

оригинального подхода, и может быть расширена путем введения в нее новых сущностей, параметров и ограничений, таких как одновременная работа с разовыми и регулярными целями, гетерогенность группы АНПА и др.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 14-07-00740-а, 14-07-31192-мол-а), Программы Президиума РАН (проект № 15.1) и Сибирского отделения РАН (проект № 10).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М. Д., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В. и др. Автономные подводные роботы: Системы и технологии / под общей ред. М. Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Козлов Р. И., Максимкин Н. Н., Киселев Л. В., Ульянов С. А. Устойчивость конфигураций группового движения автономных подводных роботов в условиях неопределенности // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 9. С. 40–46.
3. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
4. Mouraa A., Rijo R., Silvac P., Crespos S. A multi-objective genetic algorithm applied to autonomous underwater vehicles for sewage outfall plume dispersion observations // Applied Soft Computing archive. 2010. Vol. 10. Issue 4. P. 1119–1126.
5. Туфанов И. Е., Щербатюк А. Ф. Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // Управление большими системами. 2012. № 36. С. 262–284.
6. Chow B., Clark C. M., Huissoon J. P. Assigning closely spaced targets to multiple autonomous underwater vehicles // Journal of Ocean Technology. 2011. Vol. 6. Issue 1. P. 57–68.
7. Deng. Y., Beaujean P-P. J., An E., Carlson E. Task Allocation and Path Planning for Collaborative Autonomous Underwater Vehicles Operating through an Underwater Acoustic Network // Journal of Robotics. Vol. 2013. P. 1–15.
8. Киселев Л. В., Инзарцев А. В., Бычков И. В., Максимкин Н. Н., Хмельнов А. Е., Кензин М. Ю. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 8. С. 34–43.
9. Braysy O., Gendreau M. Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms // Transportation science. 2005. Vol. 39, No. 1. P. 104–118.

УДК 629.052.6:629.584

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАВИГАЦИИ В СОСТАВЕ КОНТУРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

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

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»<sup>1</sup>

В современных условиях актуальной задачей подводной робототехники является необходимость точного позиционирования подводных аппаратов вблизи дна или объекта работ. Возможным вариантом решения такой задачи является использование системы локальной видеонавигации. С точки зрения системы управления, помимо точностных параметров, имеют значение быстродействие, устойчивость и характер переходных процессов в системе видеонавигации. Целью работы является проведение анализа параметров системы видеонавигации на основе численного и полунатурного моделирования. В работе оцениваются реализации алгоритмов видеонавигации на основе метода оптического потока и сопоставления дескрипторов SURF и BRISK. На основе результатов моделирования были сформулированы предложения об области применимости методов.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач, стоящих перед разработчиками систем управления (СУ) подводных аппаратов (ПА), является обеспечение возможности высокоточного позиционирования аппарата вблизи донной поверхности и/или объекта работ. Для решения этой задачи необходимо осуществлять измерение локальных перемещений подводного аппарата, используемых для замыкания обратных связей контуров СУ.

Можно выделить три следующих подхода к измерению локальных перемещений ПА:

1) использование данных о линейных ускорениях ПА, измеряемых с помощью устройств инерциальной навигации;

2) использование данных о линейных скоростях ПА, измеряемых с помощью абсолютных гидроакустических лагов;

3) использование компьютерной обработки видеоизображений или изображений акустической природы донной поверхности и/или объекта работ с целью определения приращений линейных координат ПА между последовательно снятыми кадрами аналогично описанному в [1].

Для определения линейных перемещений в рамках первых двух подходов необходимо осуществление интегрирования по времени, что вносит накапливающуюся с течением временем неустранимую

<sup>1</sup> 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1. E-mail: alex.kropotov@sm.bmstu.ru; sm42@sm.bmstu.ru; amakashov@bmstu.ru

ошибку измерения координат, обусловленную погрешностями этих датчиков.

Определение линейных перемещений с помощью третьего подхода предполагает суммирование межкадровых приращений, зависит только от пройденного пути и практически не зависит от времени, что, в ряде случаев, может давать существенный выигрыш в точности. Также возможно комплексирование различных методов с целью повышения точности измерений.

В данной статье рассматривается система подводной видеонавигации (СПВН), осуществляющая компьютерную обработку изображений, получаемых с размещенной на ПА видеокамеры.

Целью данной работы является исследование системы видеонавигации как датчика линейных перемещений подводного аппарата, а также анализ влияния различных методов сопоставления кадров, применяющихся в СПВН, на качество переходных процессов в системе.

### ■ Структура и алгоритмы системы подводной видеонавигации

Можно выделить два подкласса задач видеонавигации [2]:

1. Задача визуальной одометрии.

2. Задача одновременной локализации и картографирования (Simultaneous localization and mapping, SLAM).

Различие между подклассами заключается в том, что при решении задачи одновременной локализации и картографирования конечной целью является построение глобальной карты перемещения ПА с учётом возможных самопересечений траектории. В этом случае необходимо находить точки самопересечений

и корректировать восстановленную траекторию движения ПА для обеспечения их точного совпадения на составляемой карте. Более простая задача визуальной одометрии не предполагает сопоставления карты местности и заключается в последовательном восстановлении траектории движения ПА от одного видеозображения к другому. Таким образом, решение задачи визуальной одометрии может рассматриваться как первый этап решения задачи одновременной локализации и картографирования. Поскольку при реализации системы управления, как правило, нет возможности заниматься поиском точек самопересечения траектории, в дальнейшем мы будем рассматривать задачу визуальной одометрии.

Мы будем рассматривать решение задачи при помощи системы технического зрения, состоящей из направленной вниз неподвижной видеокамеры, размещённой на ПА, и вычислителя, который может размещаться как на борту ПА, так и в составе пультной части. Предполагается, что определение параметров движения осуществляется на основе сопоставления ярких неоднородностей подстилающей поверхности. В этом случае параметры движения ПА могут быть восстановлены с точностью до масштабного множителя. Вопрос определения масштабного множителя может быть решён с помощью добавления в систему второй видеокамеры и формирования стереопары либо с использованием стороннего датчика и выходит за рамки данной работы.

Опишем последовательность действий при решении задачи одометрии:

1) получение изображений с видеокамеры или стереопары;

2) предварительная обработка изображений;

3) сопоставление полученных изображений;

4) определение относительно движения видеокамеры;

5) образмеривание параметров движения видеокамеры.

Предварительная обработка изображений заключается в применении фильтров для улучшения полученного с видеокамеры изображения и обеспечения большей точности сопровождения с использованием адаптивной гистограммной обработки [3], а также в устранении радиальной дисторсии для улучшения пространственной локализации ярких неоднородностей. С точки зрения системы управления ПА такая обработка изображений вносит временную задержку в систему управления.

Определение относительно движения видеокамеры над подстилающей поверхностью заключается в восстановлении фундаментальной матрицы межкадрового перехода. В случае плоскопараллельного движения видеокамеры над плоским грунтом можно рассматривать упрощённую модель движения, для которой фундаментальная матрица может быть описана следующим образом:

$$M = \begin{pmatrix} k \cdot \cos \phi & k \cdot \sin \phi & t_x \\ -k \cdot \sin \phi & k \cdot \cos \phi & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $\phi$  – угол поворота видеокамеры,  $(t_x, t_y)$  – вектор переноса,  $k$  – масштабный коэффициент. Как было показано в [4], незначительное отклонение оптической оси видеокамеры от вертикального положения может быть компенсировано с использованием информации от внешних датчиков, без уточнения модели движения видеокамеры.

Для сопоставления полученных изображений мы используем несколько подходов с целью их сравнения:

- 1) метод оптического потока (алгоритм Лукаса–Канаде) [5];
- 2) сопоставление на основе дескриптора SURF [6, 7];
- 3) сопоставление на основе бинарных дескрипторов BRISK [8].

Алгоритм Лукаса–Канаде используется в системах компьютерного зрения, разработанных в НИИСМ МГТУ им. Баумана [9, 10]. Преимуществом данного алгоритма является его высокое быстродействие, недостатком – ограниченная область сходимости, приводящая к необходимости использования дополнительных построений для её увеличения. Таким подходом может стать использование пирамиды разрешений либо предиктора.

В случае применения пирамиды разрешений строится последовательность решений задачи с различным разрешением. Тогда решение, полученное для низкого разрешения, является начальным приближением для задачи с большим разрешением:

$$M^{i+1} = \prod_{k=0}^i \begin{pmatrix} h_k & 0 & 0 \\ 0 & h_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M^k,$$

где  $M^k$  – решение, найденное на  $k$ -м шаге,  $M^0$  – решение на шаге с минимальным разрешением,  $h_k$  – масштабный множитель при переходе от  $k$ -го шага к  $k+1$ . Такой подход позволяет обеспечить сходимость алгоритма при больших перемещениях, однако ведёт к росту количества вычислений.

В случае применения предиктора в качестве начального приближения используется значение с предыдущего такта. Такой подход приводит к снижению количества требуемых вычислений, однако

накладывает ограничения на гладкость оцениваемых перемещений и приводит к появлению переходных процессов в навигационной системе.

Для оценки влияния этих процессов мы проведём сравнение с СПВН, построенной на базе алгоритма SURF. Особенность такого сравнения заключается в высокой вычислительной нагрузке алгоритма SURF, приводящей к ограниченной работоспособности алгоритма в масштабе реального времени. При проведении сравнения на реальном вычислительном модуле (процессор Intel Core i7–3317U) метод оптического потока обеспечивал частоту обработки в 25 Гц, в то время как SURF – порядка 2,5 Гц. Подобное различие в частотах работы алгоритмов привело к необходимости проведения как полунатурного, так и численного моделирования, методика которого описана в следующем разделе.

Также было проведено сравнение с алгоритмом на базе бинарных дескрипторов. Их применение представляет интерес в связи с создаваемой ими сравнительно низкой вычислительной нагрузкой и как следствие – высокой частотой работы. Так, на упомянутом выше вычислительном модуле частота работы выбранного алгоритма на основе дескрипторов BRISK составила 16 Гц, что можно считать приемлемым результатом для работы в масштабе реального времени.

### ■ Полунатурное и численное моделирование

Исследование точностных и динамических параметров рассматриваемых алгоритмов производилось с помощью двух различных методов: методом численного моделирования в среде Matlab Simulink и полунатурным методом.

Схема испытательного стенда, применяющегося для полунатурного моделирования, приведена на рис. 1. Стенд такой конструкции способен имитировать движение подводного аппарата относительно дна по маршруту или лагу, для чего перед закрепленной видеокамерой СПВН перемещается полотно с нанесенным тестовым изображением – макетом морского дна. Полотно перемещается с помощью двух валов, соединенных с электроприводом, управляемым специальным микроконтроллером. Задающие сигналы для привода формируются с помощью персонального компьютера. Движение полотна, измеряемое с помощью высокоточного импульсного датчика, пересчитывается в пройденный путь ПА, принимается за эталон и сопоставляется с показаниями СПВН.

Численное компьютерное моделирование СПВН производилось на двух ЭВМ.

Исследуемые алгоритмы запускались на реальном образце СПВН, представляющем собой промышленную ЭВМ (ARK-2150L, Core i7–3317UE). На вход алгоритма подавались изображения, представляющие собой нарезку кадров из тестового изображения большого размера, представляющего собой некоторый участок морского дна. Кадры генерировались в реальном времени

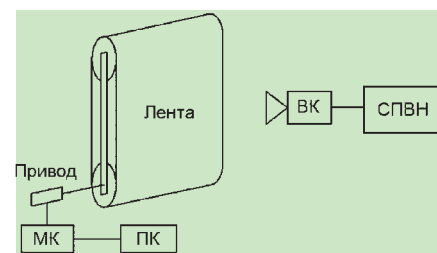


Рис. 1. Схема испытательного стенда, применяющегося для полунатурного моделирования. ВК – видеокамера, МК – микроконтроллер, ПК – персональный компьютер, СПВН – система подводной видеонавигации

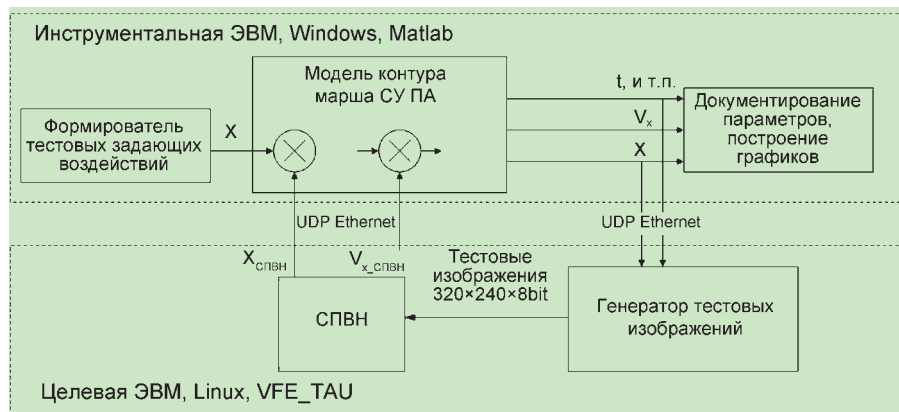


Рис. 2. Схема экспериментальной установки, применяющейся для синтеза контура маршевого движения подводного аппарата

в зависимости от текущих имитируемых координат ПА.

Моделирование контуров системы управления и динамики подводного аппарата производилось на настольном ПК в среде Matlab Simulink. Обмен между этими ЭВМ осуществлялся по интерфейсу Ethernet UDP с использованием специального протокола. Схема экспериментальной установки, применяющейся для синтеза контура маршевого движения подводного аппарата, приведена на рис. 2.

### ■ Результаты моделирования

Для оценивания точности считывания линейных перемещений ПА, достигаемой с помощью различных методов, было численно смоделировано движение видеокamеры, направленной перпендикулярно донной поверхности, по окружности с радиусом 5 м,

при отстоянии от дна, равном 2 м. Данная траектория выбрана, так как она позволяет оценить работу СПВН при движении одновременно по двум осям с переменной скоростью и ускорением.

На рис. 3 приведено сравнение траекторий ПА, вычисленных различными методами, при смоделированном движении с постоянной по модулю линейной скоростью 0.2 м/с. Крайний левый график представляет собой моделируемую траекторию движения подводного аппарата, другие графики – траекторию, вычисленную с помощью рассматриваемых методов.

Видно, что наибольшую точность определения координат обеспечивает алгоритм SURF; алгоритм BRISK, построенный на основе бинарных дескрипторов, наименее точен.

Для оценки особенностей СПВН как датчика в системе автоматического управления были

построены логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики СПВН, основанных на рассматриваемых методах. Для этого моделировалось движение подводного аппарата вдоль продольной координаты по синусоидальному закону, с амплитудой 1 м при отстоянии от дна, равном 2 м. Движение моделировалось численно, с помощью пакета Matlab, полученные данные использовались для построения характеристик. Также было проведено моделирование синусоидального движения с помощью полунатурного эксперимента на описанном выше стенде, его результаты были использованы для качественного подтверждения полученных результатов.

ЛАФЧХ СПВН, построенной на базе метода SURF, приведена на рис. 4. Данный метод обеспечивает наибольшую точность в диапазоне круговых частот 0.01..1 рад/с, что соответствует амплитудным скоростям движения 0.01..1 м/с. Применение метода SURF для замыкания контуров реальной системы управления ПА ограничивается низкой частотой его работы, обусловленной высокой вычислительной сложностью его алгоритма. Низкая частота работы метода SURF вызывает существенное фазовое запаздывание в системе управления ПА, не позволяя его использование в реальном времени. Поэтому, по нашему мнению, SURF целесообразно применять

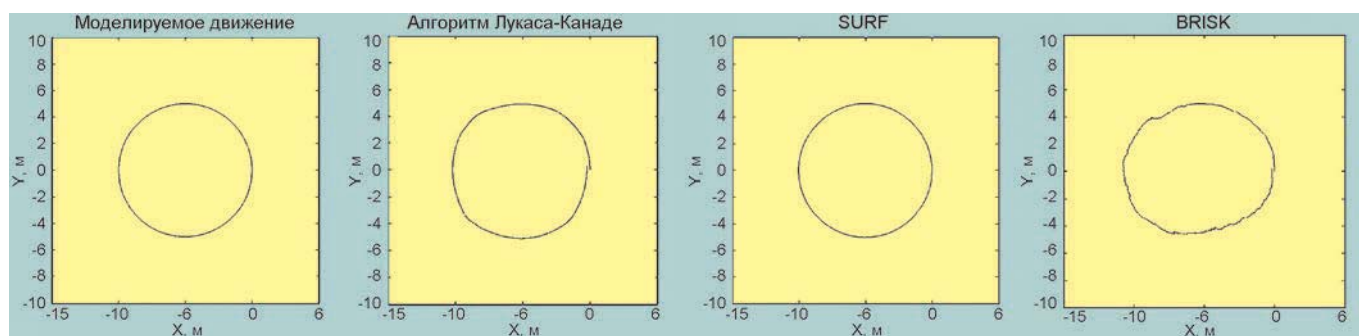


Рис. 3. Сравнение траекторий подводного аппарата, вычисленных с помощью СПВН, построенной на базе различных методов

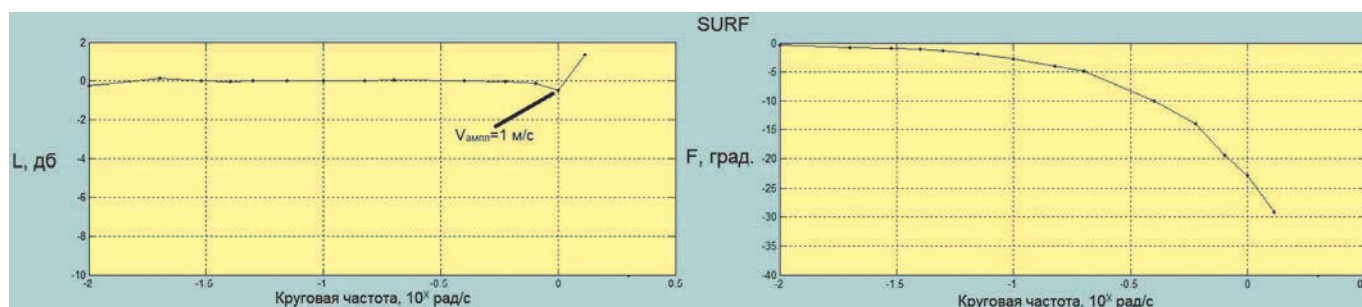


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика СПВН, построенной на базе дескриптора SURF

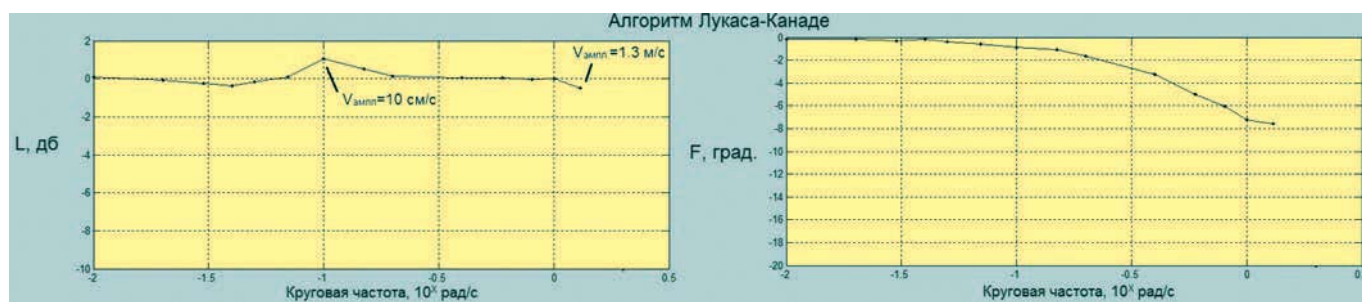


Рис. 5. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика СПВН, построенной на базе модифицированного алгоритма Лукаса–Канаде

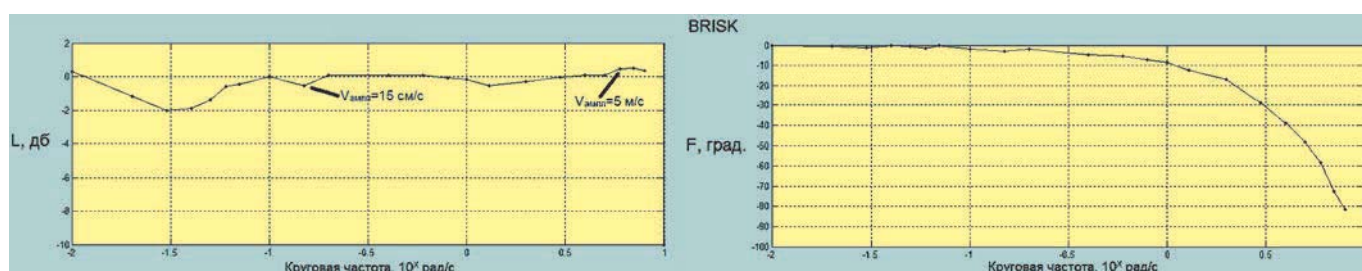


Рис. 6. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика СПВН, построенной на базе бинарного дескриптора BRISK

для решения задачи построения фотоплана донной поверхности, которая может решаться в условиях постобработки [11].

ЛАФЧХ СПВН, построенной на базе модифицированного метода Лукаса–Канаде, приведена на рис. 5. Точность определения координат, получаемая с использованием данного метода, как правило, уступает достигаемой SURF, однако существенно более высокая частота работы позволяет его использование для замыкания контуров системы управления большинства ПА в реальном времени. Основным недостатком данного метода является возможность срыва сопровождения при достаточно быстром движении

ПА. В рассматриваемых условиях срыв сопровождения наступает при скоростях движения аппарата более 1.5 м/с или ускорениях более 3 м/с<sup>2</sup>.

ЛАФЧХ СПВН, построенной на базе модифицированного метода BRISK, приведена на рис. 6. Точность работы данного алгоритма при скоростях < 15 см/с существенно ниже, чем у двух других рассматриваемых методов, однако данный алгоритм способен корректно обрабатывать движение подводного аппарата со скоростями вплоть до 8 м/с и значительными ускорениями. Таким образом, алгоритм BRISK возможно использовать для замыкания контуров системы управления высоко-

динамичными аппаратами, однако для его устойчивой работы необходима предварительная обработка изображения, повышающая его контрастность [11].

В целом результаты экспериментов показали, что СПВН при синтезе контуров системы управления движением ПА может быть аппроксимирована звеном чистого запаздывания.

#### ■ Синтез системы управления контуром марша подводного аппарата

Были проведены исследование и синтез контуров системы управления маршем и лагом под-

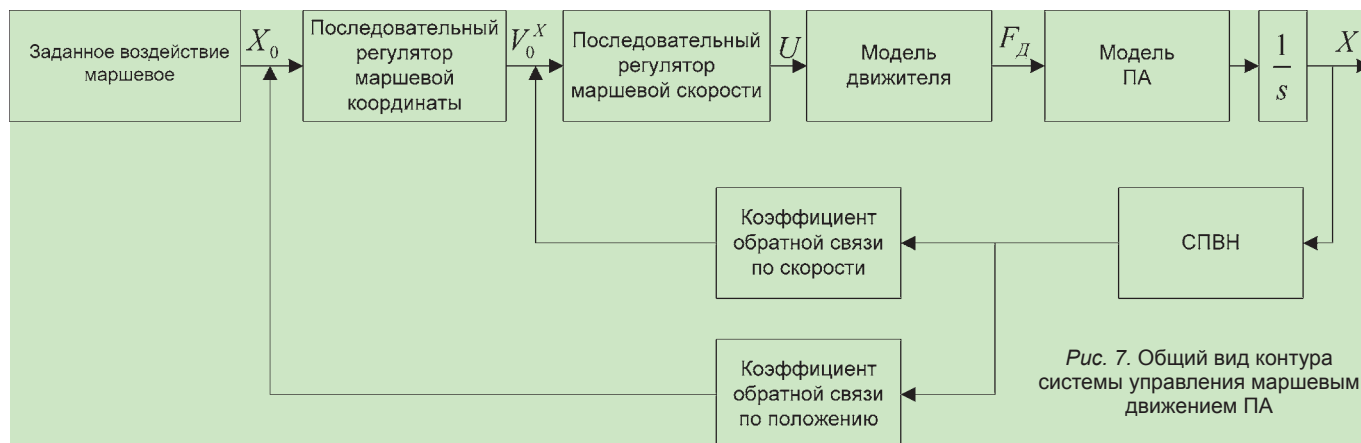


Рис. 7. Общий вид контура системы управления маршевым движением ПА



Рис. 8. Переходной процесс в контуре марша, замкнутом с помощью СПВН, построенной на базе модифицированного алгоритма Лукаса–Канаде

нено. Его возможным применением является задача построения масштабированного фотоплана объекта работ в режиме пост-обработки.

Метод оценивания оптического потока, основанный на модифицированном алгоритме Лукаса–Канаде, применим для замыкания контуров системы управления большинства подводных аппаратов. Однако при больших ускорениях подводного аппарата существует возможность срыва сопровождения. Задача автоматического детектирования срывов и их устранения требует дальнейшего исследования.

Метод, построенный на бинарных дескрипторах BRISK, обладает несколько меньшей точностью, но значительно более устойчив к движению с большим ускорением и может быть использован в системе управления аппаратами, обладающими высокой динамикой.

В дальнейшем авторы полагают целесообразным сосредоточиться на повышении точности и устойчивости методов оценивания оптического потока и сопоставления бинарных дескрипторов как более приспособленных к решению задачи навигации в реальном времени.

водного аппарата частотными методами [12] на примере телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, разработанного в НИИСМ. На рис. 7 представлен общий вид контура системы управления маршем рассматриваемого ПА, смоделированный в пакете Matlab.

На рис. 8 представлен переходной процесс в контуре марша, замкнутом с помощью СПВН, построенной на базе модифицированного алгоритма Лукаса–Канаде. Данный переходной процесс удовлетворяет требованию вхождения в 5%-ный коридор за заданное время (3 с), но обладает колебательностью. Это вызвано тем, что измеренная с помощью СПВН скорость содержит высокочастотные флуктуации.

Использование метода BRISK дает переходной процесс сопоставимого качества, в то время как с

помощью метода SURF систему управления для данного аппарата построить не удастся – переходной процесс получается слишком затянутым ( $\approx 10.2$  с), что обусловлено слишком низкой частотой работы метода, вносящего большое фазовое запаздывание.

## ВЫВОДЫ

Система подводной видеонавигации может применяться для замыкания контуров системы управления маршем и лагом подводного аппарата, при этом в качестве первого приближения допустимо считать СПВН звеном чистого запаздывания.

Метод, построенный на дескрипторах SURF, обеспечивает наибольшую точность одометрии, но его применение в системе управления реального времени из-за его высокой вычислительной сложности затруд-

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry [Tutorial] // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2011. Vol. 18. Issue 4. P. 80–92.
3. Kim A., Eustice R. Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection Using Visual Saliency // IEEE Transactions on Robotics 2013. Vol. 29. Issue 3. P. 719–733.
4. Кропотов А. Н., Макашов А. А., Плясунов В. М., Сахарова Е. И. Анализ системы видеонавигации как элемента системы управления подводного аппарата // Техническое зрение в системах управления: материалы науч.-техн. конф. М., 2012. С. 57–61.
5. Tomasi C., Kanade T. Detection and tracking of point features // Technical Report CMU-CS-91132. Carnegie Mellon University, 1991. P. 20.
6. Bay H., Ess A., Tuytelaars T. et al. Speeded-Up Robust Features (SURF) // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110. Issue 3. P. 346–359.
7. Rublee E., Rabaud V., Konolige K. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // Proc. IEEE International conference on computer vision. 2011. P. 2564–2571.
8. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R. Y. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints // Proc. IEEE International conference on computer vision. 2001. 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. М., 2011. С. 230–244.
10. Кропотов А. Н., Макашов А. А., Плясунов В. М., Сахарова Е. И. Системы обработки телевизионной информации подводных аппаратов // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы 4-й Всерос. науч.-техн. конф. Владивосток, 2011. С. 316–322.
11. Кропотов А. Н., Макашов А. А., Плясунов В. М., Сахарова Е. И. Современные методы видеопозиционирования подводного аппарата // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы 5-й Всерос. науч.-техн. конф. 2013. С. 41–45.
12. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Изд-во “Наука,” 1975. 768 с.

УДК: 62–236.58

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОДВОДНОЙ ГИДРАВЛИКИ НА МОРСКОЙ ВОДЕ

**В. В. Вельтищев**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»<sup>1</sup>

В промышленных гидравлических системах широкое применение находит пресная вода. Для гидравлических систем морской подводной техники логичным развитием этой тенденции является использование морской воды. По физическим и химическим свойствам, биологической активности морская вода кардинально отличается не только от традиционных минеральных жидкостей, но и от пресной воды. На основе анализа важнейших свойств морской воды формулируются проблемы создания подводных гидравлических исполнительных систем нового типа. Одна из ключевых задач состоит в рациональном выборе конструкционных материалов и покрытий. Путем экспериментальных исследований на макетных образцах базовых гидравлических элементов установлено, что наиболее перспективным является использование керамических материалов и полимеров типа полиэфиркетон. Особое значение придается решению задачи подготовки морской воды для использования в качестве рабочей жидкости. Предлагается оригинальная концепция построения системы фильтрации и биологического обеззараживания.

### ВВЕДЕНИЕ

Гидравлические исполнительные системы широко используются в обитаемой и необитаемой подводной технике. Хорошо известны такие достоинства гидравлических подводных исполнительных систем, как:

- высокое качество регулирования, широкий диапазон скоростей при безредукторной схеме исполнения, простота ограничения предельных нагрузок;
- легкость реализации гидростатической разгрузки гидравлических компонентов для их защиты от воздействия внешнего давления воды;
- малые габариты и массы гидравлических устройств, позволяющие создавать быстродействующие исполнительные устройства с высокой удельной энергооборуженностью.

Одной из проблем использования гидравлических систем в подводной технике является обеспечение необходимых уровней надежности. Многолетняя практика эксплуатации подводных аппаратов показала, что значительная часть отказов обусловлена проникновением морской воды в гидросистему. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты рабочего класса и обитаемая подводная техника характеризуются высокой степенью насыщенности гидравлическими исполнительными механизмами. При этом каж-

ущие исполнительные устройства с высокой удельной энергооборуженностью. Одной из проблем использования гидравлических систем в подводной технике является обеспечение необходимых уровней надежности. Многолетняя практика эксплуатации подводных аппаратов показала, что значительная часть отказов обусловлена проникновением морской воды в гидросистему. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты рабочего класса и обитаемая подводная техника характеризуются высокой степенью насыщенности гидравлическими исполнительными механизмами. При этом каж-

<sup>1</sup> 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1. Тел.: (499) 2636115. E-mail: sm42@sm.bmstu.ru