расстояние от видеокамеры до наблюдаемой донной поверхности.

Предложенный алгоритм был реализован в СВП обитаемого подводного аппарата «Приз» [10] особенностью которого является инерционность его движения.

Для адаптации предложенного алгоритма к использованию в СВП для малогабаритных телеуправляемых ПА, обладающих высокими динамическими характеристиками подвижности, потребовалось решить проблему повышения частоты работы алгоритма, которое было достигнуто оптимизацией кода управляющей программы и применением более мощного вычислителя.

Кроме того, так как такие ПА обладают, как правило, большими пределами изменения крена и дифферента, возникает вопрос о применимости аффинной модели перемещения видеокамеры. Проведённые эксперименты показали, что работоспособность предложенного алгоритма сохраняется при углах крена и дифферента до 30° без его существенной модификации. Однако, поскольку в этом случае счисление осуществляется в системе координат связанной с ПА, возникает необходимость перепроектирования измеренных перемещений с учётом отклонения оптической оси видеокамеры от вертикального положения. Для этого используется информация с внешних датчиков об углах ориентации ПА (дифференте и крене), а также об отстоянии ПА от дна. Аналогичным образом может быть решена проблема при применении для СВП подвижной видеокамеры ПА. В этом случае используют показания датчика положения её привода.

Данный алгоритм динамического позиционирования позволяет определять линейные координаты, курсовой угол, линейные скорости и скорость поворота ПА по курсовому углу в режиме реального времени и обеспечивает частоту замыкания порядка 25 Гц, что является предельным значением при использовании обычной

аналоговой камеры. Дальнейшее повышение частоты замыкания становится возможным только после перехода на видеокамеры, обеспечивающие более высокую частоту съёмки.

Пример конструктивного воплощения системы видеопозиционирования в рамках малого телеуправляемого обзорного подводного аппарата приведен на рисунке 3. Его вычислительный модуль системы видеопозиционирования размещен на корабле-носителе, в пульте управления ПА.

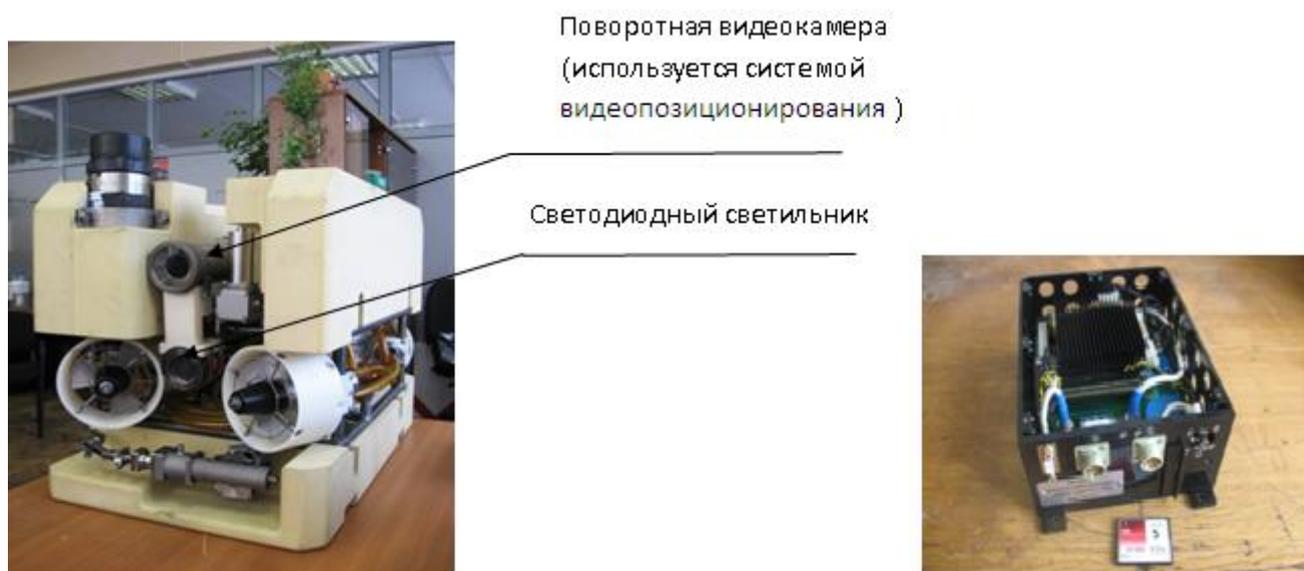


Рисунок 3. Внешний вид малого телеуправляемого подводного аппарата (слева) и его вычислительного модуля СВП (справа)

Был проведен ряд лабораторных, и полунатурных (в специальном бассейне) испытаний СВП, результаты которых изложены далее.

На рисунке 4 представлен результат испытаний ухода СВП по времени в лабораторных условиях. При этом видеокамера СВП закреплялась неподвижном основании, и осуществлялось документирование выдаваемых СВП линейных координат X (марш) и Y (лаг).

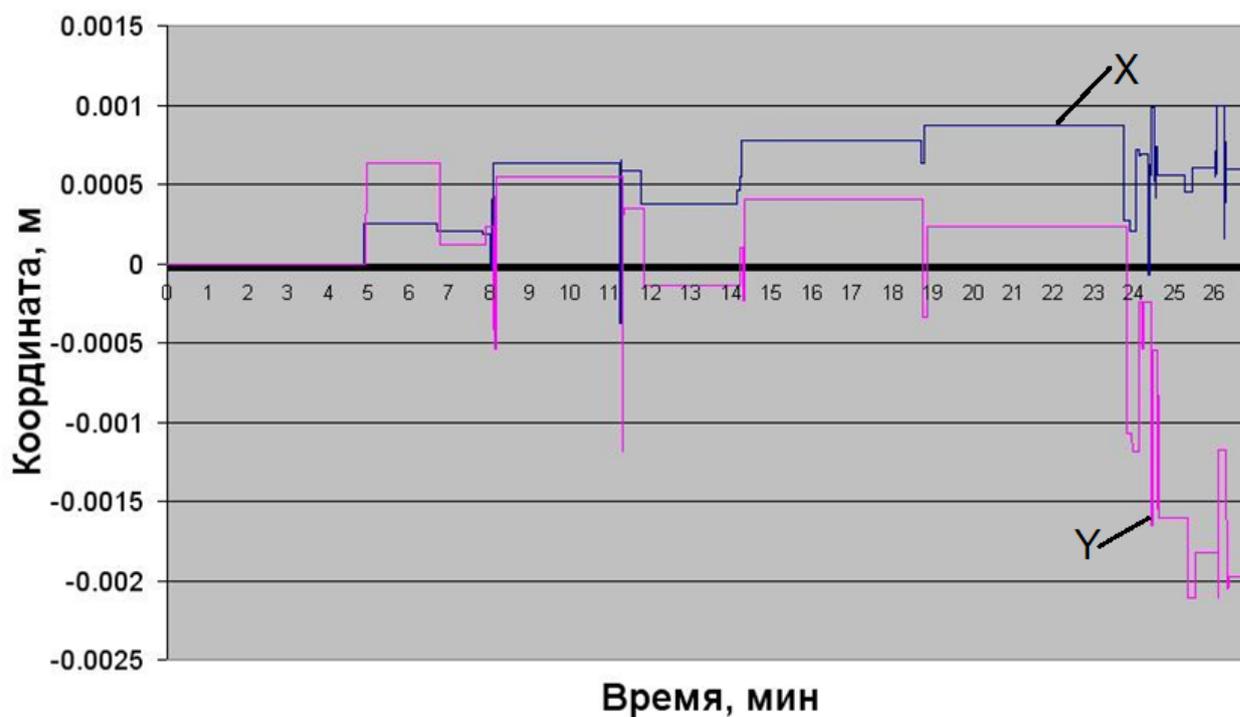


Рисунок 4. Результат статических испытаний СВП. Уход измеряемых СВП координат с течением времени

Видно, что особенностью СВП является практически полное отсутствие уходов измеренных координат с течением времени. Причиной этого является то, что интегрирование по времени не производится.

Также, в лабораторных условиях были определены точностные характеристики СВП:

- Диапазон допустимых линейных скоростей ПА – 0..2 м/с. Диапазон допустимых угловых скоростей поворота ПА по курсу: 0 – 50 °/с.
- Диапазон изменения допустимого отстояния ПА от грунта - 0,5 м ... 0,5*Z_b, где Z_b – относительная прозрачность воды, определяемая с помощью диска Секки.
- Погрешность определения линейных и угловых перемещений ПА относительно грунта не более 1.5%.

- Погрешность измерения линейных скоростей движения с погрешностью не более 20 мм/сек.

- Погрешность измерения скорости поворота ПА по курсу не более 0.2 °/с

- Величина статического ухода линейных координат не более 2 см/час.

Была построена логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЛАФЧХ) СВП как звена системы управления, и были синтезированы соответствующие контура системы управления.

ЛАФЧХ СВП как измерителя перемещения ПА углу курса приведена на рисунке 5.

Как видно из рисунка 5, в первом приближении, СВП можно представлять для реализации в контуре управления как звено чистого запаздывания.

Проверка функционирования СВП в составе подводного аппарата проводилась в специальном бассейне (рисунок 6). Вид переходного процесса по контуру марша системы управления ПА, замкнутого с помощью СВП приведен на рисунке 7. Как видно из рисунка, в ходе испытаний удалось получить удовлетворительное качество переходных процессов контура марша.

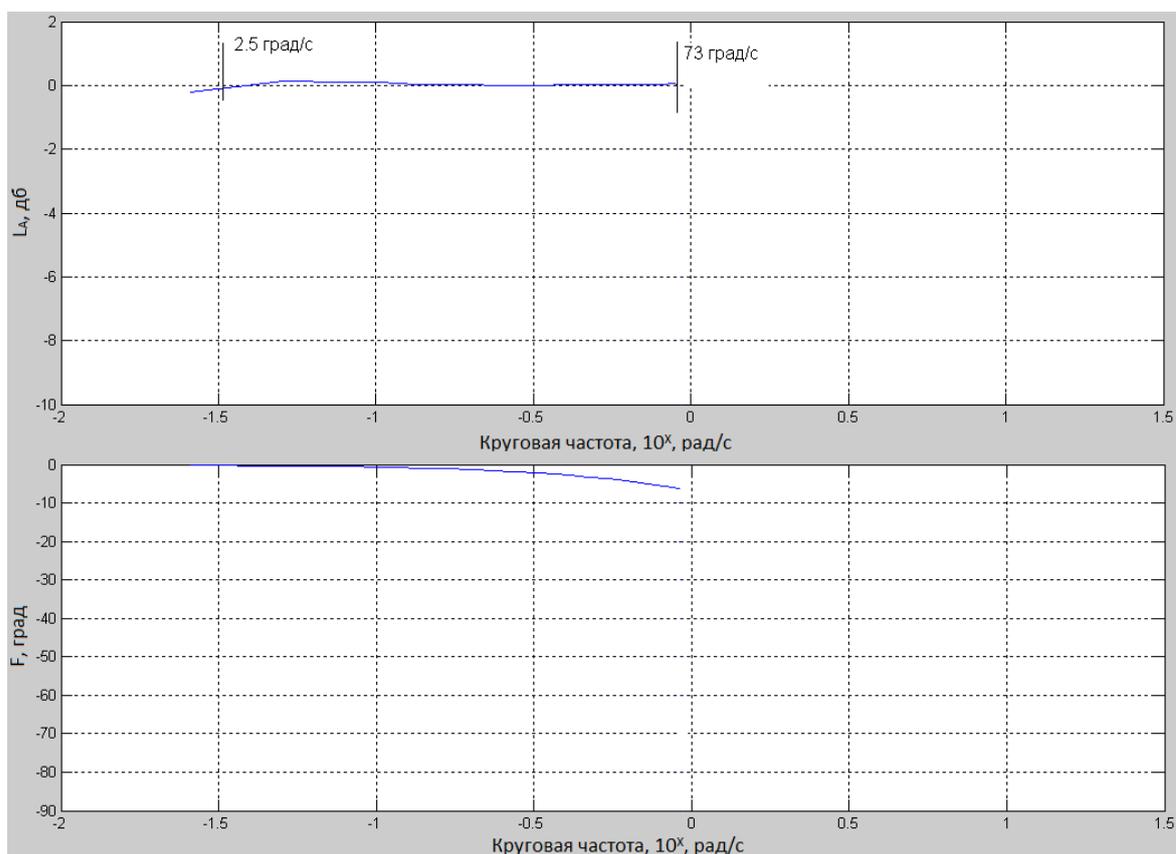


Рисунок 5. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика

СВП, как измерителя курсового угла ПА

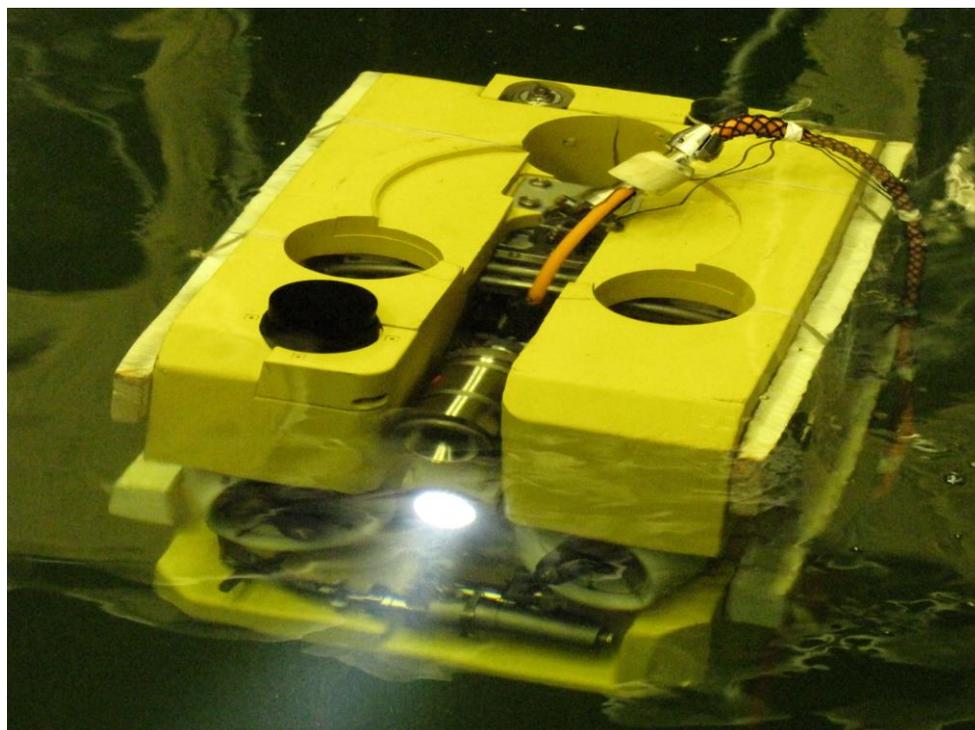


Рисунок 6. ПА во время испытаний в бассейне

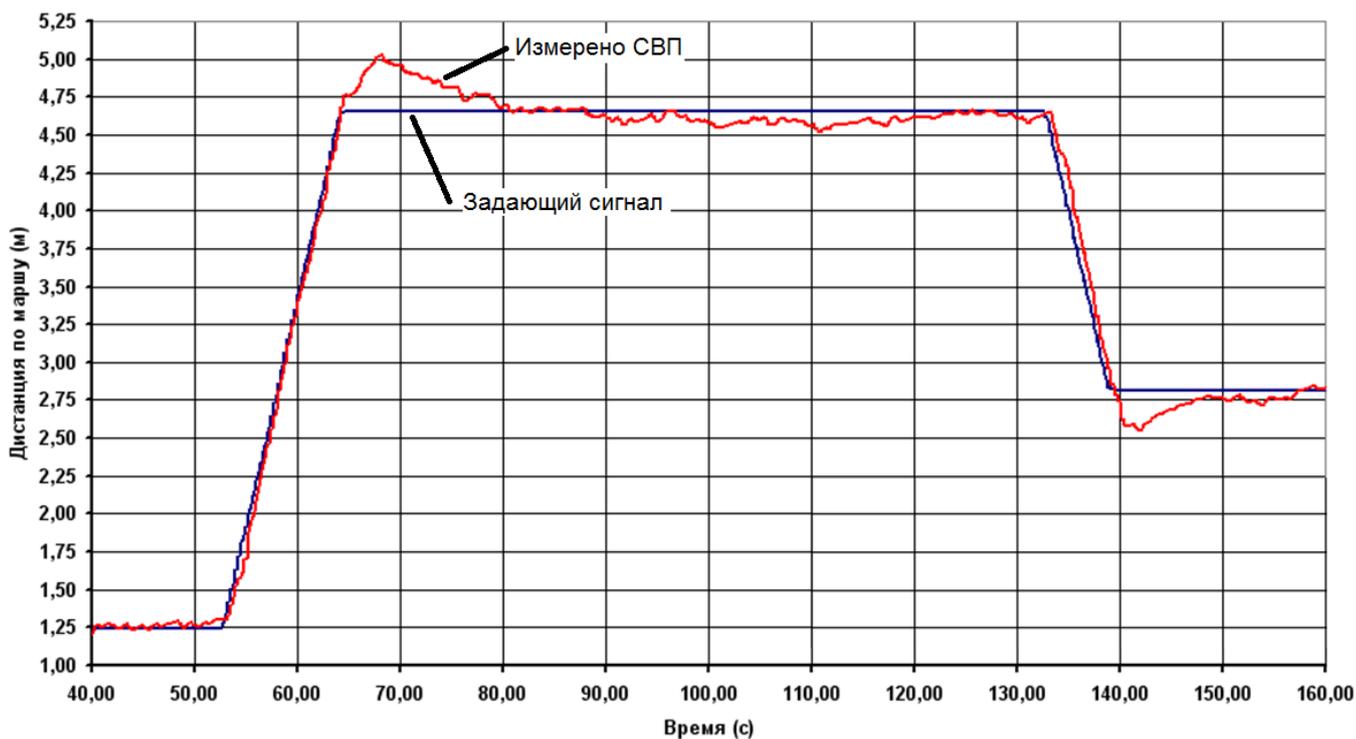


Рисунок 7. Результат бассейновых испытаний контура маршрута

телеуправляемого подводного аппарата, замкнутого с использованием СВП

Проверка работоспособности СВП в реальных условиях показала, что система функционирует с требуемой точностью вычисления координат ПА и частотой замыкания при наличии устойчивого телевизионного контакта. К сожалению, данное условие не всегда выполняется, как правило, из-за наличия в воде значительного количества взвеси или недостаточной контрастности наблюдаемой поверхности. Часть этих проблем может быть решена дополнительной предварительной обработкой входного видеозображения или сменой используемого метода оптического потока на метод, основанный на сопоставлении характерных особенностей.

Заключение

Предложенный подход позволил реализовать систему видеопозиционирования для ряда малогабаритных обзорных ПА, обладающих высокими динамическими характеристиками. Кроме того, разработанный способ видеопозиционирования может быть использован для реализации режима автоматизированного зависания беспилотного летательного аппарата.

В будущем представляет интерес продолжение исследований СВП, использующей для сопоставления изображений бинарные дескрипторы, такие как BRIEF, ORB и BRISK. Их применение представляется целесообразным в связи с обеспечиваемыми ими сравнительно низкими вычислительными затратами и возможностью обрабатывать большие межкадровые смещения, чем предложенный алгоритм [11-12], однако предстоит решить проблему повышения устойчивости их выделения на слабоконтрастном изображении.

Кроме того, перспективным направлением является возможность улучшения динамических характеристик систем видеопозиционирования путём повышения частоты её работоспособности свыше 25Гц. Такое повышение станет возможным после перехода на высокоскоростные цифровые видеокамеры, обеспечивающие большую частоту съёмки.

Литература

1. Aulinas J., Carreras M., Llado, X. et al. Feature extraction for underwater visual SLAM // Ocean. 2011 IEEE - Spain. IEEE, 2011. P. 1–7.

2. Negahdaripour S., Firoozfam P. An ROV Stereovision System for Ship-Hull Inspection // IEEE J. Ocean. Eng. 2006. Vol. 31, Issue 3. P. 551–564.
3. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 39–47.
4. Липатов А.Н., Ляш А.Н., Макаров С.В. и др. Оптический датчик координат для системы автоматической посадки и стыковки в водной среде // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 18–32.
5. Shi J., Tomasi C. Good features to track // Proc. IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition. - Seattle 1994. June.
6. Lowe, D. "Object recognition from local scale-invariant features" // Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2. pp. 1150–1157.
7. Bay H. et al. Speeded-up robust features (SURF) // IEEE Computer Vision and image understanding. - 2008. Vol. 110, issue 3. P. 346–359.
8. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints // 2011 Int. Conf. Comput. Vis. IEEE, 2011. P. 2548–2555.
9. Артюхов М.Ю., Кропотов А.Н., Макашов А. А., Сахарова Е.И. Опыт создания системы локальной видеонавигации для подводных аппаратов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010: Труды научно-технической конференции-семинара. Таруса - 2010.М.: ИКИ РАН, 2011. С. 230.

10. А.Н. Кропотов, А.А. Макашов, Артюхов М.Ю. и др. Системы обработки телевизионной информации подводных аппаратов // Технические проблемы освоения мирового океана – Материалы четвёртой всероссийской научно-технической конференции. – Владивосток 2011. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2011. С.316-321.
11. Б.В. Вишняков, В.С. Горбацевич. Быстрый алгоритм привязки фона и цифровой стабилизации при линейном движении или дрожании камеры // Техническое зрение в системах управления – 2013: Материалы конференции. Москва -2013. М.: ИКИ РАН, 2013.
12. А.Н. Кропотов, А.А. Макашов, Е.И. Сахарова, В.М. Плясунов. Построение видеомозаики на основе слабоконтрастных изображений донной поверхности // Современные методы и средства океанологических исследований – 2013: Материалы конференции. Москва – 2013. т.2. 2014. С. 73-76.