УДК 681.518.3:681.518.5.004

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА БЕЗЭКИПАЖНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КАТАМАРАНА

Д.А. Ченский, К.А. Григорьев, А.Г. Ченский Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский национальный исследовательский технический университет¹

Основным элементом автономного безэкипажного надводного аппарата является информационно-управляющая система (ИУС). Многоцелевой катамаран предназначен для гидроакустических, гидрофизических исследований водной среды. ИУС состоит из аппаратной и программной частей. Программа для ИУС написана на графическом языке программирования с использованием инструментов разработки приложений LabVIEW, Real-Time и FPGA Module. Данное решение позволяет разработать всю систему в рамках одного проекта, используя функции программного обеспечения для синхронизации и передачи данных между различными устройствами. Использование протоколов существенно ускоряет процесс разработки программного обеспечения и реализации проекта в целом.

Морские безэкипажные автоматизированные системы находят все большее применение в научной и оборонной сфере [1]. В планах развития военно-морской обороны различных стран ключевыми аспектами являются надводные и подводные роботизированные безэкипажные аппараты. Основные области применения безэкипажных аппаратов - это военная, научно-исследовательская и область коммерческих услуг. В качестве примера отечественной разработки телеуправляемого судна может служить Teleautomatics [3].

Телеуправляемые самоходные мишени применяются уже более 30 лет. В настоящее время в США основными направлениями развития, указанными в USVMasterPlan [2], являются: противоминное картирование, организация связи и навигационного обеспечения, патрулирование акваторий, экологический мониторинг. В коммерческой сфере компания Rolls Royce развивает идею безэкипажного морского транспорта [13]. Ос-

новным фактором служит высокая экономическая эффективность замены экипажа на автоматизированную систему управления судном. Инженерные услуги представляют собой обследование мостов, плотин, трубопроводов. Сфера инженерных услуг только начинает развиваться. В Английской фирме ASV разработаны аппараты, способные работать в нескольких направлениях сразу. Например, безэкипажный аппарат C-Worker 6 способен выполнять работы по позиционированию подводных аппаратов, геодезические роботы и экологический мониторинг. В аппарат можно дополнительно интегрировать различные полезные нагрузки: гидрофизические, гидрохимические датчики и датчики течения. Помимо коммерческого применения C-Worker 6 используется для военных целей как патрульное судно [12].

Для успешного применения аппарата необходимо на начальном этапе разработки как самого устройства, так и программного обеспечения закладывать универ-

сальность и взаимозаменяемость навесного оборудования. В связи с этими требованиями все большую долю разрабатываемых надводных безэкипажных аппаратов занимают универсальные платформы.

Общее описание роботизированного катамарана

Независимо от сферы применения и размера аппарата основные компоненты (навигационная система, система энергообеспечения, аварийно-спасательная система, система управления) остаются неизменными. На рис. 1 изображен многоцелевой роботизированный катамаран, его характеристики приведены в табл. 1.

Корпуса между собой соединены алюминиевой рамой. Посередине рамы размещена арка для установки антенн, камер видеонаблюдения и метеорологических датчиков. В корпусах аппарата располагаются электронная аппаратура и аккумуляторные батареи.

¹ 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: skb@istu.edu; gka_1986@mail.ru.



Puc. 1. Многоцелевой роботизированный катамаран

Таблица 1. Характеристики катамарана

Длина катамарана	3,6 м
Ширина корпуса	0,4 м
Ширина катамарана	2 м
Солнечные панели	6*100 Вт
Аккумуляторные батареи	12В*100Ач
Автономность плавания	8 ч
Максимальная скорость	10 км/ч
Электромоторы	2*500 Вт
Запас хода в солнечный день	140 км
Дальность связи	2 км

Управление направлением движения катамарана производится распределением крутящего момента между электромоторами. В зависимости от направления и скорости поворота момент на одном из моторов увеличивается, а на другом уменьшается. Режим работы без использования рулей позволяет увеличить маневренность катамарана и упростить систему управления.

Дистанционное управление катамараном имеет 3 режима:

- непрерывного телеуправления оператором;
- автоматического следования по курсу (автопилот по курсу);
- автоматического следования по заданному маршруту (автопилот по маршруту).

В режиме непрерывного телеуправления ИУС передает команды от оператора к электромоторам. В других режимах присутствуют элементы супервизорного управления, что значительно снижает нагрузку на оператора, повышает автономность безэкипажного катамарана. Во время движения в режиме супервизорного управления оператор по индикаторам лицевой панели программы наблюдает за скоростью, направлением движения, местоположением на карте и изображением с видеокамеры катамарана в режиме реального времени. На основании этих данных оператор при необходимости вмешивается в работу автоматической системы - принимает решение о необходимости смены курса или продолжении движения в текущем направлении с другой скоростью. В любой момент оператор может выключить режим супервизорного управления и продолжить управление катамараном в ручном режиме.

Архитектура и функции информационноуправляющей системы

Информационно-управляющая система (ИУС) содержит следующие основные сегменты: энергообеспечения, навигации, связи, управления движением, диагностики и метеонаблюдения. Она осуществляет следующие функции:

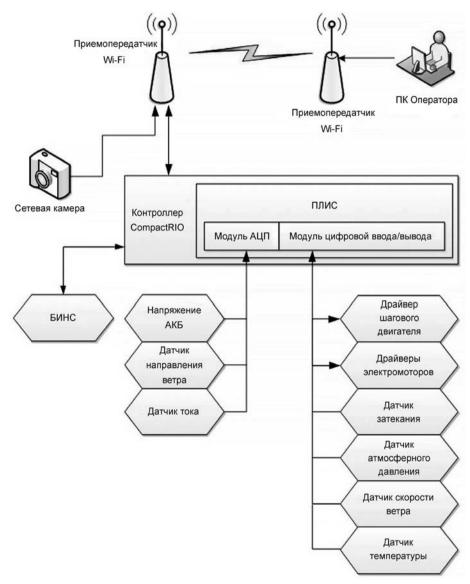
- проводит предстартовую проверку функционирования систем энергообеспечения, навигации, связи и метеонаблюдений;
- обеспечивает управление движением катамарана;
- контролирует состояние основных устройств катамарана, условия внешней среды;
- взаимодействует с компьютером оператора.

ИУС выполнена в виде многоуровневой распределенной модульной системы с жестким распределением выполняемых функций по уровням:

- уровень управления, контроля, отображения и архивирования информации (береговой пост управления);
- уровень связи с устройствами катамарана;
- уровень микропроцессорного управления;
- уровень сбора и обработки данных системы управления.

Система диагностики начинает свою деятельность еще на стадии проектирования.

На рис. 2 представлена функциональная схема основных узлов роботизированного катамарана. Связь с береговым центром осуществляется по радиоканалу через локальную сеть Ethernet/Wi-Fi. К аналоговым и цифровым модулям ввода/вывода контроллера катамарана подключаются соответствующие датчики информационно-управляющей системы. Аналоговые модули используются для измерения токов разряда и заряда аккумуляторов, текущих значений напряжений на аккумуляторах. Цифровые модули связываются с датчиками температуры, скорости ветра и датчиками затекания по протоколам 1-wire и I2C, а также



Puc. 2. Функциональная схема информационно-управляющей системы

непосредственно управляют через драйверы маршевыми электромоторами, шаговым двигателем поворотной камеры.

■ Аппаратная часть ИУС

Главным элементом ИУС является реконфигурируемая платформа управления и сбора данных, реализованная на NI CompactRIO компании NationalInstruments [4]. Она сочетает в себе процессор реального времени, реконфигурируемую программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), модули ввода/вывода со встроенным согласованием сигналов от датчиков с поддержкой горя-

чего подключения. NI CompactRIO состоит из контроллера cRIO-9012 и реконфигурируемого шасси cRIO-9111 [5, 6]. Контроллер NI cRIO-9012 оснащен промышленным процессором реального времени Freescale MPC5200 с быстродействием 400 МГц, имеет оперативную память (DRAM) объемом 64 Мб и внутреннюю энергонезависимую память объемом 128 Мб. Такая конфигурация обеспечивает открытый доступ к низкоуровневым ресурсам оборудования и позволяет выполнять автономные встраиваемые и распределенные приложения. Ethernet порт контроллера стандарта 10/100 Мбит/с используется для программной организации обмена данными посредством коммуникационной сети и встроенных Webи FTP-серверов. Реконфигурируемое шасси сRIO-9111 содержит ПЛИС Vertex 5, тактовый генератор 40 МГц и 8 слотов для подключения модулей ввода/вывода. ПЛИС позволяет реализовать программу реального времени с выполнением параллельных процессов на аппаратном уровне.

Блок энергообеспечения роботизированной платформы состоит из аккумуляторных батарей, контроллеров заряда с отслеживанием точки максимальной мощности, солнечных батарей, датчиков тока, напряжения и температуры аккумуляторных батарей. В табл. 2 приведено распределение потребляемой мощности различными устройствами катамарана.

Инсоляция на озере Байкал в период навигации колеблется от 490 МДж/м^2 до 611 МДж/м^2 в месяц, что соответствует 4,53 кВт/м² за день. С учетом КПД монокристаллических солнечных панелей в 21% за один безоблачный день возможно получить 3,2 кВт с шести стоваттных панелей. Энергия солнечных панелей при безоблачной погоде перекрывает потребление на 80-100% в зависимости от скорости движения. В процессе работы микропроцессор рассчитывает текущее состояние системы энергообеспечения аппарата по показаниям контроллеров заряда, датчиков тока разряда и напряжения каждого аккумулятора. Индикация результатов диагностики в режиме реального времени выводится на дисплей оператора.

Навигация катамарана осуществляется при помощи спутниковой системы GPS или ГЛОНАСС, инерциальной системы на базе датчиков MTi-100 XSENS [7], а также поворотной видеокамеры ST 111 ip.

TD 6	TT -			
Таолина 2.	Потребляемая	і мошность	VCTDOUCTB	катамапана

Наименование	Напряжение питания, В	Потребляемый ток, А	Номинальная мощность, Вт
IP камера ST 111 ip	12	270 м	3,24
Система сбора данных	9–30	1	25
Система управления и диагностики	9–30	1	25
Система связи	24	1	24
Маршрутизатор	5	1,2	6
Электродвигатели	12	100	1200
Итого			1284

В навигационном модуле МТі-G-28A53G35 объединены в одну систему приемник GPS, гироскоп, акселерометр и магнитометр [8].

Встроенный в XSENS приемник GPS сигналов позволяет получать навигационные данные 4 раза в секунду. Ниже приведены показатели точности в виде составляющих ошибок [7]:

- горизонтальная ошибка составляет $\pm 2-2.5$ м;
- вертикальная ошибка составляет ± 5 м;
- ошибка скорости при 30 м/с равна $\pm 0.1 \text{ м/c}$.

На основании показаний гироскопа, акселерометра и магнитометра навигационная система рассчитывает курс, крен, дифферент и координаты катамарана. Данные от навигационной системы поступают в ИУС, которая проводит первичную обработку и передает их по радиоканалу оператору.

Связь с роботизированной платформой может осуществляться по двум радиоканалам: высокоскоростному Wi-Fi 2,4 ГГц и аварийному каналу на частоте 433 МГц. Передача данных по Wi-Fi осуществляется с пропускной способностью до 54 Мбит/с и с возможностью увеличения мощности пропорционально расстоянию. Данный канал связи является основным, по нему передаются все данные от системы управления, системы сбора данных и видеопоток

от камеры. Канал связи реализован по сети Ethernet от системы управления и сбора данных до маршрутизатора, который позволяет подключиться к беспроводной сети Wi-Fi.

Аварийный канал связи реализован на радиомодеме, который работает на частоте 433 МГц с частотной манипуляцией. В обычном режиме радиомодем передает служебную информацию независимо от других каналов связи и никак не вмешивается в систему управления

Блок диагностики и метеонаблюдений включает в себя датчики температуры, датчики скорости и направления ветра, атмосферного давления, датчики затекания. Датчики температуры DS18B20 с погрешностью измерений 0,5 °C взаимодействуют с контроллером по протоколу 1 Wire. ИУС производит измерение температуры 1 раз в 10 секунд. В случае превышения пороговых значений на лицевой панели программы оператора загорается предупреждающий индикатор. Скорость и направление ветра измеряются с помощью анемометра и флюгера.

В качестве датчиков затекания используются ультразвуковые генераторные датчики, разработанные в отделе информационно-измерительных систем ИРНИТУ. Они представляют из себя пьезокерамические излучатель и при-

емник, расположенные с зазором напротив друг друга. В воздушной среде затухание ультразвука выше, чем в воде, и уровня сигнала недостаточно для срабатывания триггерной схемы обнаружения. После полного погружения датчика в жидкость уровень ультразвукового сигнала резко возрастает и ИУС детектирует наличие жидкости в корпусе катамарана. Атмосферное давление измеряется цифровым датчиком по интерфейсу І2С. На основе данных атмосферного давления скорости и направления ветра оператор оценивает текущую обстановку и может прогнозировать изменения погодных условий.

■ Программное обеспечение

Информационно-управляющая система разработана с использованием инструментов высокопроизводительной графической среды приложений LabVIEW, Real-Time и FPGA Module [9]. LabVIEW, или LaboratoryVirtual Instrument Engineering Workbench, представляет собой среду графического программирования, которая широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами. Среда программирования LabVIEW позволяет написать программный код для всех уровней – от ПЛИС до программы оператора в рамках одного проекта. Передача данных между различными уровнями программы обеспечивается стандартными средствами программного кода, передача данных от контроллера к оператору - глобальными сетевыми переменными.

Архитектура программного обеспечения ИУС имеет три уровня иерархии. Верхний уровень на стационарном береговом центре реализует интерфейс управления, где задаются основные параметры работы системы и производится визуальное отображение данных с датчиков и видеокамеры. Также программное обеспечение верхнего уровня отвечает за первичную обработку данных и их сохранение.

На среднем уровне программа контроллера CompactRIO обеспечивает взаимодействие и согласованную работу бортовых систем в соответствии с поступившими настройками, командами от оператора и данными, поступившими от нижнего уровня - датчиков диагностики и контроля бортовых устройств катамарана. Навигационные данные с инерциальной системы XSENS поступают на контроллер по протоколу RS-232, проходят первичную обработку и пересылаются оператору по сети Wi-Fi совместно с диагностическими данными.

На нижнем уровне ПЛИС непосредственно взаимодействует с датчиками и измерительными устройствами через набор драйверов. Программа представляет собой пять параллельно выполняющихся процессов диагностики оборудования и управления движением. Обмен данными с бортовым контроллером происходит через оперативную память последнего, к которой ПЛИС имеет непосредственный доступ.

LabVIEW позволяет проводить проверку корректности программного кода еще на стадии разработки программы. Система диагностики представляет собой программный код выявления неисправностей и ошибок в работе катамарана. При запуске программы управления первым циклом конечных автоматов является диагностика. В этом цикле реализованы алгоритмы проверки: моторов, контроллеров заряда солнечных панелей, токов потребления, системы навигании. Выявление неисправностей проводится путем сравнения данных в окне эталонных значений. Как только данные выходят за рамки допустимых

значений, на лицевой панели программы оператора загорается индикатор неисправности. Оператор определяет, какой именно датчик неисправен. Неисправность программного обеспечения отслеживается путем применения в программном коде кластеров ошибки. В кластере содержится код ошибки и краткое описание. Последовательность выполнения программ синхронизируется при помощи глобальных переменных.

Канал связи Ethernet/Wi-Fi инициализируется со стороны оператора стандартными средствами OC Windows. Затем запускается программа оператора по управлению катамараном. Она устанавливает связь с контроллером и переводит его программу в режим предстартовой диагностики, в котором проверяется наличие связи с датчиками и устройствами. Данные диагностики передаются оператору, который производит оценку работоспособности устройств и качество данных с датчиков. На рис. 3 приведен внешний вид



Рис. 3. Интерфейс программы управления

лицевой панели программы управления оператора. В процессе движения оператор следит за работой системы и обстановкой вокруг катамарана по показаниям приборов и изображению с поворотной камеры. В случае возникновения экстренной ситуации оператор переводит управление в ручной режим, обходит препятствие, затем возвращает аппарат в автоматический режим.

В случае потери связи катамарана с береговой станцией программа ИУС не будет получать синхронизирующие импульсы. Если длительность паузы будет более 10 секунд, питание всех систем отключится и катамаран перейдёт в аварийный режим. Питание аварийного модуля осушествляется от собственного источника. По радиоканалу на частоте 433 МГц передаются управляющие команды, телеметрия и координаты аппарата. Управление катамараном осуществляется оператором через другую программу аварийного управления. Так как канал связи ограничен, видеопоток не транслируется, управление осуществляется только в случае визуального подтверждения аппарата.

В программе оператора применена система вкладок. В левом верхнем углу экрана расположен индикатор текущего и установленного курса, ниже индикатор курса с автоматически изменяемой шкалой направления. В левом нижнем углу расположен индикатор распределения момента на двигатели в процентном соотношении от 0 до 100%, ниже находится световой индикатор автоматического курса. В правой части панели управления расположены спидометр, индикатор направления и скорости ветра, индикатор крена, дифферента. В центральной части экрана представлено изображение с видеокамеры. Внизу панели расположены 4 индикатора заряда аккумуляторных батарей.

■ Результаты испытаний

В процессе разработки систем катамарана проводились лабораторные испытания. Каждая система отлаживалась для исключения ошибок. Монтаж систем проходил поэтапно для отслеживания взаимовлияния систем друг на друга. Проводились долговременные измерения для оценки возможных отказов при накоплении ошибок инерциальной навигационной системы. Оценивалось быстродействие системы при мгновенном изменении положения датчиков и т.д. Натурные испытания ката-

марана проводились на Иркутском водохранилище. На первом этапе проверялось дистанционное управление оператором, оценивалась динамика изменения направления движения катамарана, вводились поправки в коэффициенты пропорционально-дифференциального управления электромоторами.

На следующем этапе проводились испытания автопилота. В режиме следования по заданному маршруту навигационная система рассчитывает необходимый курс каждые 100 мс. Точность определения координат спутниковой системой навигации составила 10 м, в связи с этим выход на точку обеспечивался с точностью не более 20 м. Увеличение точности

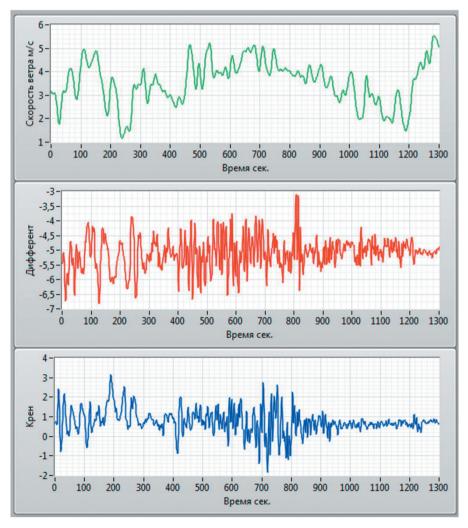


Рис. 4. Изменения скорости ветра, крена и дифферента катамарана

возможно в случае применения дополнительной береговой ретранслирующей станции для приема дифференциальных поправок и их использования спутниковой навигацией.

На рис. 4 приведен пример данных ИУС.

Согласно представленным данным видно, что на выходе из залива скорость ветра увеличилась, повысилось волнение, что отразилось на данных крена, деферента и скорости движения. При увеличении ветра от 2 м/с до 5 м/с крен катамарана изменялся от -2° до +2° вследствие воздействия волн. По показаниям датчиков системы энергообеспечения проводился расчет энергии, потребляемой двигателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение встраиваемой контрольно-измерительной системы compactRIO в совокупности с программным обеспечением LabVIEW позволило провести разработку, отладку и испытания ИУС роботизированного катамарана в кратчайшие сроки. Реализованная система подтвердила свою работоспособность во время натурных испытаний. Технология реконфигурируемого ввода-вывода, модульности ИУС закладывает основы для дальнейшего наращивания, модернизации функционального состава управляющей системы. В развитие данных работ в ИРНИТУ проводится разработка системы сбора данных для гидроакустических и экологических исследований водных объектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ученого совета ИРНИТУ «Роботизированный многоцелевой катамаран для подводных исследований».

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Caccia M., Bibuli M., Bono R., Bruzzone G., Bruzzone G., and Spirandelli E. Unmanned surface vehicle for costal and protected water applications: The Charlie project // Marine Technol. Soc. J. 2007. V. 41, N 2. P. 62–71.
- 2. The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV): Master Plan / U.S. Department of the Navy. 2007. 122 p.
- 3. Ляхов Д.Г., Кимов А.И., Минаев Д.Д. Разработка и испытания сверхмалого телеуправляемого корабля // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 48–57.
- 4. Цифровой модуль ввода/вывода NI 9401. ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/c_series_modules/ni_9401.pdf (дата обращения: 20.07.2016).
- 5. Аналогово-цифровой преобразователь NI 9121. ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/c_series modules/ni 9221.pdf (дата обращения: 20.07.2016).
- 6. Бакмачев А.Е. Компания Xsens эксперт в области систем управления движением // Компоненты и технологии. 2013. № 4. С. 32–36.
- 7. Григорьев К.А., Ченский Д.А., Ченский А.Г. Система позиционирования автономного роботизированного многоцелевого катамарана для подводных исследований // Образование и научные исследования NI. NIDays-2015: сб. трудов XIV Междунар. науч.-практ. конф. М.: ДМК-пресс, 2015. С. 393–394.
 - 8. Тревис Дж. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. 544 с.
- 9. Ченский Д.А., Григорьев К.А. Многоканальный информационно-измерительный комплекс для подводных исследований // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ–2015): материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. М., 2015.
- 10. Ченский Д.А., Безрукин А.Г. Автономная донная станция для долговременного мониторинга параметров водной среды озера Байкал // Датчики и системы. 2015. № 8. С. 55–59.
- 11. Ченский Д.А., Григорьев К.А., Ченский А.Г. Роботизированный многоцелевой катамаран для подводных научно-исследовательских геологоразведочных и спасательных работ // Образование и научные исследования NI. NIDays-2015: сб. трудов XIV Междунар. науч.-практ. конф. М.: ДМК-пресс, 2015. С. 391–392.
 - 12. C-Worker-6 ASV. http://asvglobal.com/product/c-worker-6 (дата обращения: 23.12.2016).
- 13. Морские Вести России. Rolls-Royce приступит к разработке автономных судов. http://morvesti.ru/detail.php? ID=56899 (дата обращения: 20.02.2017).

