

АРХИТЕКТУРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АНПА

А.В. Инзарцев, О.Ю. Львов
А.В. Сидоренко, Д.Б. Хмельков

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН
Владивосток

ВВЕДЕНИЕ

Использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) для выполнения различных работ на больших глубинах и в условиях сложного рельефа дна требует наличия на борту развитой системы управления (см. [1] и ст. Л.В. Киселева с соавторами в настоящем журнале). Первоначально в АНПА использовались относительно простые системы (аналоговые управляющие модули, микропрограммные автоматы), реализованные на основе микросхем низкого и среднего уровней интеграции. Структуры бортовых систем АНПА основывались на использовании аналого-цифрового обмена между модулями и интерфейсом информационной магистрали. Такая структура была рассчитана на стандартное включение модулей в систему и осуществление сравнительно простых рабочих функций. Обмен информацией между конструктивно-функциональными модулями осуществлялся на основе естественных связей и сигналов, а их преобразование к единой форме производилось в центральном программном управляющем устройстве, представляющем собой «ведущий» модуль структуры. Аппараты такого класса могли выполнять не очень сложные обзорно-поисковые работы, а задания для них представляли собой линейные программы. Подобные структуры использовались в некоторых зарубежных аппаратах, например в АНПА «Epaulard» французской фирмы IFREMER и первых отечественных аппаратах («СкатГео», «Л-2», «Тифлонус»). При этом

выявились ограничения, обусловленные жесткой структурой управления.

По мере развития элементной базы и вычислительных сетей в АНПА начали размещать достаточно мощные вычислительные системы. Благодаря этому стало возможно выполнение сложных исследовательских работ и комплексных устройств, структуры которых варьировались в зависимости от назначения АНПА, его размеров и оснащения исследовательской аппаратурой. Здесь можно выделить конфигурацию «звезда», характерную для небольших, относительно простых аппаратов (AUV «REMUS», «Aqua Explorer-2»). В системах управления (СУ) многофункциональных аппаратов использовались структуры «магистраль» (AUV «Ocean Explorer», «AUTOSUB-1») или гибридные конфигурации (AUV «HUGIN 3000», аппараты ИПМТ ДВО РАН).

Можно также отметить, что в настоящее время наряду с созданием «больших» аппаратов прослеживается определенная тенденция миниатюризации как отдельных систем, так и конструктивных форм в целом [см. статью Ю.А. Боженова в настоящем журнале; 7].

К системам управления АНПА предъявляется ряд серьезных требований, связанных с автономным функционированием аппаратов в сложной подводной среде. Так, например, для производства *подлёдных работ* от СУ АНПА необходимо сочетание максимальной надежности (живучести) с высокой точностью навигационных изме-

рений. Подобные требования были положены в основу при создании канадского AUV «The-seus», предназначенного для прокладки подо льдом оптического кабеля. Аналогичные требования предъявляются и к другим аппаратам поисково-исследовательского типа и, в особенности, к многоцелевым аппаратам с большой степенью автономности.

В частности, необходимо, чтобы бортовой навигационный комплекс вычислял с требуемой точностью локальные или географические координаты аппарата, используемые системой управления для формирования и коррекции программы движения. АНПА, работающий подо льдом или обладающий большим радиусом действия, должен иметь степень автономности большую, чем аппараты, работающие вблизи судна и имеющие постоянный контакт с оператором. Во время выполнения длительных миссий такими аппаратами оказывают влияние эффекты неопределенности и неполного знания об окружающей среде. Следовательно, если для АНПА с небольшим радиусом действия могут быть использованы детально специфицированные программы-задания, то для дальнедействующего АНПА такой подход с большой вероятностью будет терпеть неудачу: при выполнении миссии могут возникнуть обстоятельства, не учтенные оператором. Такой АНПА должен иметь возможность корректировать свои планы по мере возникновения непредвиденных ситуаций.

В развитии АНПА существует определенная тенденция к использованию в том или ином виде канала телеуправления (ТУ). Для этого имеется ряд объективных условий.

Во-первых, использование канала супервизорного управления существенно расширяет

возможности АНПА при выполнении сложных обзорно-поисковых и поисково-обследовательских задач.

Во-вторых, по мере развития вычислительных средств, намечилось сближение телеуправляемых привязных аппаратов (ТПА) и АНПА. Первые варианты ТПА человек буквально «водил за руку», поскольку работа сопровождалась большим объемом команд, передаваемых от оператора к ТПА. В дальнейшем низкоуровневое управление переместилось с обеспечивающего судна внутрь аппарата, и в последних вариантах ТПА обмен информацией между роботом и оператором идет на уровне команд высокого уровня типа «возьми то-то» и «двигайся туда-то». В некоторых вариантах ТПА (например, TSL) между роботом и оператором существует чисто информационная связь, а энергопитание обеспечивается автономно с помощью батарей.

В-третьих, развитие средств сжатия, кодирования и передачи информации привело к созданию каналов с достаточно высокой пропускной способностью (до 20 кб/с). Это дало возможность передавать не только команды, но и достаточно большой объем информации, в том числе и видеоизображения в режиме малокадрового телевидения.

ТИПИЧНАЯ СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Несмотря на сложившиеся в силу традиций различия в организации программно-аппаратной архитектуры существующих аппаратов, любая система управления выполняет в составе АНПА следующие основные функции:

- организует выполнение программы-задания и обеспечивает управление движением;
- осуществляет обработку запросов от систем обнаружения



Рис. 1. Общая структура СУ

и навигации и соответствующую коррекцию задания;

- контролирует состояние бортовых устройств и корпусной системы АНПА, а также условия внешней среды для обеспечения безопасности при работе под водой;

- организует работу бортовой аппаратуры в соответствии с заданием;

- осуществляет сбор и накопление информации;

- ведет предстартовое тестирование бортовых устройств и проверку загруженной миссии;

- взаимодействует с судовым компьютером поста управления АНПА.

Общую структуру СУ можно представить следующим образом. Система содержит внутренний контур обратной связи по управлению и внешний – по планированию. Соответственно, имеется система управления нижнего и верхнего уровней. Система верхнего уровня включает в свой состав планировщик, который задаёт траекторию АНПА, используя последовательность команд. Далее эти команды интерпретируются нижним уровнем системы управления (рис. 1).

Планировщик в совокупности с программой-заданием за-

дает цели для системы управления нижнего уровня. Планировщик может иметь различную структуру.

Регуляторы, входящие в состав нижнего уровня системы управления, служат для достижения целевых значений, задаваемых планировщиком, и также могут иметь различную структуру. В настоящее время для управления АНПА используются как классические ПИД-регуляторы, так и регуляторы с переменной структурой на основе нечеткой логики, нейронных сетей и пр. Контрольно-аварийная система (КАС) тоже входит в состав нижнего уровня системы управления. Одной из ее задач является оценка состояния аппарата и реализация действий по восстановлению состояния подсистем АНПА в случае выхода их из строя. Как правило, КАС содержит эталонную модель контролируемых процессов.

Поскольку основная задача АНПА – сбор информации, то необходимой частью СУ является диск управляющего компьютера. Информация с помощью архиватора сохраняется в виде, пригодном для последующего анализа.

Для реализации внешнего контура обратной связи в каче-

стве устройств, получающих информацию о внешней среде, используются в основном различные эхолокационные приборы и приборы звуковидения. Практическое распространение получили многолучевые эхолоты с фиксированной диаграммой направленности или сканирующие локаторы. Проводятся эксперименты по использованию других средств очувствления (лазерные дальномеры, видеокамеры).

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ: АППАРАТНАЯ И ПРОГРАММНАЯ ЧАСТИ

Система управления любого современного подводного аппарата содержит бортовую локальную вычислительную сеть (ЛВС). В зависимости от размеров АНПА, его назначения и используемой схемотехники сеть может содержать как один, так и несколько компьютеров. Применяется также распределенная (на основе микроконтроллеров) или матричная (в основном, для реализации нейроконтроллеров) архитектура. При этом характеристики робота определяются конфигурацией вычислительной системы и организацией работы (архитектурой) его программного обеспечения (ПО).

Средства СУ нижнего уровня ориентированы на организацию функционирования аппаратного обеспечения, получение и предварительное использование данных. На этом уровне определяющую роль играют свойства используемой аппаратуры.

СУ на уровне планирования, напротив, имеет дело с более абстрактной информацией и не связана с обработкой исходных данных. Характеристики этого контура управления определяются свойствами используемого программного обеспечения.

Базой всего прикладного

программного обеспечения АНПА является операционная система. Во многом она определяет требования СУ к вычислительным ресурсам. Основные критерии при выборе операционной системы для АНПА следующие:

- возможность масштабирования и минимальные требования к вычислительным ресурсам (размеру оперативной памяти и мощности процессора);
- распределенные вычисления и сетевые возможности;
- облегченная конфигурируемость;
- свойства реального времени (мультизадачность, многоприоритетность, минимальное время переключения контекста задач).

В наибольшей степени перечисленным выше характеристикам удовлетворяют ОС РВ семейства UNIX (OS-9, Linux, QNX, VxWorks), которые и используются в подавляющем большинстве случаев. Более подробно критерии выбора операционной системы для АНПА рассмотрены в [4]. Например, в аппаратах ИПМТ ДВО РАН используется ОС QNX.

ОБЩАЯ СТРУКТУРА ЛВС СУ АНПА

В общей структуре ЛВС системы управления можно выделить базовые системы, обеспечивающие функционирование АНПА как носителя аппаратуры, и информационно-поисковые (рис. 2). Организующим ядром базовых систем является ведущий компьютер (автопилот), обеспечивающий управление движением, контрольно-аварийные и поисковые функции. Для формирования управления используются набор пилотажных датчиков и эхолокационная система (ЭЛС), а для обеспечения безопасности служат аварийные датчики. Движение организуется с помо-

щью движительно-рулевого комплекса. Дистанционное изменение миссии АНПА может осуществляться при наличии гидроакустической системы связи. Последняя также применяется для оперативного получения данных о текущем состоянии АНПА. Системы поиска АНПА используются для обнаружения АНПА на поверхности после окончания выполнения работ.

Важную роль играет навигационная система. Точность определения координат достигается за счет использования бортовой навигации, включающей инерциальную навигационную систему (ИНС) и доплеровский лаг. При работе АНПА в базе гидроакустических маяков накапливающаяся ошибка счисления пути может быть ликвидирована за счет комплексирования данных бортовой системы навигации и принимаемых на борту откликов маяков длиннобазовой гидроакустикой навигационной системы (ГАНС ДБ). Для этих же целей может быть использована информация о дальностях и пеленгах, получаемая от гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой (УКБ ГАНС).

Поисковые системы, входящие в состав системы технического зрения, по способу получения данных можно разбить на несколько групп. К акустическим системам относятся высокочастотные (ВЧ) и низкочастотные (НЧ) гидролокаторы бокового и секторного обзора (ГБО и ГСО, соответственно), а также профилограф. Данные устройства обычно подключаются к отдельному компьютеру для анализа, обработки и записи информации. Токопроводящие предметы могут быть обнаружены с использованием электромагнитного искателя (ЭМИ).

Обработку изображений осуществляет телевизионная систе-



Рис. 2
Функциональная
схема ЛВС АНПА

ма (ТВС). Помимо фото- и видеокамер в её состав входит компьютер, осуществляющий выделение объектов на изображениях. Информация от датчиков информационно-измерительных систем обычно накапливается для последующего построения разнообразных карт исследуемой акватории (экологических, геофизических и т. п.). При необходимости эта информация может быть использована в реальном времени, например для оконтуривания роботом места загрязнения или участка с аномальной температурой.

ЛВС АНПА создает единую информационную структуру, состоящую из компьютеров автопилота, системы техническо-

го зрения, а также различных бортовых устройств, функционирующих на базе микроконтроллеров различных типов. Сеть обеспечивает скоростной обмен информацией между компьютерами СУ и «прозрачный» информационный доступ любого из бортовых устройств. Для организации сети используются как высокопроизводительные (Ethernet), так и относительно низкоскоростные последовательные каналы обмена.

АППАРАТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЛВС АНПА

Конкретный выбор топологии сети для подводных аппа-

ратов связан с конструктивными ограничениями (габариты АНПА, заданный объем прочных контейнеров), количеством внешних (забортных) линий соединения контейнеров, а также требованиями к обеспечению надежности и живучести АНПА. Например, в случае затекания отдельных контейнеров АНПА должен, по возможности, сохранять работоспособность.

С точки зрения обеспечения надежности топология типа «звезда» для подводных аппаратов наиболее предпочтительна. Однако для многоцелевого АНПА, насыщенного большим количеством бортовых систем, принцип централизации, зало-

женный в основу «звезды», накладывает ограничение на количество узлов, подсоединенных к концентратору сети. Это связано в основном с ограниченным количеством выводов герморазъемов прочного контейнера, содержащего концентратор.

Компромиссным решением этой задачи является организация взаимодействия по двухпроводной линии обмена типа RS-485, образующей сегмент, который подключается через преобразователь RS-485/RS-232 или RS-485/USB к стандартному последовательному порту бортового компьютера. Эти же мосты могут решать задачи нижнего уровня (сопряжение с датчиками, управление исполнительными устройствами). Разработаны преобразователи интерфейса с различной степенью функциональной интеграции, производительностью, объемом встроенной памяти (рис. 3).

Сегментов, группирующих бортовые устройства по функциональным признакам и интенсивности взаимодействия, может быть более двух. Таким образом, организация взаимодействия бортовых устройств с центральным компьютером АНПА по стандартному последовательному каналу обмена создает предпосылки к выделению компьютера в физически законченный функциональный модуль с ограниченным числом внешних связей. Благодаря использованию стандартного последовательного канала обмена разработка бортового компьютера становится инвариантной к выбору конкретной процессорной платформы, её размеров.

Использование последовательных каналов обмена в забортных цепях АНПА позволяет разрабатывать гибридные структуры управляющих систем, сочетающих в себе свойства топологий «звезда» и «магистраль». Основанием такой сети выступает высокоскорост-

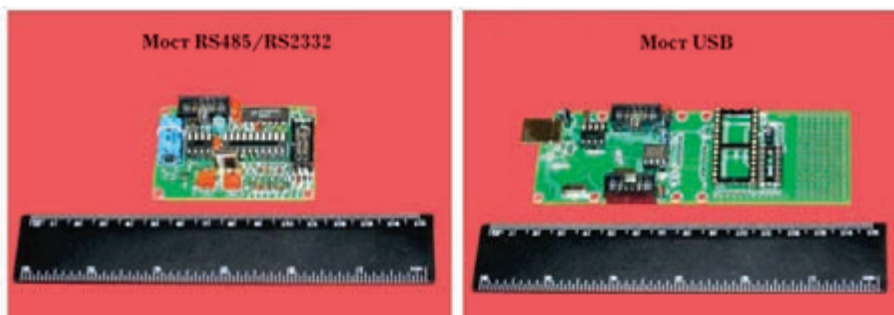


Рис. 3
Универсальные мосты-микроконтроллеры

ной канал связи (например, Ethernet 10/100), к которому подключены основные компьютеры локальной вычислительной сети АНПА. Его использование позволяет применять современные сетевые ОС и при необходимости осуществлять обмен большими массивами данных. В качестве примера

гибридной архитектуры приведена структурная схема ЛВС малогабаритного аппарата «ММТ-2000» (рис. 4).

Обработка информации таких бортовых устройств, как видеосистема, обзорные и батиметрические гидролокаторы и т. п., требует применения скоростных вычислителей и нако-



Рис. 4
Структура ЛВС АНПА «ММТ-2000»

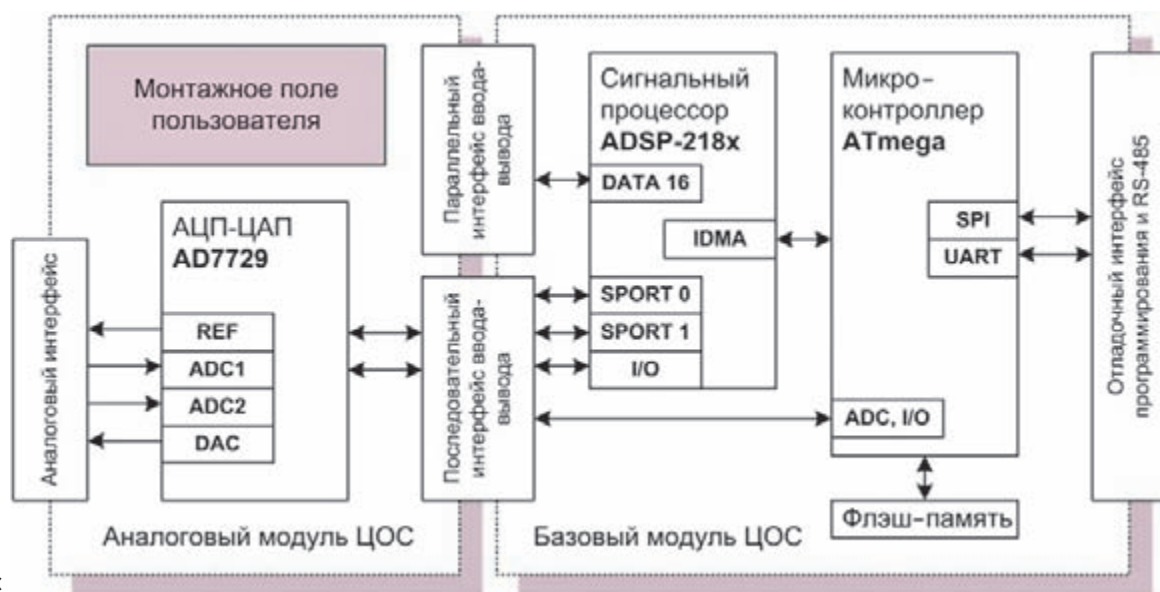


Рис. 5
Структурная
схема платы ЦОС

питателей информации с объемом памяти в десятки Гбайт.

При компоновке бортовой сети в разработках ИПМТ ДВО РАН широко применяется типовой модуль цифровой обработки сигналов (ЦОС), созданный на основе сигнального процессора. Плата ЦОС предназначена для обработки сигналов в реальном времени и может быть основой для разработки бортовых систем АНПА, таких как гидролокаторы, устройства акустической навигации, управления двигателями и т. п.

В состав платы ЦОС (рис. 5) входят:

- сигнальный процессор ADSP-218x/L/M/N с фиксированной точкой и производительностью до 80MIPS;

- микроконтроллер ATMEGA ATmega16L, который используется для обеспечения взаимодействия с бортовым последовательным каналом обмена RS-485 и скоростью до 1Мбод;

- двухканальный сигма-дельта АЦП-ЦАП AD7729 с частотой дискретизации до 200 кГц.

На плате предусмотрено место для размещения электронных схем обслуживаемого платой устройства (рис. 6).

Модули вторичных преобразователей напряжения питания

как гальванически изолированных, так и без изоляции позволяют реализовать концепцию распределенного питания бортовых систем АНПА непосредственно от бортовой батареи.

Используемые бортовые компьютеры

При построении ядра системы управления АНПА важен выбор одноплатных бортовых

компьютеров (ОК). Условия эксплуатации и практический опыт разработки АНПА в ИПМТ ДВО РАН позволяют сформулировать основные требования к выбору ОК и его комплектующих [5].

Малые габариты важны для минимизации объема устройства с целью оптимального размещения в стандартных прочных контейнерах (стандарты микроРС, РС-104).

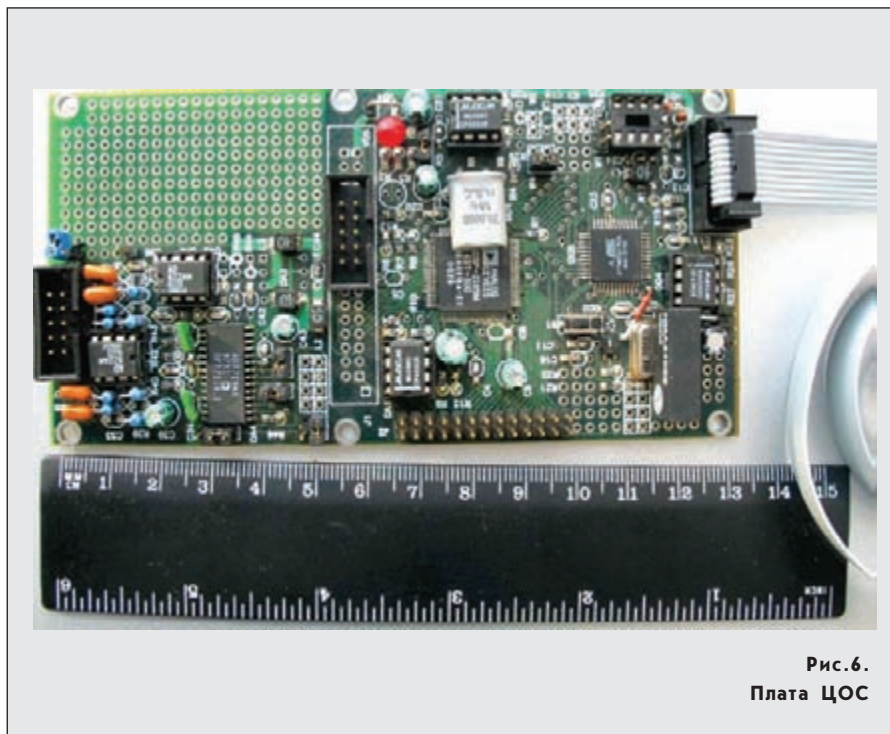


Рис. 6.
Плата ЦОС

Пониженное энергопотребление улучшает тепловой режим работы бортового компьютера (БК) и повышает в целом надежность устройства. Центральный процессор, как наиболее энергоемкое устройство бортового компьютера, должен эксплуатироваться в достаточно тяжелых условиях (температурный диапазон $-20...+70^{\circ}\text{C}$, влажность до 95 %, вибрации и удары до 5–20 g) с пассивным охлаждением (радиатором). Питание желательно напряжением одного номинала, например +5В.

Функциональная законченность ОК имеет определяющее значение. Интеграция на одной моноплате всех необходимых узлов уменьшает габариты устройства, количество разъемов и, как следствие, повышает его надежность.

Таким требованиям в максимальной степени удовлетворяют одноплатные компьютеры стандарта PC-104/104+. Подобные ОК хорошо вписываются в используемые в ИПМТ ДВО

РАН типоразмеры прочных контейнеров (рис. 7).

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПЛАТФОРМЫ

Развитие систем управления АНПА идет как в направлении миниатюризации, так и в направлении использования мощных вычислительных систем. При проектировании ЛВС для двух основных частей АНПА (СУ носителя и исследовательской аппаратуры) во внимание принимаются различные аспекты их функционирования. Если для СУ главным является возможность ввода и обработки навигационно-пилотажной информации, то для исследовательской аппаратуры важно наличие больших вычислительных мощностей для реализации различных алгоритмов. Проектируемая СУ должна также обладать хорошей масштабируемостью для использования в аппаратах различных классов.

Задача миниатюризации особенно актуальна для мел-

ководных аппаратов, ориентированных на массовое применение. Наряду с применением МЭМС-технологии в используемых ими навигационно-пилотажных датчиках аппараты так же должны обладать соответствующими миниатюрными процессорными системами. Наиболее перспективны для этих целей ОК на базе процессоров ARM.

В настоящее время многие фирмы разрабатывают микроконтроллеры на базе 32-разрядного процессорного ядра ARM7 с RISC-архитектурой. Широкое разнообразие микроконтроллеров на базе этого ядра с богатой периферией, имеющей практически любой набор стандартных коммуникационных интерфейсов, низкое энергопотребление (0,3 Вт при 55 МГц) являются удачным решением при построении интеллектуальных датчиков. ARM9 представляют собой дальнейшее развитие линии ARM7 в направлении функциональной насыщенности и технологии. Например, МК AT91RM9200 фирмы «Atmel» имеет производительность 200 MIPS при потреблении 0,1 Вт при наличии встроенной кэш-памяти, контроллера внешней памяти, различных коммуникационных интерфейсов, часов реального времени, многоканального счетчика-таймера.

Для вычислителя исследовательского оборудования (система технического зрения) определяющим является возможность обработки изображений в реальном времени (фильтрация изображений, выделение и распознавание объектов), а также большие накопители данных для сохранения изображений (100 МБ/ч). Подобные задачи решаются во время автоматического поиска и обследования заданных объектов, обнаружения посторонних предметов на заданной акватории и пр. Для их решения тре-

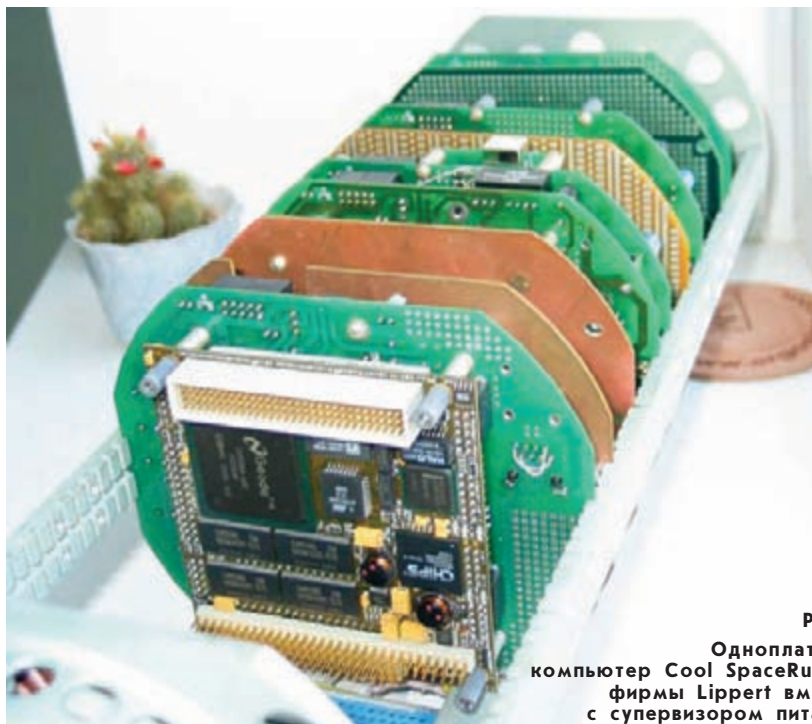


Рис. 7
Одноплатный компьютер Cool SpaceRunner фирмы Lippert вместе с супервизором питания в шасси автопилота системы управления АНПА

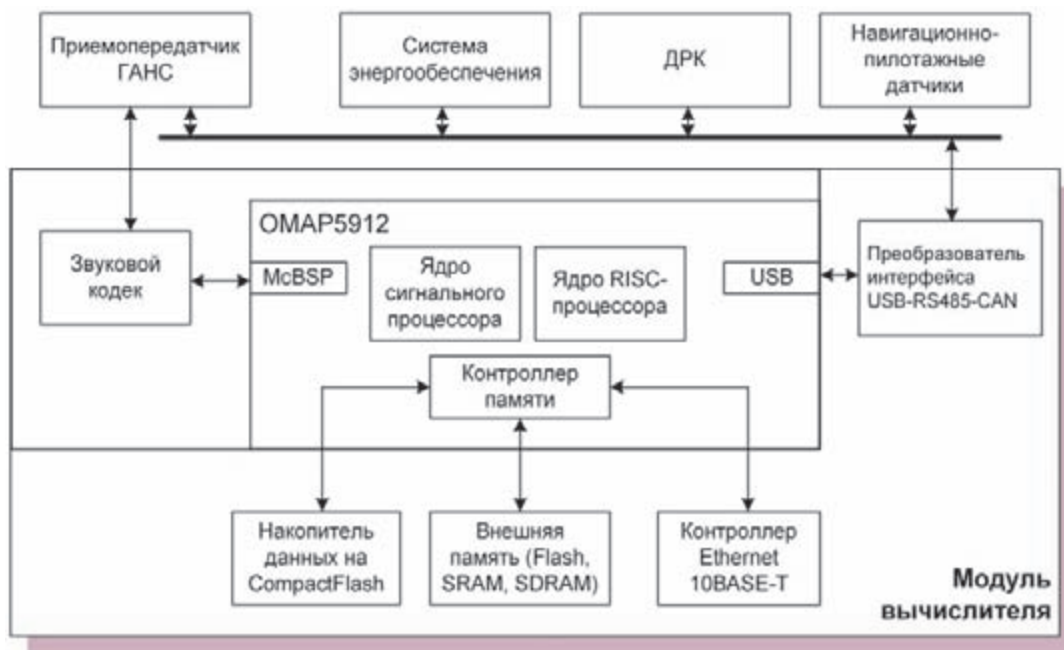


Рис. 8
Вариант интегрированной системы автопилота и ГАНС на базе типового функционального модуля OMAP

буется наличие на борту базы с большим количеством эталонных данных, должны быть обеспечены оперативный доступ к ним и быстрые процедуры обработки и сравнения фото- и ГБО-изображений.

Указанные операции традиционно выполняются на мощных CISC процессорах линии x86. Поэтому применение ОК на базе процессоров линии x86 является наиболее быстрым и малозатратным путем обработки данных, причем системные задачи и задачи обработки данных разрабатываются в одной среде. К перспективным изделиям этой линии можно отнести ОК на базе процессоров Pentium M (1,1–2,0 ГГц), AMD Geode™ GX 500 (при потреблении 1,0 Вт и тактовой частоте 366 МГц). Например, фирма «Lippert» выпускает линию ОК Cool...Runner в формате PC-104+, предназначенную для жестких условий эксплуатации без принудительного охлаждения. ОК этой серии имеют в своем составе полный набор функциональных модулей персонального компьютера, при этом потребляемая мощность для Pentium M составляет не более 25 Вт, а для AMD Geode™ GX 500 – не более 6 Вт.

Альтернативным вариантом бортового вычислителя системы технического зрения является двухъядерная архитектура, которая обеспечивает преимущества технологий сигнального процессора TMS320C55x и RISC-процессора ARM926EJ-S для встраиваемых систем. Высокоинтегрированное устройство OMAP5912 поддерживает ОС QNX для RISC-процессора и программным обеспечением СП, имеет широкий набор коммуникационных интерфейсов, включая возможность подключения накопителя информации, обладает малым энергопотреблением на частоте 200MHz, позволяет выполнять обработку изображений в реальном времени на ядре СП и системные функции (накопление, обмен) на RISC-ядре. Устройство спроектировано для использования во встраиваемых системах и предназначено в основном для видеобработки. Например, модуль на базе процессора OMAP5912 в своем составе имеет звуковой кодек, последовательный порт RS-232, Ethernet и USB, разъем для подключения накопителя данных Compact flash. При этом потребление составляет

не более 1,25 Вт. OMAP может являться основой для типового функционального модуля как вычислителя СУ, так и исследовательского оборудования. Наличие ядра сигнального процессора в OMAP5912 позволяет задействовать его под решение задач обработки навигационных сигналов нижнего уровня и рассматривать вычислитель на базе OMAP5912 как интегрированный модуль системы управления и бортового блока гидроакустической навигационной системы (ГАНС) (рис. 8).

Дальнейшим развитием этой двухъядерной архитектуры является процессор TMS320DM6446, выполненный по технологическим нормам 90 нм, в состав которого входят сигнальный процессор TMS320C64x (600 МГц) и ARM926EJ-S (300 МГц).

ПРОГРАММНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АНПА

Развитие структуры программного обеспечения АНПА шло в нескольких направлениях. Одно из них связано с адаптацией к специфике АНПА архитектур управления, разрабо-

таных для автономных наземных средств. Здесь можно отметить работы по применению управления с расслоенными структурами в AUV «*Odyssey*» и «*Fetch*» и иерархической архитектуры с эталонной моделью в AUV «*EAVE-III*» [8].

Другое направление заключалось в расширении информационной автономности привязанных НПА за счет переноса на борт интеллектуальных функций управления. Данное направление характеризуется появлением гетерархической структуры [2]. Исследовались и разрабатывались также системы управления с сетевой архитектурой, изначально ориентированные на применение в АНПА [3].

В зависимости от логики организации взаимодействия всех модулей системы различают иерархическую (функциональную), поведенческую (расслоенную) и гибридную (смешанную) архитектуры.

Принцип восприятие–модель–план–действие является ключевым для иерархической архитектуры. На основе этого принципа функционирует каждый из уровней иерархии. Такая архитектура характеризуется вертикальным движением информации. Объектом действия каждого последующего уровня иерархии является нижестоящий уровень. Снизу вверх движутся данные от сенсоров, становясь все более абстрактными. Сверху вниз осуществляется планирование действия, причем при движении сверху вниз план приобретает все большую конкретность.

Процесс управления можно декомпозировать не на базе внутреннего разделения действий, а на базе желаемых внешних проявлений деятельности системы управления роботом. С этой точки зрения можно выделить несколько уровней

компетенции, или слоев СУ, каждый из которых реализует определенное поведение робота. Отклик каждого слоя основывается на текущих сенсорных данных, а объектом действия является подмножество объектов всей задачи. В результате действия робота определяются некоторой композицией поведений, каждое из которых формируется одним из слоев управления. В такой архитектуре можно говорить о горизонтальном движении информации [9].

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ПРОГРАММНАЯ СРЕДА УПРАВЛЕНИЯ

Описанная аппаратная структура находит свое отражение в программном обеспече-

нии СУ. Архитектура программного обеспечения, применяемая в аппаратах ИПМТ ДВО РАН, ориентирована на специфику задач, решаемых АНПА, поэтому должна поддерживать ряд основных требований:

- возможность задания и реализации основной (обзорно-поисковой) части миссии аппарата;
- обследовательские части миссии должны иметь возможность прерывать выполнение основной части и активизироваться в случае обнаружения специфицированных объектов;
- средства обеспечения безопасности робота также должны иметь возможность изменения хода миссии;
- при необходимости оператор на обеспечивающем судне

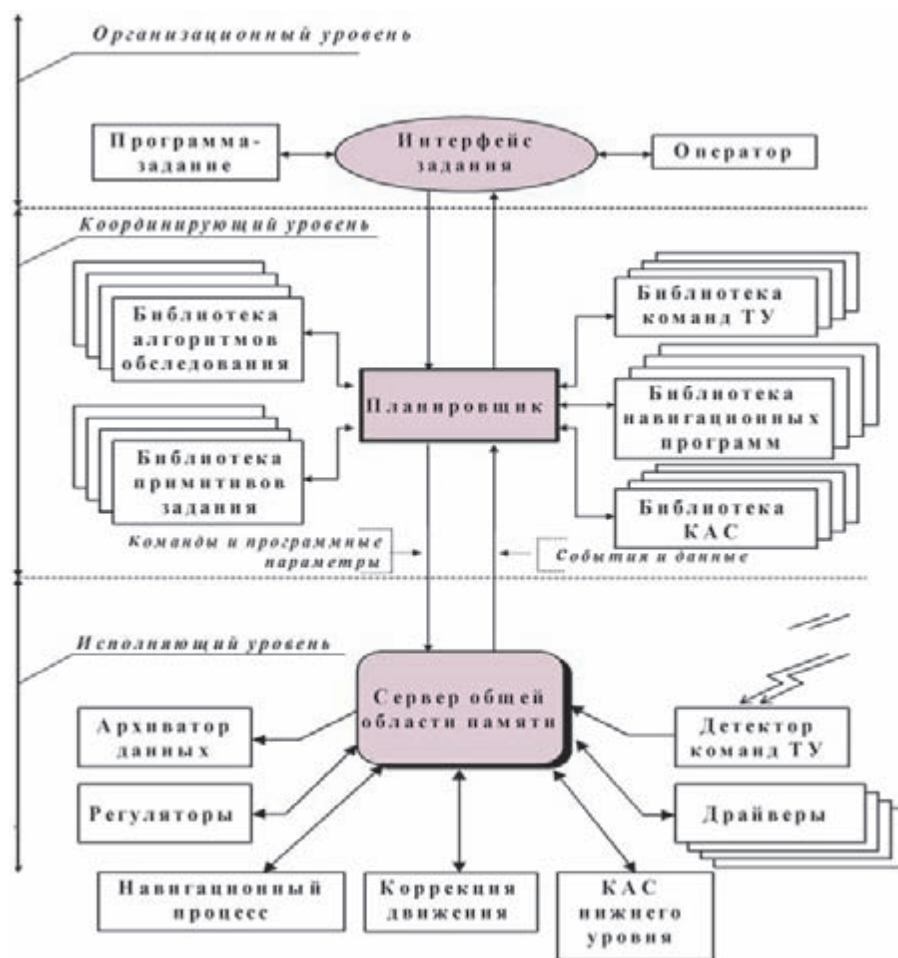


Рис.9 Организация уровней системы

должен иметь возможность встраиваться в работу АНПА с использованием гидроакустического канала связи.

Архитектура ПО АНПА имеет три уровня иерархии со следующим распределением функций (рис. 9). Нижний (исполняющий) уровень системы обеспечивает рефлекторные функции аппарата. Для этого он содержит полный набор регуляторов, драйверы бортовых устройств, навигационную систему и процессы нижнего уровня контрольно-аварийной системы. Последние должны обеспечивать безопасность АНПА при непосредственной угрозе (появление воды в контейнерах, состояние бортового питания, наличие препятствий и т. п.). Контрольно-аварийная система (КАС) нижнего уровня также содержит модель аппарата для диагностики системы управления (выявления выхода из строя измерительных элементов навигационной системы или двигателей аппарата). Совместное функционирование программ нижнего уровня обеспечивает движение АНПА в установленном режиме и заданную работу бортовых устройств.

Уровень реализован как множество параллельно выполняющихся процессов, обменивающихся необходимой информацией через общую область памяти. Драйверы уровня обеспечивают получение данных со всех бортовых устройств ЛВС АНПА, а механизм межпроцессных взаимодействий QNX (IPC) позволяет «прозрачный» обмен данными между подзадачами, находящимися как на одном, так и на различных узлах сети. Таким образом, драйверы бортовых устройств «инвариантны» по отношению к изменению размещения бортовых устройств на сегментах ЛВС АНПА.

Средний (координирующий) уровень системы служит для непосредственного управления

режимами и целями нижнего уровня. Основная его задача – согласование потока команд, целей и запросов на получение данных от верхнего уровня и запросов на действия, поступающих от нижнего уровня. Обработка запросов заключается в идентификации ситуации и выборе заранее написанных правил обработки, которые составляют библиотеку обработчиков среднего уровня. Для координации действий обработчиков все они объединены в расслоенную структуру. Состав структуры для каждого момента времени определяется планировщиком, входящим в состав уровня.

Верхний уровень иерархии (стратегический) представлен программой-заданием (миссией), содержащей цели запуска, либо человеком-оператором. Программа-задание содержит описание последовательности действий робота и режимов движения. Помимо этого также возможно описание обработки запросов нижних уровней.

Перечисленные выше тенденции развития бортовых вычислителей требуют от используемой программной среды поддержки различных аппаратных платформ, составляющих единую ЛВС. Кроме того, для решения задач распознавания необходимо развитие программной архитектуры в направлении расширения возможности работы как с заранее сохраненными массивами данных, так и собираемыми в процессе работы АНПА. В этой связи особо привлекательным представляется использование СУБД реального времени для организации концепции открытой СУ. В этом случае взаимодействие всех компонентов системы осуществляется через распределенную СУБД РВ. Использование СУБД имеет ряд особенностей.

Во-первых, за счет серверной идеологии СУБД решается проблема синхронизации в слу-

чае одновременного доступа к данным со стороны различных приложений. Кроме того, СУБД гарантирует сохранность данных. Традиционно в системах реального времени это достигается за счет громоздкого и неудобного механизма семафоров и мутексов.

Во-вторых, решается проблема «волнового эффекта» при расширении функциональности АНПА (т. е. сильной структурной взаимосвязи всех элементов системы, при которой изменение одного элемента влечет изменение всех остальных).

В-третьих, СУБД в состоянии с нужным периодом проводить автоматический опрос датчиков в системе и создавать событийную реакцию отдельных драйверов на изменение среды.

В-четвертых, упрощается использование алгоритмов с памятью. Как правило, современные СУБД РВ обеспечивают ускоренный доступ к более «свежим» данным при наименьшем объеме используемого ОЗУ.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ

Описанная архитектура неоднократно испытывалась в морских экспедициях (в т. ч. и в поисково-спасательных [6]) с участием АНПА. В ходе экспедиций аппараты, в которых были реализованы эти решения, продемонстрировали такие характеристики, как:

- высокая надёжность системы управления (время непрерывной работы ограничивается возможностями энергоустановки АПР и может составлять 1 сут и более);

- простота задания миссии и возможность её перегрузки по каналу радиосвязи во время нахождения аппарата на поверхности;

- высокая точность воспроизведения заданной траектории

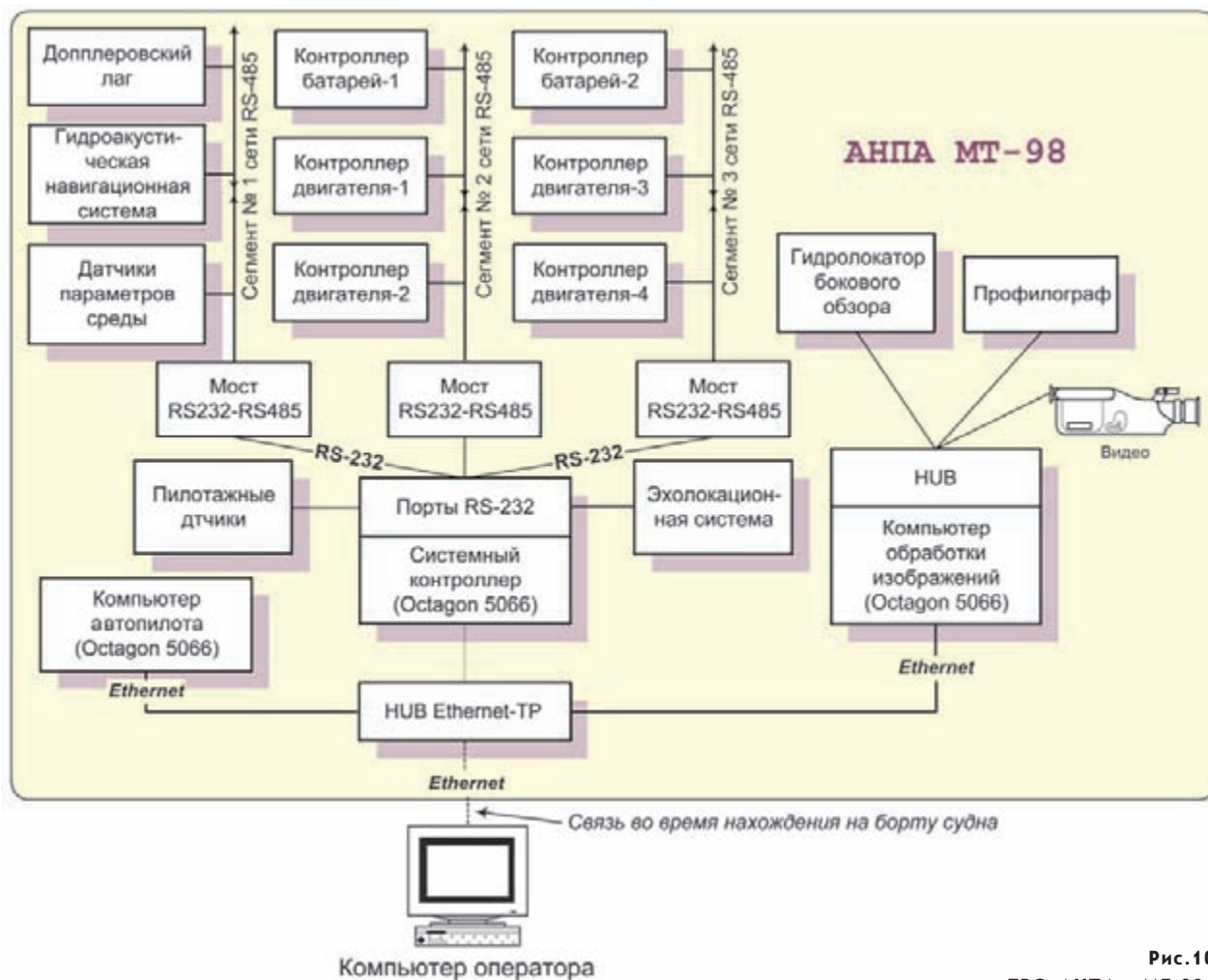


Рис. 10
ЛВС АНПА «МТ-98»

и навигационной привязки собранной информации;

- способность осуществления поиска и обследования объектов в автоматическом режиме;

- возможность модификации миссии по гидроакустическому каналу связи (что особенно актуально в поисковых экспедициях).

Примером использования архитектуры может служить АНПА «МТ-98», предназначенный для работы на глубинах до 6000 м и ориентированный на работу в сложном рельефе. Аппарат имеет движительную установку, обеспечивающую произвольные режимы движения (в т. ч. боком, зависание и т. п.). Для осуществления движения вблизи препятствий используется многоканальная эхо-

локационная система, позволяющая различать препятствия впереди по ходу движения, а также двигаться в диапазоне высот от 0,7 до 50 м.

Для слежения за работой АНПА под водой используется гидроакустическая навигационная система. Кроме того, эта же система позволяет вести супервизорный контроль работы АНПА (коррекцию выполняемой миссии). На поверхности для связи с аппаратом применяется радиомодем. С его помощью можно получить по радиоканалу ключевые наборы данных для анализа, загрузить новую миссию, управлять перемещением аппарата по поверхности воды. Источником питания являются аккумуляторы, обеспечивающие около 20 ч эффективной работы у дна. Масса аппара-

та составляет примерно 1000 кг и зависит от оснащения дополнительной аппаратурой.

Система управления состоит из нескольких компьютеров «Octagon-5066», выполняющих различные функции и объединенных в локальную вычислительную сеть посредством канала Ethernet. Работа этой сети организуется с использованием ОС QNX. К этой же сети подключается компьютер оператора, когда АНПА находится на борту судна (рис. 10). Распределенная структура СУ предполагает следующее разделение функций между компьютерами ЛВС. Автопилот и системный контроллер составляют основу системы управления и обеспечивают выполнение введенного задания, координацию работы бортовой аппаратуры и конт-

рольно-аварийные функции. Процессор *обработки изображений* служит для выделения объектов и прецизионной навигации.

Характерной особенностью ЛВС аппарата «МТ-98» является наличие наряду со скоростным каналом Ethernet-TP нескольких последовательных каналов обмена RS-485. На последовательных каналах размещается бортовое оборудование, оснащенное микроконтроллерами. Последние обеспечивают функции предварительной обработки данных и самодиагностики, поэтому информационный обмен с ними сведен к минимуму. Оборудование группируется вокруг каналов таким образом, чтобы выход из строя одного из них не приводил к потере работоспособности всего аппарата.

В опытной эксплуатации АНПА «МТ-98» неоднократно проверялась его способность осуществлять автоматическое

обнаружение и отслеживание объектов. В качестве примера ниже приводятся данные одного из таких экспериментов.

При поиске и отслеживании объектов управление формируется на двух уровнях иерархии СУ АНПА (рис. 11). Основной вычислительный процесс осуществляется на исполняющем уровне системы в компьютере обработки видеозображений (СТЗ). В задачи компьютера входят выделение протяженных объектов (ПО), присутствующих на последовательно отснятых фотокадрах, и определение их параметров (факт наличия, ориентацию и смещение относительно центра кадра). Через соответствующий драйвер компьютер СТЗ обменивается данными, командами и запросами с ядром СУ АНПА (посредством распределенной базы данных).

При отсутствии в отснятых кадрах протяженного объекта работа компьютера СТЗ никак не сказывается на выполнении основной миссии АНПА. При

обнаружении объекта формируется соответствующее сообщение к вышестоящему (координирующему) уровню иерархии. В зависимости от состояния Планировщика это требование может быть отклонено, поставлено в очередь или немедленно исполнено. В последнем случае выполнение программы-задания приостанавливается и активизируется процедура обработки. В нашем случае это стандартная процедура обработки, заключающаяся в организации отслеживания объекта. На рис. 12 приведены кадры, отснятые телевизионной системой и соответствующие моменту обнаружения объекта (протяженной линии) и выхода на него. После завершения отслеживания объекта программа координирующего уровня деактивируется и возобновляется выполнение миссии.

На рис.13 приведена траектория аппарата во время поиска, обнаружения и отслеживания объекта.

После старта АНПА была включена фотосистема, активизировалась стандартная программа обнаружения и отслеживания объекта. На первом этапе аппарат выполнил поисковую часть программы, затем после обнаружения протяженной линии двигался вдоль нее и, когда программа отслеживания была завершена, он возвратился к выполнению исходной миссии.

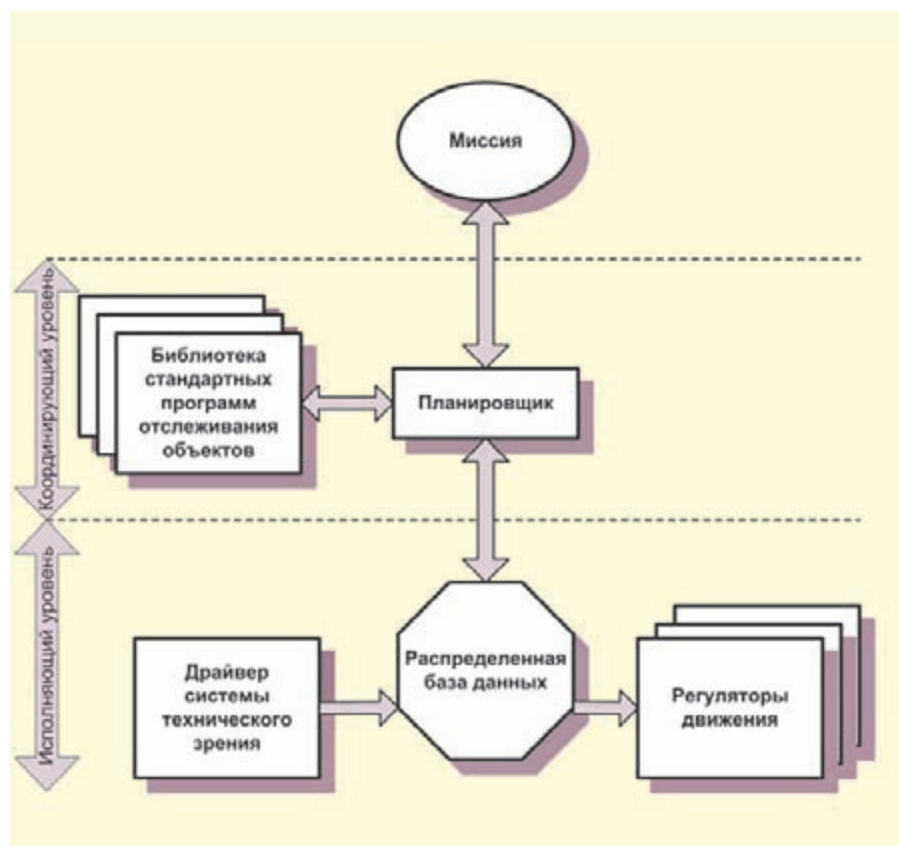


Рис. 11
Взаимодействие уровней системы при отслеживании объекта

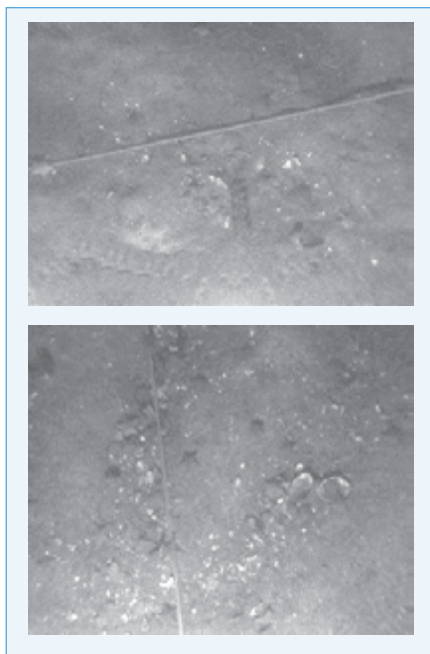


Рис. 13
Траектория АНПА, полученная по счислению

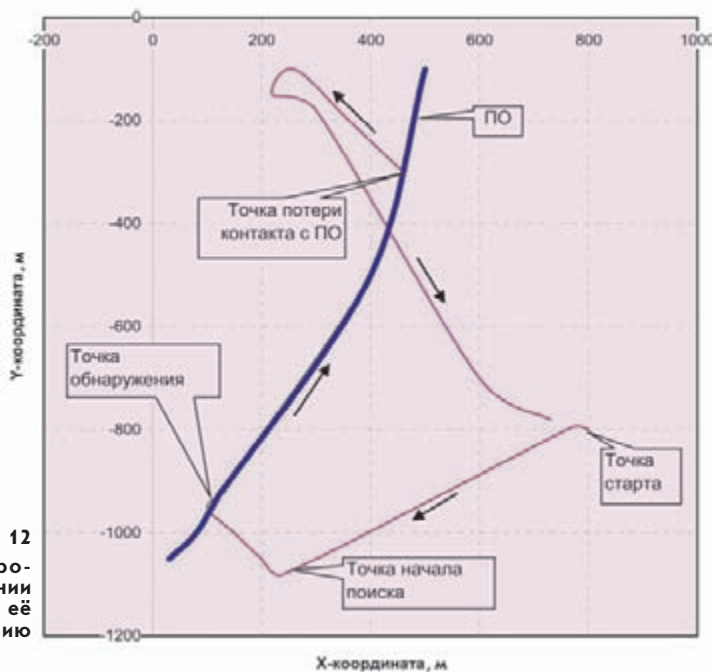


Рис. 12
Обнаружение протяженной линии и переход к её отслеживанию

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К основным тенденциям развития бортовых ЛВС АНПА можно отнести минимизацию их размеров и энергопотребления при сохранении (или, даже, улучшении) их функциональных характеристик. Это и понятно: небольшая система легко может быть встроена в аппарат любых размеров. К основным тенденциям можно также отнести «интеллектуализацию» периферийного оборудования АНПА на базе встроженных микроконтроллеров. Следствием является разгрузка центрального процессора носителя АНПА и определенная децентрализация управления. Последнее обстоятельство позволяет повысить живучесть аппарата за счет динамического перераспределения функций управления в случае выхода из строя какого-либо узла сети. Разгрузка центрального процессора дает больший маневр в выборе его вычислительной платформы и позволяет в широких пределах варьировать его размеры в зависимости от назначения разрабатываемого АНПА. Современ-

ные операционные системы (в частности, используемая в ИПМТ ДВО РАН QNX 6.3) поддерживают тенденции применения в ЛВС разноплатформенных вычислительных узлов.

В наметившейся тенденции уменьшения размеров АНПА существует разумный предел, определяемый компромиссом между функциональными возможностями и размерами аппаратов. Упомянутые в статьях [7, 8] малогабаритные аппараты пока обладают серьезными функциональными ограничениями и в решении практических задач не могут конкурировать с существующими «полноразмерными» аналогами.

Развитие алгоритмического обеспечения систем управления ориентировано на увеличение автономности АНПА за счет использования различных методов интеллектуального управления (см. статью Киселева и др. в настоящем журнале).

Авторы выражают признательность с.н.с. А.А. Борейко и м.н.с. А.Н. Севрюку за предоставленную информацию и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005, 398 с.
2. Ястребов В.С., Филатов А.М. Системы управления подводных аппаратов-роботов. М.: Наука, 1983. 88 с.
3. Молоков Ю.Г., Зозулинский А.М. Сетевая архитектура бортовых систем АПР // Подводные роботы и их системы. г. Владивосток, 1987. С. 81-110.
4. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В. Применение ОС QNX в подводной робототехнике // Современные технологии автоматизации. 2002. № 3. С. 66-71.
5. Кругляк К. Одноплатные компьютеры для встраиваемых систем // Современные технологии автоматизации. 2003. № 4. С. 6-17.
6. Поиск и подъем вертолета Ка-27ПС. Март-апрель 2003 года. Тихоокеанский флот// Морской сборник. 2004. № 5. С. 55-63.
7. Бочаров Л.Ю. Анализ тенденций развития исследований и разработок в области создания подводных микроаппаратов // Нано- и микро-системная техника <http://www.microsystems.ru/files/publ854.htm>
8. Albus J.S., Proctor F.G. A Reference Model Architecture for Intelligent Hybrid Control Systems, IFAC'96, USA, June 30-July 5, San Francisco.
9. Brooks R.A. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot // IEEE Transactions on Robotics and Automation 2(1), March 1986. P. 14-23.