

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 2 (83)

февраль

2008

Редакционный совет:

МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАССАДКИН Ю. И.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ФУРСОВ В. А.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

По материалам

**Второй Всероссийской научно-практической конференции
"Перспективные системы и задачи управления"**

- Алфимов С. М.** Перспективные направления развития базовых военных технологий в области создания систем управления и обработки информации 2
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Интеллектуальные системы управления автономными мобильными объектами 6
- Соколов В. Б., Теряев Е. Д.** Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам публикаций в Интернете) . . . 12
- Бражник В. М., Герасимов Г. И.** Развитие интегрированных комплексов бортового оборудования самолетов нового поколения 24
- Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г., Евстифеев М. И., Некрасов Я. А., Аксёненко В. Д.** Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ "Электроприбор" 29
- Каляев И. А., Шерemet И. А.** Военная робототехника: выбор пути 32
- Пшихопов В. Х.** Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями. 34
- Евсеев А. А., Носков В. П., Платонов А. К.** Формирование электронной карты при автономном движении в индустриальной среде. 41
- Красильникьянц Е. В., Бурков А. П., Иванков В. А.** Применение контроллеров движения для систем управления электромеханическими объектами. 45

**Управляющие и информационно-измерительные системы
летательных аппаратов**

- Александров А. А., Кабанов С. А.** Оптимизация посадки беспилотного летательного аппарата с учетом ограничений на управление. 50
- Бронников А. М.** Формализованный синтез нелинейных законов управления систем улучшения устойчивости и управляемости летательных аппаратов 55
- Заведеев А. И., Архипов Р. А.** Возможные подходы к построению перспективных систем управления ориентацией космических аппаратов с помощью гиросиловых устройств 55
- Соколов С. В., Щербань И. В., Куликов Ю. А.** Решение задачи управления наведением подвижного объекта на цель с априорно неопределенным подвижным центром на основе оптимального оценивания 55
- Митрофанов Д. Г., Слатин В. В., Грибков В. Ф., Овчинникова Т. В.** Сравнение методов получения радиолокационных изображений с использованием синтеза-рования апертуры бортовой антенны РЛС 56
- Contents** 56

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание степени доктора наук

Аннотации статей размещены на сайте журнала по адресу <http://www.informika.ru/text/magaz/it/> или <http://novtex.ru/IT>

По материалам Второй Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления"

УДК 681.518

С. М. Алфимов, начальник Управления развития базовых военных технологий и специальных проектов, генерал-лейтенант

Перспективные направления развития базовых военных технологий в области создания систем управления и обработки информации

Рассматриваются направления развития науки и техники в области фундаментальных и прикладных исследований, связанных с разработкой, внедрением и эксплуатацией перспективных систем управления. Формулируются основные направления и требования к базовым технологиям в области создания интеллектуальных робототехнических систем различного назначения.

Введение

В марте 2006 года Таганрогским государственным радиотехническим университетом при поддержке Минобороны России, Минобрнауки России, МЧС России и РАН в п. Домбай была проведена первая Всероссийская научно-практическая конференция "Перспективные системы и задачи управления".

Конференция позволила выделить ключевые направления развития систем управления и обработки информации как специального, так и гражданского назначения, определить критические технологии в области их создания.

Новые подходы к созданию систем управления и обработки информации, предложенные участниками конференции, сегодня реализуются при выполнении Государственной программы вооружения на 2007—2015 годы, комплексных целевых программ в области развития базовых военных технологий, а также при выполнении ряда военных и специальных НИОКР в области роботизации и автоматизации вооружений и военной техники (ВВТ), создания высокоточного оружия, автоматизированных систем управления войсками и оружием различных видов и родов войск Вооруженных сил Российской Федерации.

Успешное проведение конференции, научная содержательность и практическая значимость об-

суждавшихся вопросов, высокий уровень ее организации продемонстрировали необходимость продолжения полновесного диалога и укрепления координационных связей между учеными, заказчиками, разработчиками и потребителями разрабатываемых систем управления.

Основные направления развития базовых военных технологий

В соответствии с программой конференции в ходе ее проведения представлены современные отечественные достижения и результаты новых фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в областях:

- современной теории и принципов построения систем управления и обработки информации;
- моделирования сложных систем;
- цифровой обработки и защиты информации;
- автоматизированных систем управления;
- интеллектуальных систем планирования перемещений и управления движением;
- технологий и технических средств робототехники;
- сенсоров, датчиков и задач навигации;
- микросистемотехники и по ряду других направлений.

В том числе представлены результаты прикладных НИОКР по созданию систем и комплексов для решения военных и специальных задач, борьбы с терроризмом и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Основными факторами, обуславливающими необходимость развития систем управления и, в первую очередь, систем военного назначения, являются:

- возрастающие потребности в повышении уровня автоматизации перспективного вооружения, обусловленные неблагоприятным влиянием человеческого фактора в реальных боевых условиях за счет стрессовых ситуаций;
- недостаточный уровень подготовки личного состава;
- невозможность оперативной обработки боевыми расчетами (экипажами) больших объемов информации;
- дефицит времени на исполнение действий, ограниченных физиологическими возможностями человека;

- наличие ряда военных задач, решение которых с использованием существующей и традиционной техники сопряжено со значительным риском для жизни и здоровья личного состава, либо со значительными затратами.

Современные автоматизированные системы управления создаются на основе информационных защищенных компьютерных технологий, понимания предметной области автоматизации, соблюдения основных принципов построения сложных иерархических систем управления — системности, совместимости, стандартизации и унификации, устойчивости функционирования, возможности непрерывного развития и совершенствования.

Создание перспективного вооружения связано с повышением точности, быстродействия, инвариантности и стойкости к внешним воздействиям систем управления, а также с реализацией характеристик, присущих новому поколению систем управления, таких как адаптивность и автономность.

Анализ тенденций развития средств и методов вооруженной борьбы, управления войсками и оружием убедительно свидетельствует о необходимости привлечения принципиально новых подходов, позволяющих существенно повысить тактико-технические характеристики и функциональные возможности новых образцов ВВТ, обеспечить эффективность их применения.

Создание перспективных систем управления военного назначения, аппаратно ориентированных для работы в условиях неполноты или нечеткости исходной информации, неопределенности внешних воздействий и среды функционирования, требует привлечения нетривиальных подходов к управлению и использованию технологий искусственного интеллекта.

Очевидно, что при наличии различного рода неопределенностей высокий уровень автономности, адаптивности и надежности систем управления должен обеспечиваться за счет повышения их интеллектуальных возможностей.

Такие системы, называемые интеллектуальными системами управления, на наш взгляд, образуют совершенно новый класс систем, для которого не только принципы построения, методы анализа и синтеза находятся в стадии развития, но и основные понятия и определения нуждаются в тщательной методической проработке.

Обеспечение развитых возможностей по анализу и распознаванию обстановки, формированию стратегии целесообразного поведения объекта управления, планированию последовательности его действий, удовлетворяющих заданным показателям качества, обуславливает необходимость иерархической организации интеллектуальной системы управления.

При этом главным критерием выбора должно служить требуемое качество функционирования системы

управления в условиях неопределенности при случайном характере внешних воздействий, к которым можно отнести непредусмотренное изменение фоноцелевой обстановки, собственных эксплуатационных характеристик объекта управления и параметров среды.

В последние годы за рубежом существенно повысился интерес к исследованию прикладных интеллектуальных управляющих систем, их разработке и внедрению в промышленную и военную сферы. Стремительно растет число публикаций на эту тему.

Сегодня уже можно говорить о становлении нового научного направления — теории интеллектуального управления.

Тем не менее, несмотря на явный рост числа публикаций, освещающих теоретические и прикладные аспекты нового научного направления, в области интеллектуального управления не все вопросы еще решены. Нет устоявшейся терминологии и однозначного понимания существа процессов, протекающих в подобных системах, в процессе становления находится сама методология проектирования таких систем.

В России фундаментальные и прикладные работы по созданию интеллектуальных систем управления активно проводятся во многих организациях, в том числе в Вычислительном центре РАН, Институте прикладной механики РАН, Московском энергетическом институте, Московском авиационном институте, Московском институте радиотехники, электроники и автоматики, Московском институте электронной техники, Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана, Технологическом институте Южного федерального университета в г. Таганроге.

Широкое применение интеллектуальные системы управления находят в работах по роботизации ВВТ, которые активно ведутся у нас в стране и за рубежом.

Основные задачи, решаемые в этой области, следующие:

- создание научных основ, разработка базовых технических и технологических решений в области военной робототехники;
- разработка технических решений для модернизации состоящих на вооружении образцов ВВТ в целях обеспечения возможности их безэкипажного применения;
- разработка боевых и обеспечивающих образцов робототехнических комплексов военного и специального назначения;
- создание отдельных систем и функционально законченных устройств в области автоматизации и интеллектуализации вооружения.

Можно сформулировать ряд общих технических требований к системам управления робототехнических комплексов военного и специального назначения:

- ♦ построение системы управления по распределенному принципу с использованием как универсальных, так и специализированных вычислительных средств;
- ♦ использование мощной бортовой вычислительной системы, способной решать два класса ресурсозатратных задач — проводить универсальные алгоритмические вычисления и обрабатывать большие параллельные информационные потоки;
- ♦ применение многоканальной системы локальной навигации;
- ♦ наличие многоспектральной системы технического зрения, способной работать в условиях пониженной освещенности и сложных метеоусловиях;
- ♦ необходимость системы автономного электропитания, обеспечивающей максимальное время функционирования при минимальных массогабаритных характеристиках;
- ♦ минимальное энергопотребление всех систем и узлов;
- ♦ наличие высокоскоростных, помехозащищенных каналов связи и управления;
- ♦ высокая нагрузочная способность силовых элементов управления;
- ♦ использование в системе компонентов, отвечающих жестким требованиям по условиям применения в соответствии с требованиями комплексов стандартов "Климат-7" и "Мороз-6" (температуре, давлению, влажности, стойкости к внешним воздействующим факторам).

Высокие требования предъявляются к информационным каналам и каналам передачи сигналов управления:

- скорость передачи телевизионного сигнала — свыше 56 Мбит/с;
- высокая помехозащищенность и криптостойкость;
- дальность устойчивой связи на пересеченной местности — до 3...5 км.

Как показал отечественный и зарубежный опыт разработки мобильных робототехнических комплексов (РТК), особенно военного и специального назначения, широко применяемые системы дистанционного управления в настоящее время имеют ряд принципиальных ограничений, основными из которых являются следующие:

- повышенные требования по надежности и помехозащищенности предъявляются к каналам связи;
- радиус действия дистанционно управляемого робототехнического комплекса ограничен зоной уверенного радиообмена;
- имеется возможность эффективного применения противником средств радиоэлектронного противодействия.

Поэтому дальнейшее развитие специальной и военной робототехники связано с повышением автономности робототехнических комплексов за счет передачи функций, выполняемых человеком-оператором, бортовым средствам.

Министерством обороны США в 2006 году успешно проведены испытания полностью автономных робототехнических комплексов, которые впервые преодолели по пересеченной местности расстояние около 200 км со средней скоростью 30 км/ч.

Такая интеллектуализация робототехнических комплексов требует решения бортовыми средствами следующих основных задач:

- ♦ дистанционное определение геометрических и опорных характеристик зоны маневрирования;
- ♦ определение текущих координат и ориентация робототехнических комплексов в пространстве (например, с точностью не хуже 5...10 см для наземной техники);
- ♦ формирование оперативной (локальной) и текущей (глобальной) моделей внешней среды с учетом оперативной (показания бортовых датчиков и сенсоров) и априорной (картографических данных) информации о районе маневрирования;
- ♦ планирование целенаправленных траекторий движения на оперативном и тактическом уровнях;
- ♦ отработка планируемых траекторий движения;
- ♦ контроль и диагностика программно-аппаратных средств бортовой системы управления и двигательной установки.

Таким образом, наиболее перспективными для применения в военной технике являются системы автоматического управления РТК, ключевой особенностью которых является использование интеллектуальных технологий, в первую очередь, на стратегическом уровне управления, для решения задач планирования поведения, что коренным образом отличает автономный мобильный робот от дистанционно управляемого.

Специфические требования предъявляются к системам управления, применяемым в пилотируемой и беспилотной авиации.

Ключевыми вопросами, определяющими облик и применение комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) являются:

- реализация совместного боевого применения пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в структуре смешанных сил тактической авиации;
- обеспечение безопасности летной эксплуатации боевых и разведывательных беспилотных летательных аппаратов в зоне полетов гражданской авиации, включая случаи возвращения и посадки с неиспользованной боевой нагрузкой;
- распределение функций управления между оператором, находящимся на внешнем пункте управления (воздушном или наземном), и бор-

- товой системой автоматического управления беспилотных летательных аппаратов;
- совершенствование бортовых средств обработки информации и создание необходимых средств обмена информацией;
 - автоматическое распознавание целей и полная автоматизация процессов управления режимами полета беспилотного летательного аппарата (взлета, полета к цели и посадки, в том числе в случае потери связи с пунктом управления);
 - освоение новых частотных диапазонов радиосвязи;
 - создание современных многоканальных систем автоматического управления полетом беспилотных летательных аппаратов, в том числе на базе вертолетов и воздухоплавательных комплексов (аэростатов и дирижаблей);
 - придание боевым беспилотным летательным аппаратам свойств, позволяющих учитывать изменения в окружающей обстановке при выполнении полетного задания в автоматическом режиме;
 - отработка программ навигационного обеспечения боевых беспилотных летательных аппаратов, которые позволят им выполнять полеты в составе группы, выбирать альтернативные маршруты и осуществлять взаимодействие друг с другом;
 - решение проблемы электромагнитной совместимости бортового радиоэлектронного оборудования;
 - создание источников электропитания, обеспечивающих максимальное время функционирования беспилотных летательных аппаратов при минимальных малогабаритных характеристиках.
- Большой интерес представляют исследования и разработки в области систем управления для пилотируемой авиации, в том числе по созданию:
- ✓ технологий обеспечения высокоточной автоматической стабилизации летательных аппаратов на траектории полета для радикального снижения погрешностей прицеливания;
 - ✓ унифицированного пилотажно-навигационного комплекса для пилотируемых самолетов и вертолетов, обеспечивающих пилотирование и программный полет по заданной траектории на предельно малых высотах (5...15 м) ночью и в сложных метеоусловиях с автоматическим обнаружением препятствий, огибанием рельефа местности и автоматической посадкой на заданную площадку приземления;
 - ✓ "интеллектуальной" кабины для перспективных пилотируемых вертолетных комплексов;
 - ✓ малогабаритной унифицированной системы автоматического управления со 100 %-ным автопилотом для различных типов беспилотных вертолетов;
 - ✓ роботизированной бортовой системы предупреждения и блокирования ошибочных действий

- летчика на всех режимах полета самолетов и вертолетов;
- ✓ бортовой системы автоматического определения взлетной массы летательного аппарата на оперативных площадках приземления для обеспечения безопасности взлета вертолетов и других летательных аппаратов;
 - ✓ интегрированных интеллектуальных бортовых комплексов навигации, управления и боевого применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами;
 - ✓ высокоэффективных авиационных обзорно-прицельных наשלемных систем.

К основным проблемам создания необитаемых подводных аппаратов относятся создание средств энергообеспечения, навигации и связи для продолжительного периода функционирования и на значительном удалении от командного пункта при условии управления аппаратом в режиме времени, близком к реальному.

Заключение

Перечисленные выше проблемы создания систем управления и обработки информации детально рассмотрены в ходе работы конференции.

По результатам конференции принято решение обеспечить межведомственную координацию работ в области создания систем управления и обработки информации в рамках федеральных целевых и ведомственных комплексных программ, в том числе:

- ФЦП "Национальная технологическая база на 2007—2011 годы";
- ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники";
- ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007—2012 годы";
- ФЦП "Развитие гражданской авиационной техники России на периоды 2002—2010 годы и на период до 2015 года" и других программ.

В рамках конференции рассмотрены вопросы формирования межведомственного координационного Совета по системам управления и обработки информации.

Создание такого координационного органа, на наш взгляд, будет способствовать межведомственной координации работ в этой предметной области.

В заключение хотелось бы выразить уверенность, что проведение конференции способствует развитию отечественной науки, успешному решению задач реализации федеральных и ведомственных программ, расширению и укреплению связей между организациями и предприятиями Минобороны России, МВД России, МЧС России, ФСБ РФ, Минпромэнерго России, Минобрнауки России и Российской академии наук.

УДК 004.89:62-5:621.865.8

И. М. Макаров, акад. РАН,

В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф.,

С. В. Манько, д-р техн. наук, проф.,

М. П. Романов, д-р техн. наук, проф.,

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

Интеллектуальные системы управления автономными мобильными объектами

Обсуждаются основные особенности бортовых интеллектуальных систем управления автономными мобильными объектами. Акцентируется внимание на современных интеллектуальных технологиях управления, предназначенных для борьбы с факторами неопределенности, действующими на среду обитания управляемого объекта. Приводятся результаты в данной области, полученные на кафедре "Проблемы управления" МИРЭА (ТУ).

В последние годы явно возрастает интерес к автономным мобильным роботам. Связано это, в первую очередь, с пересмотром в ряде стран концепции ведения боевых действий, когда одним из важнейших условий благоприятного проведения операции становится сохранение человеческих ресурсов, но и, кроме того, — с необходимостью проведения антитеррористических мероприятий и выполнения различных работ в зонах чрезвычайных ситуаций, где присутствие человека нежелательно или недопустимо. Именно поэтому созданию средств автоматизации вооружения и военной техники и, в частности, боевой робототехники уделяют в мире очень большое внимание. Анализ зарубежных разработок, некоторые образцы которых приведены на рис. 1, показывает, что:

- активно ведутся работы по созданию автономных роботов воздушного, наземного и подводного базирования в широком спектре габаритных размеров;
- в последние годы активизированы работы по мини- и микрообразцам робототехники;
- при создании автономных объектов все более активно применяются интеллектуальные технологии; все чаще разработчики используют термин "интеллектуальные роботы".

Для того чтобы правильно оценить состояние дел и перспективы развития автономной робототехники

как в России, так и за рубежом, рассмотрим основные особенности интеллектуальных систем автоматического управления (ИСАУ).

Известно, что интеллектуальные технологии предназначены для борьбы с факторами неопределенности, действующими на систему [1] (табл. 1). Они имеют вполне реальный физический смысл и могут возникать в исполнительных подсистемах, при управлении движением, при планировании поведения, при обработке разнородной, а иногда и противоречивой информации. Если на исполнительном уровне часть проблем можно решить за счет применения адаптивных методов управления [2], то на остальных уровнях альтернативы интеллектуальным технологиям нет. Автономность и интеллектуальность становятся синонимами.

Бортовой системе управления мобильного объекта на фоне действия указанных факторов неопределенности приходится решать следующие ключевые задачи:

- постановка и корректировка цели управления;
- формирование и корректировка программы действий;
- формирование алгоритма управления (структурная и/или параметрическая настройка регулятора).

Достаточно очевидно, что указанные задачи могут быть решены только за счет привлечения интеллектуальных технологий. При этом ИСАУ необходимо строить, используя следующие базовые положения [3]:

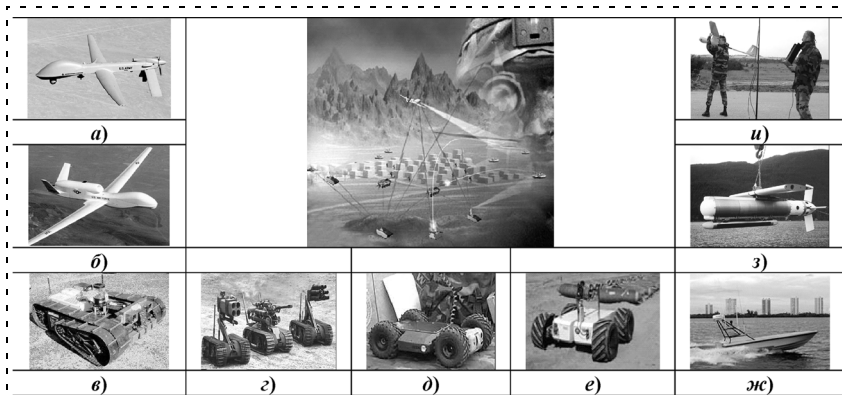


Рис. 1. Примеры зарубежных образцов средств боевой робототехники:

a — всепогодный разведывательно-ударный беспилотный летательный аппарат RQ-1 Predator (General Atomics Aeronautical Systems, USA); б — высотный беспилотный летательный аппарат оперативно-тактической разведки RQ-4A Global Hawk (Teledyne Ryan Aeronautical Co., USA); в — автономный мобильный робот наблюдения, целеуказания и разведки Urban II (Jet Propulsion Laboratory, USA); г — дистанционно управляемый мини-робот ударного назначения Talon (Foster-Miller Inc., USA) в различных модификациях; д — дистанционно управляемый мобильный мини-робот наблюдения и разведки для спецподразделений морской пехоты США Dragon Runner (Marine Corps Warfighting Lab, USA); е — мобильный мини-робот семейства RATLER (Sandia National Laboratories, USA) для контроля операций со взрывными устройствами; ж — Ghost Guard (MRV International, LLC, USA) — экспериментальный прототип безэкипажного надводного скоростного судна береговой охраны; з — подводный аппарат наблюдения и разведки Aurora (International Submarine Engineering Ltd, Canada); и — малогабаритный беспилотный летательный аппарат разведывательного назначения Pointer (Aero Vironment Inc., USA)

Таблица 1

Примеры факторов неопределенности, действующих на систему

Виды подсистем	Формы проявления неопределенностей	Источники неопределенностей	Примеры возникновения неопределенностей
Исполнительные	Изменение коэффициентов и вида дифференциальных уравнений, описывающих функционирование исполнительных элементов с нагрузкой	Изменение кинематических связей манипулятора; взаимное влияние степеней подвижности; температурные изменения коэффициента вязкого трения и т. п.	Изменение моментов инерции при изменении конфигурации манипуляционного робота
	Изменение характера нелинейных преобразований в канале управления исполнительными механизмами	Несоответствие динамических характеристик силовых ключей и диодов защиты требуемому частотному диапазону; ограничения, связанные с изменением уровня питающего напряжения; изменение коэффициентов сухого трения, величины люфтов и зазоров передаточных элементов приводов	Увеличение токов утечки диодов защиты силовых транзисторов, связанное с их частотными характеристиками, температурными изменениями и старением
	Возмущения, приведенные к валу исполнительного двигателя	Изменение моментов нагрузки и трения; взаимное влияние степеней подвижности и т. п.	Изменение массы транспортного робота из-за расхода топлива в процессе движения
	Возмущения, приведенные ко входу исполнительного двигателя	Изменение питающего напряжения, изменение сопротивления управляющих ключей (частотные, температурные, временные); частотные изменения динамического коэффициента передачи и т. п.	Изменение сопротивления ключей, связанное с их перегревом; скачки питающего напряжения, связанные с изменением нагрузки в цепи
Управление движением	Отсутствие априорной информации о выполнимости требуемых маневров с учетом динамических характеристик объекта управления и реальных условий его функционирования	Отсутствие опыта выполнения аналогичных маневров	Движение мобильного робота с различной нагрузкой по заданной криволинейной траектории
	Отсутствие или неполнота априорной информации об особенностях среды функционирования и характере ее изменения	Изменение среды функционирования; невозможность измерения (по каким-либо причинам) всех необходимых составляющих изменений среды	Планирование перемещений в среде с подвижными препятствиями
	Многообразие альтернативных вариантов реализации движений	Отсутствие жесткозаданных критериев функционирования; отсутствие опыта выполнения аналогичных маневров	Возможность обхода препятствия по различным траекториям
Планирования поведения	Невозможность формирования планов достижения поставленной цели ввиду общности ее описания	Недостаточная конкретизация постановки цели (требующая уточнения)	Общность целеуказания «Собери пирамиду», в котором не конкретизированы координаты места сборки, вид и число комплектующих элементов и т. д.
	Невозможность формирования планов достижения поставленной цели ввиду априорной неизвестности физических параметров среды и ее объектов	Априорная неизвестность физических параметров внешней среды и ее объектов	Отсутствие априорных данных о физических свойствах объектов (массе, прочности и т. д.), обнаруживаемых роботом-планетоходом при разведке
	Невозможность формирования планов достижения поставленной цели ввиду априорной неизвестности действующих в среде закономерностей	Априорная неизвестность действующих в среде закономерностей	Отсутствие априорных данных о фактических причинно-следственных связях, проявляемых при разборе неопознанных объектов, обезвреживании взрывных устройств и т. д.
	Невозможность формирования планов достижения поставленной цели ввиду отсутствия достоверной информации о требуемых ресурсах	Отсутствие достоверной информации о требуемых ресурсах	Отсутствие достоверных данных о фактическом расходе топлива беспилотного летательного аппарата, совершающего полет в условиях незапланированной погодной обстановки
	Многообразие альтернативных вариантов реализации поставленной цели	Неоднозначность решения задачи по достижению поставленной цели; слишком общий критерий функционирования	Возможность достижения поставленной цели на основе различных сценариев поведения при сборке пирамиды из набора кубиков

Виды подсистем	Формы проявления неопределенностей	Источники неопределенностей	Примеры возникновения неопределенностей
Информационно-измерительные	Дискретный характер информационного сигнала (как по амплитуде, так и по времени)	Низкая разрядность цифровых датчиков; низкая скорость обработки информации	Управление автономными мобильными роботами, беспилотными летательными аппаратами и другими подвижными объектами по информации от GPS (с частотой опроса 1 Гц)
	Недостаточная точность датчиков информационно-измерительной подсистемы	Большие погрешности (конструктивные и методические) и низкая разрешающая способность датчиков	Управление автономными мобильными роботами, беспилотными летательными аппаратами и другими подвижными объектами по информации от GPS (с точностью определения координат на плане $\pm 3...5$ м, по высоте ± 20 м)
	Климатическая и временная нестабильность выходного сигнала датчиков (дрейфы и уходы)	Конструктивные особенности построения датчиков	Вычисление навигационной информации на основе показаний малогабаритных полупроводниковых приборов со значениями временных уходов до нескольких десятков километров, накапливаемыми за час
	Противоречивость показаний датчиков	Различные точности, дрейфы и частоты опроса	Различие показаний GPS и инерциальной навигационной системы

- ♦ принцип ситуационного управления;
- ♦ иерархический принцип построения, предполагающий наличие в общем случае исполнительного, тактического и стратегического уровней управления и информационно-измерительной подсистемы;
- ♦ интеграция различных интеллектуальных технологий (экспертных систем, нейросетевых структур, нечеткой логики и ассоциативной памяти) при реализации управления на различных уровнях иерархии;
- ♦ адекватность степени интеллектуальности системы влиянию факторов неопределенности.

Что касается первых трех принципов, то они достаточно хорошо обсуждались в литературе [1–3]. Большинство разработчиков понимают, что для решения задачи управления на базе технологий обработки знаний альтернативы методу ситуационного управления нет, и что комбинация интеллектуальных технологий определяется техническими требованиями к ИСАУ на соответствующем уровне иерархии управления.

Необходимо более подробно рассмотреть и обосновать четвертый принцип [4], который имеет далеко не только научно-методическое или терминологическое значение, а и важное практическое значение, поскольку позволяет заказчику и разработчику одинаково трактовать ту или иную систему, ее функциональные возможности, а, соответственно, определять сроки и стоимость разработки. Схема, приведенная на рис. 2, соответствует тем ключевым задачам, которые перечислены выше, и показывает адекватность степени интеллекту-

альности бортовой системы управления действующим на нее факторам неопределенности.

Если факторы неопределенности таковы, что их можно устранить подстройкой регулятора (алгоритма) и сделать это за счет интеллектуального контура, включающего базу знаний и механизм логического выбора, то эту систему следует называть *интеллектуальной в малом*.

Если требуется изменить программу действий и, соответственно, подключить блок самообучения (и прогноз), то это будет система, *интеллектуальная в большом*.

Если система сама способна корректировать цель управления (активно работают блоки прогноза и самообучения), то эта система называется *интеллектуальной в целом*.

Естественно, что предложенная выше терминология будет уточняться со временем по мере акти-

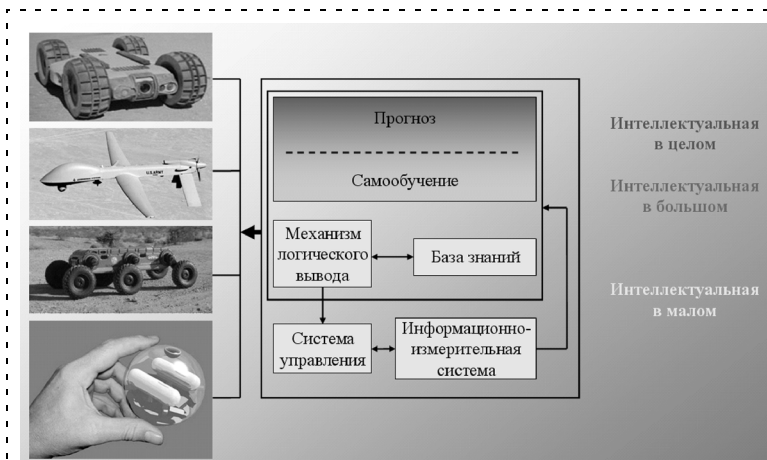


Рис. 2. Адекватность степени интеллектуальности бортовой системы управления факторам неопределенности



Рис. 3. Классификация задач по уровням иерархии интеллектуального управления

визации работ в области самообучения и прогнозирования, однако и сейчас введение ее важно как для заказчиков новой техники, так и для разработчиков.

Развитие технологии обработки знаний для решения задач управления требует более детальной классификации задач по уровням иерархии интеллектуального управления. Такая классификация обобщена на рис. 3.

Особо следует отметить, что к задачам стратегического уровня в последнее время все более часто и вполне обоснованно относят планирование группового взаимодействия автономных объектов и организацию человеко-машинного интерфейса.

Возникает естественный вопрос: существует ли теоретическая и аппаратная база решения поставленных задач при создании новых систем управления. Ответ может быть только однозначным и утвердительным.

В настоящее время исследования в этой области проводят ИПМ им. М. В. Келдыша, Институт механики МГУ, ЮФУ, МГТУ им. Н. Э. Баумана, МАИ, МЭИ и многие другие.

Основные теоретические результаты, полученные на кафедре "Проблемы управления" МИРЭА (ТУ), приведены в табл. 2.

Важно подчеркнуть, что эти результаты не только проверены на различного рода моделях, но и использованы при создании конкретных образцов мобильных объектов (беспилотного летательного аппарата, подводного мини-аппарата, мобильного наземного робота на колесном и гусеничном шасси и др.).

Таблица 2

Теоретические заделы для создания интеллектуальных систем управления автономными мобильными объектами

Уровни иерархии интеллектуального управления	Методы и алгоритмы
Стратегический уровень	<ul style="list-style-type: none"> • Алгоритмы планирования поведения на основе анализа фреймообразных сценариев • Алгоритмы обобщения накопленного опыта на основе индуктивной логики Милля • Алгоритмы автоматической настройки и самообучения на основе методов эволюционного программирования и вероятностных моделей
Тактический уровень	<ul style="list-style-type: none"> • Алгоритмы планирования перемещений, инвариантные к кинематической схеме объекта • Алгоритмы обхода препятствий • Алгоритмы динамической развязки многозвенных механизмов на основе технологии ассоциативной памяти
Исполнительный уровень	<ul style="list-style-type: none"> • Принципы построения и программно-алгоритмическое обеспечение системы управления приводами на основе технологий: нечеткой логики, нейронных сетей, ассоциативной памяти, обеспечивающие: <ul style="list-style-type: none"> ■ высокую точность; ■ оптимальное быстродействие; ■ требуемые принципы функционирования; ■ экономию энергопотребления
Информационно-измерительный уровень	<ul style="list-style-type: none"> • Алгоритмы сбора, обработки разнородной противоречивой неполной информации на основе технологии нечеткой логики • Алгоритмы распознавания образов на основе нейронных сетей • Алгоритмы распознавания образов на основе комплексного применения нечеткой логики и рядов Уолша • Алгоритмы диагностики объекта на основе технологии экспертных систем • Алгоритмы параметрической и функциональной идентификации на основе нейронных сетей
Человеко-машинный интерфейс	<ul style="list-style-type: none"> • Алгоритмы смысловой интерпретации фраз естественного языка на основе технологии фреймообразных структур
Планирование группового взаимодействия	<ul style="list-style-type: none"> • Алгоритмы обработки сценариев поведения • Алгоритмы целераспределения

На рис. 4 в качестве примера представлен фрагмент работы естественно-языкового человеко-машинного интерфейса с интеллектуальной системой управления автономного мобильного робота, иллюстрирующий выполнение команды по обнаружению посторонних предметов.

Общие характеристики бортовой унифицированной системы управления приведены на рис. 5. В зависимости от конкретных технических требований может использоваться как отечественная, так и зарубежная элементная база. Важно подчеркнуть, что на фоне основательной теоретической базы аппаратная база не является препятствием на пути создания ИСАУ для автономных объектов.

Вместе с тем необходимо отметить некоторые сложности, связанные с созданием интеллектуальных систем управления для автономных мини- и микрообъектов:

- несмотря на то, что начался выпуск отдельных навигационных датчиков, существует острая необходимость в создании комплексной бесплатформенной малогабаритной навигационной системы, обеспечивающей измерение углов ориентации, определение геомагнитного курса, скорости и пройденного пути с высокой точностью;
- отсутствуют малогабаритные бортовые устройства, обеспечивающие полный цикл обработки видеoinформации, необходимый не только для передачи ее оператору, но и для организации контура обратной связи в системе управления. По существу требуется гамма интеллектуальных видеокамер, способных поддерживать функцио-

нальные требования, предъявляемые к интеллектуальным (в большом или в целом) системам управления автономными объектами;

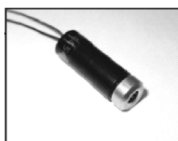
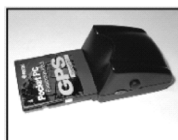
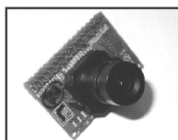
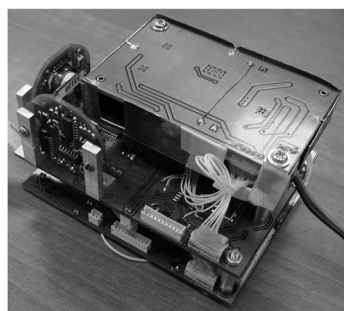
- учитывая общую тенденцию создания цифровых бортовых систем, имеющих очевидные преимущества перед аналоговыми, необходимо создание датчиков с цифровым выходом и исполнительных устройств с цифровым выходом. Поскольку интеллектуальные системы управления автономными мобильными робототехническими средствами требуют комплексного разнородного информационного обеспечения и предполагают организацию управляющих воздействий в соответствии с обоснованной иерархией управления, то в качестве унифицированной базы для передачи цифровых информационных и управляющих сигналов может рассматриваться такая перспективная технология, как CAN, позволяющая обрабатывать до 250 датчиков и исполнительных устройств и эффективно применяемая как у нас в стране, так и за рубежом. Такая концепция построения архитектуры интеллектуальной бортовой системы обеспечит реализацию единого унифицированного подхода к созданию бортовых систем для широкого спектра мобильных объектов. Открытым по существу остается вопрос о создании гаммы цифровых преобразователей, интегрированных в едином корпусе с датчиками и исполнительными устройствами.

Понимая возможность, реальность и перспективы создания ИСАУ, необходимо предусматривать развитие средств инструментальной поддержки процессов их автоматизированного проектирования. Хотя примеры таких решений применительно к созданию интеллектуальных регуляторов для приводов, для управления движением мобильных роботов, для проектирования нейрорегуляторов на ПЛИС уже имеются [3], работы в данном направлении должны быть существенно активизированы.

Создание автономных объектов, способных функционировать в широком спектре изменения внешних условий, требует разработки новых подходов к построению тренажерных и испытательных систем. Например, испытания беспилотной техники бесперспективны без создания специальных стендов, построенных с применением технологий виртуальной реальности, в которую может "погружаться" объект. Такой подход позволяет изменять условия полета, обеспечивая режимы, максимально приближенные к



Рис. 4. Пример человеко-машинного диалога с использованием средств естественно-языкового интерфейса



Основные технические характеристики универсальной бортовой системы управления автономными мобильными объектами

- Малые массогабаритные параметры (100 x 35 x 50 мм; 150 г)
- Малое энергопотребление (0,2 ... 0,3 А в зависимости от режима работы – «спящего» или «активного»), позволяющее обеспечить высокую продолжительность автономной работы (до 2 ... 3 ч даже при использовании аккумуляторных батарей емкостью 1 А·ч)
- Высокая технологичность изготовления на основе комплектации современной элементной базы, имеющей отечественные аналоги
- Высокие функциональные возможности электронно-вычислительного блока (тактовая частота 150МГц, 512Кбайт асинхронной статической оперативной памяти с низким временем доступа) на базе трех цифровых сигнальных процессоров TMS320F2812, обеспечивающих соответственно решение задач обработки разнородных сенсорных данных и построения единого информационного пространства, принятие решений и формирование законов управления, а также их последующую реализацию на уровне исполнительных устройств
- Инвариантность к числу и типам подключаемых исполнительных и информационных элементов, обеспечиваемая за счет трех разновидностей последовательных интерфейсов, включая CAN, UART, USRT
- Наличие специализированной подсистемы векторизации и предобработки видеоизображений (на базе отдельного процессора)
- Высокая надежность, обеспечиваемая возможностями оперативного перераспределения функций отдельных микропроцессоров в составе объединенного электронно-вычислительного блока.

только предприятия различных ведомств, но и многие вузы, а также институты РАН. Следующим организационным шагом, который обеспечивает сокращение сроков и повышение эффективности этих работ, должна стать координация взаимодействия реальных и потенциальных исполнителей. Очевидно также, что вопросы как проектирования, так и применения автономных мобильных объектов необходимо рассматривать с позиции двойных технологий, понимая, например, что беспилотная техника имеет значение для обследования нефте- и газопроводов, картографирования, экологического мониторинга и т. д. Сложно найти альтернативу мобильным роботам для решения задач по обследованию различных трубопроводов при проведении инспекций и ремонте систем тепло- и водообеспечения и т. д. Уже сейчас можно квалифицированно обосновать применение мобильных роботов в различных прикладных задачах. Однако очевидно, что еще больше конкретных сфер практического применения будут очерчены по мере разработки и внедрения автономных мобильных роботов. Важно также, что по мере освоения техники потенциальные заказчики все более обоснованно будут формулировать требования к степени интеллектуальности бортовой системы управления, взвешивая стоимость разработки и комплекс функциональных задач, возлагаемых на автономную робототехнику.

Рис. 5. Унифицированная бортовая система управления автономными мобильными объектами и ее основные технические характеристики

реальным, исследовать поведение беспилотного летательного аппарата на специальном мониторе, а также изучать и документировать реакцию системы управления в процессе полета за счет применения специальных программных средств.

Учитывая собственное понимание проблемы, а также анализируя зарубежный опыт, можно однозначно утверждать, что создание автономных мобильных роботов, оснащенных интеллектуальными системами управления, является исключительно важной перспективной государственной задачей. Именно поэтому к ее решению привлечены не

Список литературы

1. **Автоматизация** синтеза и обучение интеллектуальных систем / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Наука, 2007.
2. **Интеллектуальные** системы автоматического управления / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001, 576 с.
3. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Создание интеллектуальных систем автоматизации и управления на основе современных информационных технологий // Мехатроника, автоматизация и управление. № 4. 2007. С. 13–20.
4. **Захаров В. Н., Лохин В. М.** Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения. Интеллектуальные системы управления автоматического управления / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001. С. 25–39.

УДК 623.74

В. Б. Соколов, канд. техн. наук,
Е. Д. Теряев, член-корр. РАН,
Институт машиноведения
им. А. А. Благонравова РАН, Москва

Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам публикаций в Интернете)

По материалам публикаций в Интернете дается обзор современного состояния развития и применения беспилотных летательных аппаратов. Акцентируется внимание на анализе вопросов контроля их распространения как потенциально скрытого и опасного оружия, создания средств защиты от возможного применения страной-противником, введения механизмов государственного регулирования при использовании в гражданской сфере.

Введение

В средствах массовой информации и специальной литературе активно пропагандируется идея развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как одного из наиболее перспективных направлений авиации. Развитие современной техники, а также систем управления, сбора и обработки информации, искусственного интеллекта, новые возможности энергообеспечения открывают реальные перспективы решения широкого круга задач, в том числе и тех, которые решаются обычными пилотируемыми самолетами, путем применения БПЛА (или подвижных летательных роботов). Важно и другое, что БПЛА могут решать задачи, которые не под силу пилотируемой авиации, например, задачи ближней разведки в городских условиях или мониторинга больших территорий на дальних расстояниях от базы.

Главные достоинства беспилотных летательных аппаратов — это их относительно низкая цена, малый вес, неограниченные возможности уменьшения габаритных размеров, возможность дистанционного управления аппаратом на значительных расстояниях.

Опыт вооруженных конфликтов показал, что в скоротечной обстановке боя БПЛА могут более эффективно, чем пилотируемые самолеты, решать задачи ведения стратегической и тактической воздушной разведки, осуществлять корректировку огня без риска для летного состава (см. ниже справку). В интересах сухопутных войск БПЛА разведывали маршруты полетов боевых вертолетов, в интересах флота — искали мины и корректировали огонь артиллерии линкоров, в интересах спецназа

ВМФ — определяли позиции береговых ракетных комплексов и выполняли другие задания, в том числе поражали цели. Операции с использованием БПЛА проводились в интересах всех звеньев армейского управления от командира роты, бригады до самого высшего командования.

Заинтересованность руководства многих стран Запада в разработке и приобретении БПЛА постоянно возрастает. С каждым годом суммарный объем мирового рынка беспилотной авиации увеличивается почти в геометрической прогрессии.

Многие эксперты убеждены, что в будущих военных конфликтах будет преобладать беспилотная авиация¹. По оценкам исследовательской организации Forecast International, на протяжении предстоящего десятилетия объем мирового рынка БПЛА достигнет 10,6 млрд долл. Согласно прогнозу, главным покупателем подобной техники станет Пентагон, который затратит за десятилетие на эти цели 4,5 млрд долл. Американские компании будут контролировать примерно половину мирового рынка². Более значительные цифры³ приведены в прогнозе компании "Фрост энд Салливан". По мнению ее экспертов, объем рынка БПЛА только в США достигнет 17 млрд долл. к 2011 г.

Активизировались и европейские работы над БПЛА. Они проходят в рамках как национальных проектов, так и требований, определенных "Проектной группой 35" НАТО в 1996 г. Ряд программ стал международным, например, франко-германские разведывательно-ударные "Бревел" и "Барракуда", высотный БПЛА "Фрегат"⁴. В целом объем европейского рынка беспилотных машин на период 2003—2012 гг. составит 5,5 млрд. евро⁵.

В России в девяностых годах произошел спад в области создания и использования БПЛА: прекратилось государственное финансирование разработок, перестали работать программы их создания и развития, исчезли заказчики БПЛА, в том числе в российской армии. В настоящее время приняты решения на государственном уровне, позволяющие устранить отставание России в этом важном научно-техническом направлении.

В процессе создания и применения БПЛА можно выделить несколько этапов. Первый этап связан с разработкой отдельных БПЛА, второй — с созданием комплекса из нескольких независимо

¹ От "Крошки-шпиона" до ударного "Стойкого". <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/14/116045.html>

² Беспилотные самолеты захватывают небо. http://www.day.az/print_view.php?id = 1588

³ Объем рынка беспилотных летательных аппаратов в США достигнет 17 млрд долларов к 2011 году (armstass.su/?page = article&aid = 24745&cid = 24)

⁴ В небо без пилота. http://www.vokrugsveta.ru/vs/?article_id = 2994

⁵ PC WEEK/RE № 6, 20 января 2004 г. <http://www.pcweek.ru>

действующих БПЛА, третий — с созданием комплексов или группировок взаимодействующих друг с другом БПЛА, ориентированных на единую цель, четвертый — с созданием из БПЛА различных комплексов, которые встраиваются в любые более сложные функциональные системы, например в сетцентрические системы управления, и могут достигать разных целей. В последнем случае создаются принципиально новые системы, которые в данном обзоре названы БПЛА-системами или БПЛА-технологиями.

Справка

Особую роль в этом направлении развития авиации играли военные задачи.

Первыми серийными дистанционно-пилотируемыми аппаратами стали в 1930-е годы самолеты-мишени.

Разведывательные БПЛА в СССР появились в конце 50-х—начале 60-х гг. Это беспилотники Ла-17Р, созданные на основе воздушной мишени, и Ту-123 (комплекс дальней фото- и радиоразведки ДБР-1 "Ястреб") на основе крылатой ракеты. В конце 1970-х гг. появился комплекс "Стриж" с реактивным аппаратом Ту-141, а в 1982 г. — комплекс тактической разведки ВР-3 "Рейс" с аппаратом Ту-143. Ту-143, построенный в количестве 950 штук, стал в свое время самым массовым БПЛА.

Практически в те же годы начались работы по созданию БПЛА в странах НАТО. Активную роль в развитии БПЛА начал играть Израиль, начиная с создания аппаратов "Мастифф" и "Скаут" в 70-х гг.

БПЛА использовались во всех военных конфликтах. Американцы в небе над Северным Вьетнамом применяли модификации БПЛА АQM-34, созданного на базе реактивной воздушной мишени "Файербил".

Во время войны в Югославии в небе над театром военных действий работали БПЛА разных стран НАТО. ЦРУ США в 1994 г. использовало здесь два аппарата GNAT-750 ("Тэйер-1"). В 1995 г. над Боснией летали американские "Пайонир" и "Предэйтор" и французские "Кресерель". В ходе натовской агрессии 1999 г. кроме указанных аппаратов американцы задействовали "Хантер", англичане — "Феникс", французы и немцы — CL-289.

В ходе операции "Буря в пустыне" в 1991 г. американцы задействовали БПЛА "Пайонир" израильской разработки, американско-израильский "Хантер" (оснастив его аппаратурой ночного видения), свои "Эксдрон", "Пойнтер", французы — MART, британцы — канадские CL-89. Одни только "Пайонир", как сообщали, налетали в ходе операций "Щит пустыни" и "Буря в пустыне" 1011 часов.

С 2001 г. в Афганистане и Ираке американцы использовали около 20 серийных аппаратов и опытных моделей — микроБПЛА "Рэйвен" и "Дрэгон Ай", мини-

БЛА "Пайонир", "Шэдоу-200", средний "Хантер", тяжелые "Предэйтор" и "Глобал Хок". К 2005 г. они налетали более 100 тысяч часов. Канадцы применяли "Спэрвэ" французского производства, британцы — "Феникс", австралийцы — "Аэрозонд". О расширении применения можно судить по тому, что в 2003 г. в Ираке американцы применили 249 БЛА, а в 2005 г. в Афганистане и Ираке действовало 574 аппарата, а ежемесячный налет достигал 9000 часов. По некоторым данным в Ираке и Афганистане действуют около 800 беспилотных летательных аппаратов⁶.

Задачи, решаемые БПЛА

Рост потребности в БПЛА в разных странах вполне закономерен. Практический опыт применения БПЛА ведущими странами выявил широкий набор военных и гражданских задач, при решении которых беспилотники показывают высокую эффективность.

В военной сфере в число таких задач входят:

- наблюдение, разведка, рекогносцировка (фото- и видеосъемка в режиме реального времени с возможностью анализа непосредственно в ходе полета, биологическая, химическая и ядерная разведка, розыск установленных мин);
- ретрансляция связи (в том числе в городских условиях);
- подавление средств связи противника;
- проведение поисково-спасательных работ;
- передача информации о результатах применения управляемых боеприпасов и корректировка огня;
- наведение огня артиллерии и ракет;
- отвлечение огня ПВО;
- нанесение ударов по выделенным (в том числе точечным) целям путем использования собственного бортового оружия;
- контроль запуска ракет с сопредельных территорий;
- использование в качестве мишеней при отработке систем оружия.

В гражданской сфере может осуществляться контроль:

- лесных массивов (наличие локальных возгораний, определение границ зон пожаров);
- вулканов во время извержения;
- сельхозугодий (оценка степени зрелости сельскохозяйственных культур, хода уборки урожая);
- поголовья рогатого скота, морского зверя;
- миграции зверя в охотничьих хозяйствах;
- движения автотранспорта, а также состояния дорог, автомобильных пробок с выявлением нарушителей правил дорожного движения;

⁶ Оружие: Пентагон создает Единый центр беспилотных летательных. www.lenta.ru/news/2005/07/20/bpla/

- состояния железнодорожных путей, подвижного железнодорожного состава;
- ледовой обстановки, судоходства в сложных погодных условиях;
- состояния нефти и газопроводов и линий электропередач.

БПЛА могут также содействовать реализации таких функций, как:

- охрана объектов собственности, в том числе земельных участков, домов и коттеджных поселков;
- профилактика уличных преступлений, оперативный поиск преступников;
- помощь в освобождении заложников;
- проведение геодезических работ при прокладке дорог, тоннелей, планировании городской застройки;
- проведение панорамных съемок;
- экологический мониторинг (взятие проб воздуха, газовоздушной смеси, воды (любой жидкой среды), грунта);
- выявление последствий стихийных бедствий;
- дистанционное наблюдение Земли;
- охрана морского шельфа;
- поиск людей, терпящих бедствие;
- охрана государственных границ.

Каждая из перечисленных задач имеет свою специфику. Создать БПЛА универсального назначения, который мог бы эффективно решать любую из них, вряд ли возможно. Поэтому появились различные классы БПЛА и внутри них — многочисленные беспилотники с разными функциями.

Нетрудно заметить, что задачи в военной и гражданской сфере с функциональной точки зрения могут частично пересекаться, что позволяет создавать аппараты двойного назначения.

Основные классы БПЛА

Существуют многочисленные классификации БПЛА. Приведем одну из них.

- **БПЛА стратегического назначения.** Они создаются на базе крупных самолетов, аналогичных пилотируемым самолетам. Примером могут быть израильский беспилотник "Эйтан"⁷ (размах крыльев которого достигает 26 м, а масса составляет 4 т), или американский беспилотник Global Hawk⁸ (размах крыльев — около 35,5 м). Сюда же можно отнести летающий танк США, BattleHog 350x (длина BattleHog 350x составляет 12 м; размах крыльев — 12 м; высота — 1,5 м; сухая масса — 6800 кг; максимальная взлетная — 16 800 кг; полезная нагрузка — 4500 кг; потолок —

⁷ Беспилотная авиация: израильский опыт. 07.03.07. BBC/pda.cnews.ru/army/airfors

⁸ PC WEEK/RE № 6, 24 февраля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>

около 20 тыс. м). Дальность действия таких самолетов — сотни и тысячи километров и может наращиваться за счет дозаправки в воздухе⁹.

- **Миниатюрные БПЛА тактического назначения.** Эти аппараты запускаются с платформы мобильного комплекса (например, российский беспилотник "Пчела"¹⁰, американский "Silver Fox"¹¹), или с руки (например, израильские беспилотники типа Skylark¹², запускаемые с руки и стоящие на вооружении разведки и тактического звена пехотных подразделений, и Seagull¹³ (размах крыла 2,14 м, а длина всего 0,8 м) или российские ДПЛА "БРАТ"¹⁴, "Пустельга"¹⁵, американский ДПЛА "Dragon Eye"¹⁶). Их масса составляет от единиц до десятков и сотен килограмм. Дальность действия различных тактических комплексов ДПЛА — от нескольких километров до сотен километров.

- **МикроБПЛА.** К этому классу относятся БПЛА с размером крыльев от 15 см и менее и массой десятки грамм, граммы и менее. Примером могут быть израильский миниатюрный разведывательный БПЛА "Крошка шпион"¹⁷ компании RAFAEL, который умещается на ладони, массой всего около 100 г, или микроБПЛА "Энтомоптер"¹⁸, создаваемый в Технологическом институте шт. Джорджия. В Калифорнийском технологическом институте разрабатывается микроБПЛА "Летучая мышь"¹⁹ массой всего 10 г. МикроБПЛА могут обладать скоростью порядка 60 км/ч и иметь радиус действия в пределах 10 км.

Стоимость БПЛА в существенной мере зависит от класса, к которому он относится. Стоимость БПЛА первого типа соизмерима со стоимостью боевого самолета. Сегодня на мировом рынке беспилотных самолетов лидируют фирмы General Atomics²⁰ с аппаратом Predator и Northrop Grumman²¹ с моделью Global Hawk. Обе машины используются вооруженными силами США для ве-

⁹ "Летающие танки для боев в городе: подробности". Наука, 16.10.06. pda.cnews.ru/reviews/index.shtml?2006/10/16

¹⁰ Н. В. Чистяков "Прошлое, настоящее и будущее тактических БЛА в России"

¹¹ Н. В. Чистяков. "Русский след "Серебряной лисицы". www.dpla.ru (2005)

¹² Беспилотная авиация: израильский опыт 2007/03/07. <http://pda.cnews.ru/reviews/index.shtml?2007/03/07/239319>

¹³ Там же

¹⁴ <http://www.dpla.ru/brat>

¹⁵ <http://microavia/narod/ru/projects/pustelga/index.htm>

¹⁶ Unmanned Aircraft Systems (UAS). <http://www.avinc.com/suav.php>

¹⁷ От "Крошки-шпиона" до ударного "Стойкого". <http://www.aviaport.ru/News/2007/02/14/116045.html>

¹⁸ В. А. Попов, Д. В. Федутин. Развитие направления миниатюрных беспилотных летательных аппаратов за рубежом ФГУП "ГосНИИАС". www.uav.ru/articles/mav_abord.pdf

¹⁹ <http://www.aviaport.ru/digest/2006/11/07/1122216.html>

²⁰ www.ga.com

²¹ www.northgrum.com

дения разведки и нанесения ракетных ударов. Стоимость одного такого летательного аппарата составляет около 10 млн долл²².

Мини-БПЛА стоят примерно 20...30 тыс. долл. Стоимость микроБПЛА при их массовом производстве оценивается в 10 долл. за единицу.

Наиболее распространенными в настоящее время являются БПЛА первого типа. За счет своей высокой стоимости они являются приоритетными для самолетостроительных корпораций, которым выгодно поставлять для армии дорогое оснащение. Вместе с тем, хотя мини-БПЛА только в США занимают более 150 фирм²³ до испытания и использования доходят лишь отдельные образцы.

Еще более сложная картина с микроБПЛА. Пока они находятся в основном на уровне НИОКР. Дешевая техника может быть экономически оправдана только в том случае, если она массовая. Можно предполагать, что мини- и микроБПЛА получат более широкое применение в будущем.

Путь от изолированных БПЛА к БПЛА-технологиям

По многочисленным данным, которые содержатся на сайтах, хроника развития событий в сфере разработки и применения БПЛА в США, имеющих статус лидера этого направления, чрезвычайно разнообразна.

Выделим ряд организационно-технических моментов, которые обусловили возможность перехода США от создания отдельных БПЛА к созданию на основе БПЛА более сложных систем, позволяющих собирать информацию в реальном масштабе времени об удаленных объектах, разбросанных на значительных расстояниях в пространстве, и осуществлять дистанционные массивованные воздействия на эти объекты.

- В течение многих лет активную позицию по созданию и применению БПЛА занимает Пентагон. Это главный спонсор, заказчик и пользователь БПЛА. Только в 2005 г. Пентагон израсходовал 2 млрд долл. на закупку и совершенствование беспилотных самолетов. Полмиллиарда долларов было затрачено на научные исследования в этой области²⁴. В течение 2004—2009 гг. Пентагон потратит на создание беспилотных самолетов 10 млрд долл. В настоящее время Пентагон закупает в год примерно 400 БПЛА 20 типов²⁵.

²² PC WEEK/RE № 3, 04 февраля 2003 г. <http://www.pcweek.ru>

²³ Н. В. Чистяков. Мнение по поводу решения ВПК об отмене в финансировании беспилотных авиационных комплексов. <http://dpla.ru.2006.06.15.htm>

²⁴ PC WEEK/RE № 6, 24 февраля 2004 г.

²⁵ НЕБО БУДУЩЕЙ ВОЙНЫ // Воздушно-космическая оборона. № 5 (24). 2005. www.vko.ru

- Министерство обороны США в 2003 г. приняло "План развития беспилотных авиационных систем на 2005—2030 годы", а в 2005 г. создало Объединенный центр для координации всех работ по БЛА²⁶.

- Активность Пентагона поддерживается Сенатом США, который дополнительно выделил значительные средства на научные проекты по беспилотным аппаратам, например Predator, Shadow, и программу Joint Unmanned Combat Air System (J-UCAS)²⁷.

(Программа J-UCAS предписывает создать систему, которая будет "эффективно выполнять боевые задачи XXI века, включая подавление системы ПВО, РЭБ, удары по точечным целям, разведку и наблюдение". Согласно целям программы, новые системы должны вписываться в существующие и перспективные сетевые структуры, в том числе в глобальную систему немедленного реагирования на угрозы.)

- Организован процесс разработки, совершенствования и постановки на вооружение БПЛА при участии организаций Министерства обороны и многочисленных частных компаний. Действует система конкурсов и контрактов. Регулярно проводятся испытания нового оборудования, систем навигации и управления, новых образцов БПЛА.
- Создаются и используются БПЛА всех трех классов. Это говорит о том, что создание беспилотников определяется не только экономическими соображениями коммерческой выгоды фирм военно-промышленного комплекса, но и возможными перспективами их применения в разных прикладных задачах, требующих различных качеств беспилотников.

(Среди крупных беспилотников можно назвать X-45A, B, C, X-46, X-47, Global Hawk, Ripper. Для продления срока пребывания в полете такого рода машин в США создана система автоматической дозаправки БПЛА в воздухе. К концу 2003 г. в армии США использовалось около 175 беспилотников дальнего радиуса действия.²⁸

По оценке отставного генерала Кена Израэля, вице-президента фирмы Lockheed Martin, в недалеком будущем должны появиться аппараты, способные двигаться со скоростью, в семь раз превышающей скорость звука, и кратковременно выходить в космос. Группы таких машин будут постоянно находиться на боевом дежурстве и смогут наносить удар по любой точке планеты через 90 минут после получения приказа²⁹.

Среди мини-БПЛА можно назвать Shadow, Dragon Eye, Eagle Eye (с вертикальным взлетом и посадкой

²⁶ В небо без пилота. http://www.vokrugsveta.ru/vs/?article_id=2994

²⁷ PC WEEK/RE № 19, 1 июня 2004 г.

²⁸ PC WEEK/RE № 18, 25 мая 2004 г.

²⁹ PC WEEK/RE № 23, 24 июня 2003 г.

на палубы кораблей), *ScanEagle* (способен находиться в воздухе 40 часов и передавать видеоизображение мобильному центру управления в масштабе реального времени), *Dominator* (способен находиться в воздухе 48 ч без дозаправки). МикроБПЛА пока еще находятся только в стадии активной разработки. Практически такие аппараты, по мнению экспертов, начнут использоваться с 2012 г. Берклийский университет по контракту с агентством DARPA создает разведывательные летающие роботы массой 100 мг и с размахом крыла 2 см³⁰. Такие роботы смогут объединяться в стаи из сотен тысяч объектов и будут выполнять разведывательные задачи. Появление коммерческой версии ожидается через 10 лет³¹. Предполагается, что их стоимость не превысит 10 долл. Другой проект связан с созданием мезикоптера, нового класса компактных летательных аппаратов, своими роторными двигателями напоминающих вертолет. Мезикоптер имеет 4 двигателя, установленных на одной плоскости по периметру аппарата, с отдельными роторами³². Его предполагают использовать для многих целей, в том числе в космических экспедициях, при изучении Марса.)

- Создаются не только беспилотные самолеты, но и вертолеты.

(Боевой беспилотный вертолет *UCAR*, способный воспринимать голосовые команды управления³³, или беспилотные вертолеты *TAG-M65* и *TAG-M80* модульной конструкции³⁴, беспилотный вертолет *RQ-8 "Файр скаут"* для ведения разведки и доставки грузов войскам в боевой обстановке и нанесения ударов по наземным объектам ракетами *Mk.66*³⁵, крупный беспилотный вертолет *Boeing A160T Hummingbird*³⁶.)

- Созданы технологии дистанционного управления БПЛА на больших расстояниях.

Применяемые в Афганистане и Ираке самолеты-роботы будут управляться на расстоянии почти 10 тыс. километров из специального компьютерного центра, находящегося в американском штате Невада. Оператор, использующий новейшую систему виртуального присутствия, имеет возможность через военный спутник связи руководить полетом самолета-робота и наносить удары.³⁷

- Крупные беспилотники, миниатюрные и микро-БПЛА оснащаются оружием.

(*MQ-9 Reaper* способен нести до 14 ракет *Hellfire* класса воздух-земля. В случае необходимости вместо ракет *MQ-9 Reaper* может нести две авиационные бомбы мощностью по 250 кг каждая. *MQ-9 Reaper* с

полной нагрузкой может непрерывно находиться в воздухе в течение 14 часов и имеет максимальную скорость 480 км/ч. Общая масса вооружений на борту — до полутора тонн. Самолет способен проводить крупные штурмовые операции, а не только отдельные удары по специальным целям³⁸. БПЛА *BattleHog 350x* фирмы *American Dynamics* имеет на вооружении авиабомбы *GBU-28*, авиабомбы с комплектом высокоточного наведения *JAM GBU-29*, *GBU-30*, *GBU-32*, *GBU-38*, ракеты *AIM-120*, автоматическую пушку калибра 20 мм. Беспилотный самолет *Hunter* компании *TRW* несет две управляемых бомбы³⁹. Беспилотный летательный аппарат "Предейтор-В" компании "Дженерал атомик" вооружен двумя управляемыми авиационными бомбами (УАБ) "Пейвэуэй-2" *GBU-12* массой 226 кг с лазерной системой наведения. Продолжительность барражирующего полета БЛА на высотах от 9 до 14 км достигает 32 ч. К концу текущего 10-летия ВВС США планируют иметь в своем составе парк из 60 БЛА "Предейтор-В" в качестве носителей управляемого авиационного оружия.⁴⁰ Беспилотный боевой самолет *Dominator* корпорации *Boeing*, массой 50 кг и с размахом крыльев 3,7 м может двигаться со скоростью 250 км/ч, неся при этом три противотанковые ракеты (модифицированные версии *Skeet*⁴¹). МикроБПЛА оснащаются взрывными устройствами, которые позволяют уничтожить локальные объекты, например компьютеры, без необходимости бомбить все здание.)

- Расширяется число пользователей, которым предоставляется возможность получать информацию от групп действующих БПЛА.

(Портативные пульты управления воздушной разведкой, *HURT (Heterogeneous Untapped Reconnaissance Team* — система управления разнородными разведывательными средствами), будут розданы командирам наземных подразделений и дадут возможность следить за полем боя сразу на трех уровнях⁴².)

- делается принципиально важный переход от рассмотрения отдельных БПЛА к рассмотрению их коллективных действий, направленных на достижение единой цели.

(Беспилотники *Dominator* должны действовать звеньями из трех-четырёх единиц, объединяясь при необходимости в группы из 24 аппаратов. Проведены испытания, при которых 40 машин одновременно успешно атаковали группу наземной техники. Специалисты компании *Boeing* надеются "научить" машины согласовывать свои действия и поражать мишени в

³⁰ PC WEEK/RE, 23 января 2001 г.

³¹ PC WEEK/RE № 44, 26 ноября 2002 г.

³² <http://adg.stanford.edu/mesicopter/>

³³ PC WEEK/RE № 24, 6 июля 2004 г.

³⁴ PC WEEK/RE № 26, 20 июля 2004 г.

³⁵ AVIA. RU, 09.11.2005

³⁶ MEMBRANA, 20.06.2007

³⁷ США приступают к развертыванию первых эскадрилий самолетов-роботов в Афганистане и Ираке: ИТАР-ТАСС, 17.07.2007

³⁸ Тяжелые беспилотные самолеты помогут США бороться с терроризмом РИА Новости, 29.07.2007. <http://news.mail.ru/incident/1390531/>

³⁹ PC WEEK/RE № 43, 19.11.2002 г.

⁴⁰ PC WEEK/RE № 35, 23.09.2003 г.

⁴¹ PC WEEK/RE № 6, 24 февраля 2004 г.

⁴² Американским военным раздают пульты управления воздушной разведкой. <http://www.lenta.ru/news/2007/05/15/northrop/>

порядке убывания их предпочтения и не нападать вдвоем на один и тот же объект.)

- Пентагон разрабатывает новые концепции проведения военных действий. Одним из передовых высокотехнологичных проектов является объединение беспилотных устройств, интеллектуальных датчиков и самоходных наземных машин в мобильные сети, способные собирать информацию о боевом пространстве, в том числе в городских условиях.⁴³

(На этой основе создается новая технологическая платформа МО США — боевые системы будущего (Future Combat System). В соответствии с концепцией сетецентрических систем предусматривается с помощью внедрения в войска передовых информационных технологий объединять рассредоточенные в обширном боевом пространстве разнородные силы и средства (личный состав; органы и пункты управления, боевого обеспечения; вооружение и военную технику наземного, воздушного и морского базирования) в формирования со сложной сетевой архитектурой — глобальные и локальные информационные сети. Ожидается, что боевая эффективность формирования с сетевой архитектурой возрастет многократно по сравнению с существующими формами, так как обмен данными между потребителями будет осуществляться в реальном масштабе времени не только "по вертикали", но и "по горизонтали"⁴⁴.)

- Создаются комплексы из БПЛА, способные интегрироваться в сетецентрические системы (компания "Boeing"⁴⁵ и General Atomics Aeronautical Systems⁴⁶ объединяют усилия в сфере проектирования БПЛА и средств ведения сетевой войны⁴⁷).

Таким образом, разрабатываются гибкие технологии, позволяющие собирать информацию в реальном масштабе времени об удаленных объектах, разбросанных на значительных расстояниях в пространстве и осуществлять дистанционные массивные воздействия на эти объекты. Такие технологии можно назвать БПЛА-системами или БПЛА-технологиями. При этом все указанные операции могут выполняться скрытно для противника, так как БПЛА современного уровня могут быть невидимыми для средств обнаружения. Использование наноматериалов позволит в самом ближайшем будущем сделать их невидимыми и для человеческого глаза.

В случае использования сетей из взаимодействующих БПЛА эффективность сбора информации и воздействий на объекты многократно увеличива-

ется за счет мультипликативного эффекта. Более того, появляются возможности значительного расширения реализуемых функций, выходящие за рамки функций отдельных БПЛА.

Из этого следует, что оценку состояния в сфере развития БПЛА необходимо проводить не только с учетом качества, свойств и возможностей выпускаемых БПЛА. Важно оценивать состояние и развитие БПЛА-технологий и тех достижений, которые получены в этой сфере. Особенно важен такой подход при оценке состояния развития БПЛА-технологий военного назначения.

Однако БПЛА-технологии — это общая концепция, которая применима не только к военным проблемам, но и к гражданским задачам.

БПЛА и проблемы безопасности

В России и США БПЛА используются для борьбы с терроризмом: проводится поиск и обнаружение военных баз террористов, решаются задачи уничтожения боевиков и их руководителей.

США накопили определенный опыт применения БПЛА для решения задач наблюдения за кокаиновыми плантациями и передвижением наркотиков; выявления маршрутов движения и перевалочных баз контрабандистов и перебежчиков; борьбы с наркотиками, браконьерами и нелегальными эмигрантами.

Вместе с тем, нельзя не учитывать, что на рынках могут появиться мини- и микроБПЛА, оснащенные оружием.

(Примерами могут быть бесшумный Wasp, длиной 15 см, шириной 40 см и массой менее одного килограмма, способный подниматься на высоту около 300 м, развивать скорость до 60 км/ч и действовать на удалении до 3,5 км от пульта управления, или Cyber-Vig массой менее килограмма, незаметный для радаров. Стоимость таких аппаратов составляет всего 5,5 тыс долл.⁴⁸.)

Такие аппараты могут значительно расширить возможности террористов. При этом террористические операции могут осуществляться максимально скрытно и оказываются максимально сложными для расследования. Учитывая, что мини-БПЛА могут запускаться с рук и садиться просто на землю, их легко использовать для скрытной переброски наркотиков и других запретных грузов через границу. Неконтролируемое применение микроБПЛА для мониторинга ситуации внутри зданий, перемещения людей, нейтрализации людей и даже их уничтожения может поставить ряд острых проблем защиты людей и оборудования, противодействия промышленному шпионажу и за-

⁴³ PC WEEK/RE № 10, 19 марта 2002 г.

⁴⁴ Использование БЛА в сетецентрических системах. <http://www.pwgs.org/news.htm> 16-06-2006.

⁴⁵ www.boeing.com

⁴⁶ www.ga.com

⁴⁷ PC WEEK/RE № 19, 27 мая 2003 г.

⁴⁸ В США создан миниатюрный беспилотный "стелс". <http://www.lenta.ru/news/2005/08/01/uav/>

щиты прав человека. Бесспорно, наличие эффективных комплексов БПЛА у одной из противостоящих сторон создает угрозу для другой.

Применение БПЛА в случае недружественных отношений между странами может потребовать кардинального пересмотра методов и средств защиты сложных секретных объектов (например, подвижных ракетных комплексов), привести к существенным экономическим и военным потерям, осложнить решение проблемы безопасности.

При наличии столь серьезных угроз со стороны БПЛА методы их изготовления сегодня общедоступны. Радиоуправляемый микросамолет с богатым набором возможностей можно без проблем собрать собственными силами из блоков, продаваемых на рынке. Обойдутся они всего в 1000 долл. Свободно распространяемые решения для разработчиков беспилотных самолетов предлагаются, например, на сайте <http://autopilot.sourceforge.net/>. На сайте www.spyplanes.com можно сделать заказ и приобрести шпионский самолет за 30 000 долл.⁴⁹

С учетом сказанного необходима организация контроля распространения БПЛА, как и другого скрытого, особо опасного оружия, например, переносных зенитно-ракетных комплексов.

(Сенат США планирует ввести ограничение на распространение технологий создания беспилотных аппаратов, приравняв их к оружию массового поражения (ОМП). Возможные поправки войдут в состав международных соглашений о нераспространении ОМП.⁵⁰)

Широкое распространение БПЛА в качестве оружия должно стимулировать развитие средств противодействия. В качестве средств защиты от стратегических БПЛА, вероятно, могли бы использоваться обычные средства ПВО, которые уже показали определенную эффективность. Боевые потери БПЛА в югославском конфликте 1999 г. составили, по данным НАТО, 16 аппаратов (по сведениям югославской стороны — 30). Вместе с тем, следует учитывать, что группировка боевых БПЛА может создать гораздо большее давление на систему ПВО, чем аналогичная группировка пилотируемых самолетов за счет применения специальных тактических приемов.

Однако существующие средства ПВО могут оказаться малоэффективными или бесполезными при использовании невидимых для локаторов мини-БПЛА с малошумящими двигателями, при массовом использовании БПЛА в боевых условиях, а также при использовании насекомоподобных аппаратов.

Особенно трудные задачи возникают в связи с защитой от систем, созданных на основе БПЛА-

технологии, или при массовом нападении микро-БПЛА. При этом, вероятно, потребуются специальные средства информационной защиты или физического уничтожения всей "стаи" БПЛА разных типов вблизи охраняемого объекта. Уже сейчас очевидно, что перспективные системы ПВО обязательно должны учитывать новые беспилотные угрозы.

Законодательное регулирование в сфере БПЛА

Широкое применение БПЛА внутри страны для гражданских целей требует установления четких правил содержания БПЛА и регулирования их полетов. Это обусловлено рядом соображений. Если одновременно в одном месте действует много БПЛА, то они должны быстро отслеживать траекторию своего движения, чтобы избежать столкновений, иметь необходимую надежность, не приводить к катастрофическим последствиям в случае аварий.

Определенные правила и ограничения должны действовать при их использовании правоохранительными и силовыми ведомствами с точки зрения обеспечения конституционных прав граждан и соблюдения действующего законодательства.

Вероятно, должны быть установлены разрешенные коридоры для полетов и запретные зоны, позволяющие исключить получение разведывательной информации об объектах специального назначения.

Некоторый опыт создания регулирующих механизмов применения БПЛА накапливается в США. Например, Федеральная авиационная администрация США готовит пакет нормативных актов, регулирующих правила использования БПЛА для перевозки грузов, тушения лесных пожаров, проведения спасательных операций, контроля дорожного движения и т. д.⁵¹

БПЛА в России

В 90-х гг. возник резкий спад в сфере разработки и применения БПЛА в России. Было остановлено государственное финансирование разработок и производства БПЛА, разрушены необходимые организационные механизмы, в том числе механизмы планирования и формирования перспективных программ, исчезли заказчики, прежде всего в армии.

Еще недавно, в 2003 г., Альтаф Каримов, заместитель главного конструктора ОКБ Сухого, отмечал, что тема создания новых БПЛА отсутствует в Государственной программе вооружений России на период до 2010 г. Пока существует лишь госпрограмма модернизации типа "Рейс" и "Пчела-1Т". Россия быстро отстает от ведущих стран мира в области беспилотной авиационной техники.⁵²

⁴⁹ PC WEEK/RE № 32. 3 сентября 2002 г.

⁵⁰ PC WEEK/RE № 32. 3 сентября 2002 г.

⁵¹ PC WEEK/RE № 3. 04 февраля 2003 г.

⁵² PC WEEK/RE № 3. 04 февраля 2003 г.

В результате крупные БПЛА стратегического уровня в стране не создавались. Более того, вообще ставился вопрос об их целесообразности. Некоторые конструкторы БПЛА считали, что вполне можно обойтись тактическими дистанционно пилотируемыми аппаратами. Отсутствовали разработки по боевым БПЛА, оснащенным оружием.

В настоящее время, по словам главкома ВВС РФ генерал-полковника Александра Зелина, "развитие комплексов с БПЛА является приоритетным направлением в Российской Федерации". С этой целью в Вооруженных Силах РФ разработана программа развития комплексов с БПЛА, в которой определены их роль и место, а также этапы развития. Сейчас в строевые части только начали поступать комплексы, создание которых было заложено 10...12 лет назад. В основном это комплексы разведывательных БПЛА. К 2011 г. на вооружение ВВС России поступят современные БПЛА различных типов, включая ударные. При этом разрабатываются БПЛА самолетного и вертолетного типов, ближнего действия (переносных, массой несколько килограммов), а также большой дальности, способных решать задачи на глубине 300...400 км и находиться в полете до 10...12 ч. Поступление таких комплексов ожидается уже к 2011 г.⁵³

(При их создании используются передовые отечественные технологии и оригинальные технические решения. Особое внимание уделяется применению цифровых технологий: автоматизации разработки полетных заданий, выполнению полетов в автономном режиме с использованием данных спутниковых систем навигации, автоматизированному сбору и обработке информации.)

Бывший главком ВВС генерал армии Владимир Михайлов сообщил, что в российских ВВС имеются исследовательская эскадрилья, центр боевого применения и два полка БПЛА⁵⁴.

Проблемы создания малоразмерных БПЛА будут решаться в России с участием межведомственной рабочей группы. Решение о ее формировании принято на совещании представителей Минобороны, ФСБ, МВД, МЧС, Роспрома, Рособоронзаказа, предприятий и организаций промышленности.

(На заседаниях межведомственной рабочей группы заинтересованные стороны будут обмениваться опытом выполнения работ и обсуждать ход выполнения гособоронзаказа. Участники намерены выработать и направить в заинтересованные структуры исполнительной власти предложения по улучшению межведомственного взаимодействия и координации работ в области создания малоразмерных БПЛА. Перспективы развития малоразмерных БПЛА связы-

⁵³ К 2011 году на вооружение ВВС России поступят беспилотные летательные аппараты: АРМС-ТАСС, 08.08.2007

⁵⁴ Беспилотники, на взлет! <http://www.aviaport.ru/digest/2007/04/04/118710.html>

ваются с возможностями ОАО "СКБ "Топаз" — ведущего российского разработчика в области малозабаритных БПЛА⁵⁵.)

Первый заместитель председателя Военно-промышленной комиссии при правительстве России (ВПК) Владислав Путилин отметил, что действующая государственная программа вооружения предусматривает оснащение войск беспилотными аппаратами тактического звена к 2011 г., а оперативного и стратегического — в 2011...2015 г. Он также сказал, что ВПК планирует обеспечить поставки БПЛА не только в Вооруженные силы, но и в другие силовые структуры, а также на гражданский рынок, что должно способствовать увеличению объемов производства и устойчивому развитию отрасли⁵⁶.

Сейчас в России имеется целый ряд дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) тактического назначения. Широко известны комплекс полкового уровня — "Строй-П"⁵⁷ с ДПЛА "Пчела"⁵⁸, беспилотный авиационный комплекс "Типчак"⁵⁹, гражданский аэродинамический наблюдатель телевизионный — ГранТ⁶⁰, комплексы БРАТ⁶¹, "Кулон-2", "Пустельга"⁶², "СОВА", комплекс дистанционной постановки помех средствам радиосвязи "Мошкара"⁶³, "Отшельник"⁶⁴ (российско-украинский), "Амеба" и "Гнус"⁶⁵.

Они неоднократно демонстрировались на выставках беспилотной авиационной техники. В частности, комплексы "Строй-П" и ГранТ были показаны на аэродроме "Шувое" близ г. Егорьевск Московской области 28 марта 2007 г.⁶⁶. На этом же показе была представлена новая разработка — ударный комплекс Ту-300, "Коршун"⁶⁷.

⁵⁵ Российская армия получит большие беспилотники после 2011 года. <http://www.lenta.ru/news/2007/03/29/drone/>

⁵⁶ Российская армия получит большие беспилотники после 2011 года. <http://www.avia.ru/week/list/?id=1175157953>

⁵⁷ Н. В. Чистяков. Мнение по поводу решения ВПК об отказе в финансировании беспилотных авиационных комплексов. <http://dpla.ru.2006.06.15.htm>

⁵⁸ Н. В. Чистяков. "Прошлое, настоящее и будущее тактических БЛА в России"

⁵⁹ Беспилотный разведывательный комплекс "Типчак" проходит государственные испытания. <http://www.aviaport.ru/Digest/2004/09/04/83341.html>

⁶⁰ Гражданский аэродинамический наблюдатель телевизионный ГранТ. Комплекс дистанционно пилотируемых летательных аппаратов. <http://www.dpla.ru/grantpromo/ttxgrant.htm>

⁶¹ Н. В. Чистяков. Все не так уж сумрачно вблизи. Сопоставление ДПЛА БРАТ (Россия) и "ДрэгонАй" (США). <http://www.dpla.ru/dragonbrat>

⁶² Пустельга. <http://microavia/narod/ru/projects/pustelga/index.htm>. <http://www.memsconus.com>

⁶³ http://www.nvo.ng.ru/armament/2000-04-14/6_nowor-ries.htm

⁶⁴ Комплекс ДПЛА "Отшельник" НПКЦ "Новик—XXI век". <http://dpla.ru/Otshelnik/injotshl/>

⁶⁵ Сайт ДПЛА. РУ. НПКЦ "Новик—XXI век". На сайте <http://dpla.ru> можно познакомиться с отечественными ДПЛА "Мошкара", "Амеба", "Грант", "Брат"

⁶⁶ <http://www.vesti.ru/comments.html?id=57953>

⁶⁷ <http://dpla.ru/pokazegor28marta.htm>. Беспилотники спешат на помощь

По мнению Главного конструктора НПКЦ "Новик — XXI век" Н. В. Чистякова некоторые российские ДПЛА по техническим характеристикам опережают зарубежные разработки. Например, российский ДПЛА "БРАТ" по всем базовым параметрам лучше американского "Глаза дракона". Комплекс "ГрАНТ" (Россия, 2001 г.) соизмерим и по важным показателям, таким как дальность полета БПЛА и полезная нагрузка, лучше американского БПЛА "Серебряная лисица" (Silver Fox, США, 2003 год)⁶⁸. Появляются новые проекты и разработки.

- На авиасалоне "МАКС—2007" российская самолетостроительная корпорация "МиГ" впервые представила макет боевого БПЛА "Скат", который предназначен для нанесения ударов как по заранее разведанным стационарным целям, в первую очередь, средствам ПВО в условиях сильного противодействия зенитных средств противника, так и по мобильным наземным и морским целям.

(Боевые задачи "Скат" может выполнять как автономно, так и совместно с пилотируемыми летательными аппаратами. "Скат" сможет развивать скорость более 800 км/ч у земли и нести боевую нагрузку до 2 тонн. Практический потолок "Ската" — более 12 тыс. м, дальность полета — до 4 тыс. км. В арсенале "беспилотника" будут две ракеты класса "воздух—поверхность" или противорадиолокационные ракеты. Аппарат также будет способен применять две корректируемые авиационные бомбы калибров 250 и 500 кг.⁶⁹)

- Неплохие перспективы по-прежнему имеет проект создания беспилотной авиационной системы БАС-62, продвигаемый ОКБ "Сухой".

(Беспилотный аппарат С-62 массой 8 т должен подниматься до 20 км, развивать скорость до 500 км/ч, находиться в воздухе более 24 ч, мониторить в районе диаметром не менее 1000 км. Предполагается, что по ряду параметров БАС-62 превзойдет самую продвинутую американскую разведсистему Global Hawk⁷⁰.)

- На московском авиасалоне МАКС—2005 одна из российских компаний представила прототип реактивного беспилотного самолета-невидимки с вертикальным взлетом и посадкой⁷¹.

⁶⁸ Н. В. Чистяков. Американский комплекс ДПЛА Silver Fox или русский след "Серебряной лисицы" (сопоставление с отечественным комплексом ДПЛА ГрАНТ). <http://dpla.ru/SilverFox>

⁶⁹ Программа создания ударных беспилотных летательных аппаратов будет реализовываться РСК "МиГ" совместно с ОАО "КЛИМОВ". <http://www.rosprom.gov.ru/news.php?id=4317>

⁷⁰ Беспилотный прорыв. <http://www.pwgs.org/news.htm> 19-06-2006

⁷¹ В 2020 году Пентагон получит беспилотный самолет-невидимку. <http://www.lenta.ru/news/2005/09/27/stealth/>

- Компания "Эникс" в рамках выставки "Интерполитех—2007" продемонстрировала новый беспилотный летательный аппарат "Элерон".

(Комплекс дистанционного наблюдения "Элерон" был сконструирован российскими специалистами с учетом мировых тенденций в создании беспилотных летательных аппаратов для военных нужд. "Элерон" состоит из двух раскладываемых самолетов-разведчиков и наземной станции управления с видеомониторами. Масса всего комплекта не превышает 30 кг, что позволяет легко переносить его в рюкзаках двум солдатам. Самолет запускается с земли с помощью портативного пускового устройства. Радиус действия — до 10 км в варианте видеонаблюдения и до 25 км — в качестве аэрофотосъемщика. В воздухе этот управляемый с земли самолет может находиться до полутора часов, летая на высотах от 100 до 3000 м со скоростью от 65 до 105 км/ч. Выполнив поставленную задачу, беспилотный аппарат осуществляет в заданном районе посадку с помощью парашюта⁷².)

- Российская бронетехника (перспективные разработки) может быть оснащена разведывательными БПЛА, которые смогут получать и передавать оперативную информацию об окружающей обстановке в радиусе до нескольких километров. Эти аппараты разработаны компанией "Беспилотные системы" (г. Ижевск)⁷³.

- Акционерное общество ЭНИКС представило на проходящей в Москве выставке продукции военного назначения сухопутных войск МВСВ—2006 воздушную мишень Е-95 с изменяемой ЭПР (эффективной поверхностью рассеивания).

(Комплекс воздушной мишени Е-95 предназначен для тренировки расчетов средств ПВО. Он имитирует дозвуковые маневрирующие цели типа "крылатая ракета", "планирующая бомба", "БПЛА". Главной особенностью комплекса является возможность изменять ЭПР (эффективную поверхность рассеивания) от 7...8 до 0,15 м², имитируя как обычные цели, так и цели типа "Стелс". Система управления обеспечивает сопровождение мишени на дистанциях до 50 км. Запуск мишени осуществляется с помощью пневматической катапульты. Ресурс летательного аппарата рассчитан на 7...10 применений. Подобные мишени позволяют тренировать расчеты ПВО в условиях, близких к боевым, обрабатывая захват цели, ее сопровождение, целеуказание и уничтожение⁷⁴.)

⁷² На XI международной выставке средств обеспечения безопасности государства "Интерполитех—2007". <http://www.interpoliteh.ru/site.xp/054048124049056053054.html>

⁷³ Перспективная российская бронетехника может оснащаться разведывательными БЛА. <http://www.pwgs.org/news/17-07-2006.htm>

⁷⁴ Россиянам показали запускаемый с рогатки беспилотник. <http://www.news-84186.shortnews.rin.ru>

- В России завершается создание усовершенствованной воздушной мишени "Дань-М", которая может применяться всеми видами вооруженных сил для отработки новейших систем вооружений.

(Воздушная мишень "Дань-М" будет иметь массу 350...400 кг, максимальный радиус действия 680 км и сможет совершать полет продолжительностью до 70 мин на высотах от 50 до 9 тыс. м. Ее эффективная поверхность рассеяния в зависимости от ракурса не превышает 0,1...0,22 м², а при установке специальных радиоизлучателей может быть увеличена от 1,4 до 25 м². Применение новой программной или радиокomандной системы управления позволит осуществлять полет группы мишеней, имитируя, таким образом, сложную мишенную обстановку для испытываемых комплексов вооружения. "Дань-М" в конце полета опускается на землю на парашюте и может применяться до 10 раз. Новый комплекс обеспечивает имитацию налета группы самолетов тактической авиации в составе до 10 летательных аппаратов. Это позволяет воспроизводить сложную воздушную обстановку и отрабатывать системы ПВО и бортовое вооружение авиационных комплексов нового поколения в условиях, близких к реальной боевой ситуации. "Создание мишени "Дань-М" обеспечит министерству обороны РФ всю гамму воздушных мишеней, необходимых для отработки вооружений ВВС, ВМФ, сухопутных войск и проведения боевой подготовки личного состава", — считает руководитель ОКБ "Сокол"⁷⁵).

Кроме армии в России появились и другие активные заказчики БПЛА: МВД, МЧС, ФСБ и другие.

- Впервые в своей практике Министерство внутренних дел России дает добро на старт беспилотных летательных аппаратов⁷⁶.

(В настоящее время аппараты, разработанные компанией "Беспилотные системы", используются в интересах МВД РФ, располагающего целой группой БПЛА).

- ОАО "Научно-производственная корпорация "Иркут" сформировала линейку из унифицированных беспилотных комплексов гражданского применения, в первую очередь, в интересах МЧС РФ. В линейке пять БПЛА: от трехкилограммового "Иркут-2" с радиусом действия до 40 км до 200-килограммового "Иркут-200", способного шесть часов патрулировать на дальности до 200 км⁷⁷.

Сейчас в России существует несколько десятков фирм, которые занимаются вопросами разработки

БПЛА. Кроме упомянутых в данном обзоре результатов, вероятно, есть и другие, которые будут реализованы в Программе развития комплексов с БПЛА, разработанной Вооруженными Силами РФ, и в гражданских разработках.

Заключение

В настоящее время БПЛА являются эффективным инструментом при решении многих военных и гражданских задач. Их разработкой и применением занимаются многие страны мира, в том числе и Россия, накоплен значительный опыт создания БПЛА с уникальными функциональными и техническими характеристиками. Ведущие страны мира, прежде всего США, переходят к новому этапу развития БПЛА — созданию комплексов из БПЛА, способных совершать коллективные действия в интересах достижения разнообразных целей и интегрироваться в более сложные функциональные системы, например, в сетицентрические системы. Решения, принятые в России на государственном уровне, направлены на развитие БПЛА как приоритетного научно-технического направления и на их активное использование для решения военных и гражданских задач.

Источники

1. AVIA. RU, 09.11.2005
2. BAE Systems спроектировала боевой беспилотный самолет. pcnews.ru/news/bae-systems-herti-1a-corax-2005-102966.html
3. CNews: BAE Systems спроектировала боевой беспилотный самолет. www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2006/01/18/194575
4. Elbit Systems Ltd. News Bulletin. <http://www.auvsi.org-media/presskits/elbitPress.pdf>
5. Hornet <http://microavia/narod.ru/projects/hornet/index.htm>
6. <http://www.memsconus.com>
7. <http://www.rosprom.gov.ru/news.php?id=4317>
8. Joint Unmanned Combat Air Systems. <http://www.darpa.mil/j-ucas/>
9. Killer Drone, Dead; New Bomber Lives Drones January 12, 2006. <http://www.defensetech.org/archives/002079.html>
10. Killer Drone's Big Brother Drones December 9, 2005. <http://www.defensetech.org/archives/002005.html>
11. MEMBRANA, 20.06.2007
12. Unmanned Stealth Aircraft to Debut in 2020. http://www.defencetalk.com/news/publish/articl_003524.php
13. WASP. <http://microavia/narod.ru/projects/wasp/index.htm>
14. www.russiannews.ru/archive/pdfs/2006/27/1-27-2006
15. www.uav.ru/articles/mav_abord.pdf
16. Австралийская организация CSIRO (www.cmit.csiro.au) создает беспилотный вертолет. PC WEEK/RE № 1, 20 января 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
17. Австралия создаст эскадрилью беспилотных самолетов. Газета.Ru. 4 февраля 2004
18. Альпинистов на Эвересте будет спасать беспилотный вертолет. <http://www.aviaport.ru/News/2007/02/14/116068.html>
19. Американским военным раздадут пульты управления воздушной разведкой 15.05.2007. <http://www.lenta.ru/news/2007/05/15/northrop/>
20. Американцы впервые использовали беспилотный самолет Predator. www.magnolia-tv.com/news/2003-03-24/predator/
21. Аресты по делу о продаже беспилотных вертолетов в Китае. <http://uav.ru>

⁷⁵ В России завершается создание усовершенствованной воздушной мишени "Дань-М". www.rosprom.gov.ru/news.php?id=3134&vers=print

⁷⁶ www.russiannews.ru/archive/pdfs/2006/27/1-27-2006

⁷⁷ НПК "Иркут" намерена развивать беспилотную авиацию в интересах МЧС РФ. www.avias.com/news/2006/06/02/103410.html

22. Армия обороны Израиля принимает на вооружение новый ряд разведывательных летательных аппаратов. <http://lenta.ru/mideast/2004/03/26/drones/> 26 марта 2004 г.
23. Беспилотная авиация: израильский опыт. <http://pd.cnews.ru/reviews/index.shtml?2007/03/07/239319>
24. Беспилотная техника в интересах ТЭК. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/13/115921.html>
25. Беспилотники — дальний прицел. Российское военное обозрение. 27 окт. 2004. <http://www.retranslator.ru/index.php?page=message.talk&subject=2&host=447&messageId=14407>
26. Беспилотники в фаворе. НВО № 14, 2002 г. <http://www.nvo.ng.ru>
27. Беспилотники спешат на помощь. <http://www.aviaport.ru.News/2007/03/29/118388.html>
28. Беспилотники, на взлет! <http://www.aviaport.ru.News/2007/04/04/118710.html>
29. Беспилотники, на взлет! <http://www.aviaport.ru/digest/2007/04/04/118710.html>
30. Беспилотные воздушные транспортные средства. <http://www.gizmo.com.au>
31. Беспилотные самолеты захватывают небо. http://www.day.az/print_view.php?id=1588
32. Беспилотные самолеты исследовали атмосферу над Индийским океаном. science.computenta.ru/264978/?r1=rss&r2=remote
33. Беспилотные самолеты могут взять на себя функцию базовых станций. <http://www.cellar.ni/news/2005/07/11/5124.html>
34. Беспилотные самолеты основа сетей 3G. porta.hi.fi.ru/news/view.php?id=8076
35. Беспилотные самолеты США уничтожили дом мирных жителей. www.kiev2000.com/news/view.asp?Id=189149&Part=29
36. Беспилотный прорыв. <http://www.pwgs.org/news.htm> 19-06-2006
37. Беспилотный самолет Eagle Eye, создаваемый фирмой Bell Helicopter, прошел успешные испытания в реальных условиях. PC WEEK/RE № 13, 13 апреля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
38. Беспилотный самолет-шпион RQ-1 Predator. http://news.bbc.co.uk/hi/russian/sci/tech/newsid_2737000/2737579.stm
39. Беспилотный самолет-шпион RQ-1 Predator. news.bbc.co.uk/hi/russian/sci/tech/newsid_2737000/2737579.stm
40. Больше света! Беспилотные самолеты на основе лазера. www.homepc.ru/science_n_life/18752/
41. БПЛА ScanEagle сертифицирован по стандартам НАТО. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/12/115903.html>
42. БРАТ. <http://www.dpla.ru/brat>
43. БРАТ-фоторобот. <http://www.dpla.ru/BRATtech.htm>
44. Британия внедряет беспилотные военные самолеты. www.obozrevatel.com/news/2006/1/20/81092.htm
45. В 2005-м Пентагон израсходует 2 млрд. долл. на закупку и совершенствование беспилотных самолетов. PC WEEK/RE № 6, 24 февраля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
46. В 2020 году Пентагон получит беспилотный самолет-невидимку. <http://www.lenta.ru/news/2005/09/27/stealth/>
47. В 2020 году Пентагон получит беспилотный самолет-невидимку URL. www.lenta.ru/news/2005/09/27/stealth/
48. В Великобритании прошли испытания беспилотного реактивного самолета. falt.fizteh.ru/index/avia/n_2q6m2y_.html?&xsl:onlynew=1
49. В израильскую армию поступают новые беспилотные аппараты. PC WEEK/RE № 13, 13 апреля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
50. В Иране создан беспилотный самолет-разведчик. <http://news.liga.net/news/N0706446.html>
51. В Иране создан беспилотный самолет-разведчик нового поколения. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/12/115860.html>
52. В небо без пилота. http://www.vokrugsveta.ru/vs/?article_id=2994
53. В Соединенных Штатах продолжаются испытания беспилотного летательного аппарата "Предейтор-В". <http://www.armstass.su> (18 августа 2004 г.).
54. В США создан миниатюрный беспилотный "стелс". <http://www.lenta.ru/news/2005/08/01/uav/>
55. В США успешно прошли испытания сверхзвукового беспилотного самолета. uzsaa.globalnet.uz/index.php/rus/node_200/node_267/node_558/node
56. Великобритания работает над проектом беспилотного боевого самолета — Terralab. www.terralab.ru/news/299160/
57. Вооружений все больше. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/13/115951.html>
58. Всеобщая чувствительная сеть — "Умная пыль". http://perst.issph.kiae.ru/Inform/perst/2002/2_24/n.asp?file=perst.htm&label=K24
59. Выпущен первый F-22 для Дальнего Востока. <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2006/10/20/214586>
60. Гражданский аэродинамический наблюдатель телевизионный ГРАНТ. Комплекс дистанционно пилотируемых летательных аппаратов. <http://www.dpla.ru/grantpromo/ttxgrant.htm>
61. Границы Европы будут охранять беспилотные самолеты. rus.delfi.lv/news/daily/abroad/article.php?id=14629883
62. ГрАНТ. <http://dplagrants.narod.ru>
63. Департамент морских исследований МО США создает автономный аппарат MARV PC WEEK/RE № 19, 1 июня 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
64. Дистанционный пульт для самолета Пассажирские лайнеры останутся антитеррористическими системами "RBC Daily" 19.03.07
65. Дрэгон Ай <http://www.aviationnow.com/>
66. Изобретения, которые потрясут мир. www.izobreteniya.ru/izobret/izobet_27.htm
67. Израильский беспилотный самолет признан главным технологическим достижением года. <http://uav.ru/news.php?cod=611>
68. Иранские беспилотники. http://www.vpk-news.ru/article.asp?pr_sign=archive.2005.71.articles.company_01
69. Использование БЛА в сетцентрических системах, ЗВО. <http://www.pwgs.org/news.htm> 16-06-2006
70. Исследования и разработки — RND. CNews. <http://www.rnd.cnews.ru>
71. К 2011 году на вооружение ВВС России поступят беспилотные летательные аппараты: АРМС-ТАСС, 08.08.2007
72. Компания Lockheed Martin завершила этап проектирования боевого беспилотного вертолета. PC WEEK/RE № 34, 21 сентября 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
73. Компания SAAB намерена стать одним из основных европейских разработчиков беспилотных летательных аппаратов (новости ВВС). <http://www.avia.ru> (АРМС-ТАСС, 7 августа 2004 г.).
74. Компания Seiko Epson испытала микровертолет. PC WEEK/RE № 34, 21 сентября 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
75. Компания, создавшая U-2 и SR-71, разрабатывает беспилотный самолет. <http://science.computenta.ru/254256/>
76. Комплекс ДПЛА "Отшельник". <http://dpla.ru/Otshel'nik/injotsh/>
77. Корпорация Boeing испытывает новый беспилотный боевой самолет Dominator, способный находиться в воздухе 48 ч без дозаправки. PC WEEK/RE № 6, 24 февраля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
78. МИКРОДВИГАТЕЛИ Defence Evaluation and Research Agency. <http://www.dera.gov.uk>
79. МИКРОНОВОСТИ 2003 год. http://microavia.narod.ru/news/030000/030000_news.htm
80. МИКРОНОВОСТИ 2004 год. http://microavia.narod.ru/news/040000/040000_news.htm
81. МИКРОНОВОСТИ за 2000 года и ранее. http://microavia.narod.ru/news/000000/000000_news.htm
82. МИКРОНОВОСТИ за 2001—2002 года. http://microavia.narod.ru/news/020000/020000_news.htm
83. Мини- и микроБПЛА индийской компании Speck Systems демонстрируются в Бангалоре. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/12/115826.html>
84. Министерство обороны Австралии выделило 770 млн. долл. США на программу развертывания эскадрильи беспилотных самолетов. PC WEEK/RE № 6, 24 февраля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
85. Минобороны России подготовило программу по беспилотным летательным аппаратам. РИА "Новости", 14 января 2004 г.

86. Морские границы Евросоюза будут защищать беспилотные самолеты. <http://www.klerk.ru/soft/n/?50885>
87. <http://moshkarec.by.ru>
88. Иран разработал беспилотный самолет-разведчик нового поколения РИА "Новости" 12 февраля 2007 г. <http://moshkarec.by.ru>
89. **Чистяков Н. В.** Американский комплекс ДПЛА Silver Fox или русский след "Серебряной лисицы" (сопоставление с отечественным комплексом ДПЛА ГранТ) (декабрь 2005 г.). <http://www.dpla.ru/SilverFox>
90. **Чистяков Н. В.** Все не так уж сумрачно вблизи. <http://www.dpla.ru/dragonbrat/>
91. **Чистяков Н. В.** Архитектоника комплексов тактических ДПЛА и геостратегическое положение пользователя. <http://www.dpla.ru/arch20060523.htm>
92. XI международная выставка средств обеспечения безопасности государства "Интерполитех—2007". <http://www.interpolitech.ru/site.xp/054048124049056053054.htm>
93. На американский беспилотный аппарат Fire Scout устанавливается компактный модуль сигнальной разведки. PC WEEK/RE № 34, 21 сентября 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
94. На выставке высокотехнологичных видов вооружений, открывшейся в Тель-Авиве, Израиль представил новейший беспилотный самолет-разведчик. <http://lenta.ru/mideast/2004/03/25/skyluck/> 25 марта 2004 г.
95. На МАКСе были представлены как действующие модели, так и перспективные разработки БПЛА. <http://www.fextimes.ru/news/hnews28827.htm>
96. На МАКСе показали российский беспилотный самолет-невидимку. <http://www.vcj.ru/rus/news/2005/08/17?russteals>
97. На Филиппинах появятся американские беспилотные самолеты. www.celler.ru/news/2005/07/11/5124.htm
98. Настоящий автопилот. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/14/115875.html>
99. НАТО выбирает архитектуру перспективного беспилотника. <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2006/10/20/214671>
100. НЕБО БУДУЩЕЙ ВОЙНЫ // Воздушно-космическая оборона. 2005 № 5 (24). www.vko.ru
101. Нидерланды и Франция намерены создать эскадрилью беспилотных самолетов. PC WEEK/RE № 6, 24 февраля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
102. Новые высоты "беспилотников" <http://www.aviaport.ru.News/2007/04/04/118710.html>
103. НПК "Иркут" намерена развивать беспилотную авиацию в интересах МЧС РФ. www.avias.com/news/2006/06/02/103410.html
104. ОАО "Туполев" предлагает пилотируемый комплекс наблюдения. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/19/116290.html>
105. Объем рынка беспилотных летательных аппаратов в США достигнет 17 млрд долларов к 2011 г. armstass.su/?page=article&aid=24745&cid=24
106. Оружие: Пентагон создает Единый центр беспилотных летательных. www.lenta.ru/news/2005/07/20/bpla/
107. От "Крошки-шпиона" до ударного "Стойкого". <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/14/116045.html>
108. Пентагон берет на вооружение беспилотные самолеты. www.dengi-info.com/news/?nid=5496
109. Первый боевой вылет беспилотного самолета. www.news.cosmoport.com/2004/04/07/5.htm
110. Перспективная российская бронетехника может оснащаться разведывательными БЛА. <http://www.pwgs.org/news/17-07-2006.htm>
111. Пойнтер (Pointer). <http://www.dpla/Review/Pointer.htm>
112. Предатор. <http://www.uav.com/products/predactor.htm>
113. Проблемы с сенсорами F-22 Raptor оттеняют достоинства БПЛА Predator. <http://www.aviaport.ru.News/2007/02/12/115912.html>
114. Программа создания ударных беспилотных летательных аппаратов будет реализовываться РСК "МиГ" совместно с ОАО "КЛИМОВ". <http://www.rosprom.gov.ru/news.php?id=4317>
115. Проня. <http://www.novik-xxi.narod.ru/History.htm>
116. Прошлое, настоящее и будущее тактических БЛА в России. <http://uav.ru/chistyakov.php>
117. Пустельга. <http://microavia/narod.ru/projects/pustelga/index.htm>
118. Пустельга: беспилотный глаз и клюв // Военный парад. 2003 г., июль—август.
119. Попов В. А., Федутин Д. В. Развитие направления миниатюрных беспилотных летательных аппаратов за рубежом. М.: Изд. ФГУП "ГосНИИАС".
120. Российская армия получит большие беспилотники после 2011 года. <http://www.aviaport.ru.News/2007/04/04/118710.html>
121. Российская армия получит большие беспилотники после 2011 года. <http://www.lenta.ru/news/2007/03/29/drone/>
122. Российская армия получит большие беспилотники после 2011 года. <http://www.avia.ru/week/list/?id=1175157953>
123. Россия готовится представить миру новейшие беспилотные самолеты. www.RussianChicago.com/common/arc/story.php?id_cr=101&id=261019
124. Россия и Франция будут совместно разрабатывать беспилотные летательные аппараты. РИА "Новости", 2 декабря 2004 г.
125. Россиянам показали запускаемый с рогатки беспилотник. <http://www.news-84186.shortnews.rin.ru>
126. Рынок США переживает ажиотажный спрос на беспилотные самолеты. www.sostav.ru/news/2005/11/01/75/
127. Создан первый в мире водородный беспилотный самолет. www.membrana.ru/lenta/?4817
128. Специалисты DARPA намерены оснастить создаваемый боевой беспилотный вертолет UCAR системой распознавания голосовых команд. PC WEEK/RE № 24, 6 июля 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
129. Специалисты английского университета Bath обещают через два года создать высокоманевренные микросамолеты, использующие принципы полета насекомых и птиц. PC WEEK/RE № 7, 2 марта 2004 г. <http://www.pcweek.ru>
130. США опробуют военные беспилотные самолеты для защиты аэропортов. <http://www.aviaport.ru.News/2007/03/23/118106.html>
131. США приступают к развертыванию первых эскадрилий самолетов-роботов в Афганистане и Ираке. ИТАР-ТАСС, 17.07.2007
132. США развернут в Ираке сетевую систему разведки, наблюдения и сбора информации <http://www.aviaport.ru.News/2007/03/14/117460.html>
133. США разрабатывают сверхзвуковой БЛА дальнего радиуса действия. Новости ВВС. [http://www.avia.ru\(arms-tass.su,10августа2004г.\)](http://www.avia.ru(arms-tass.su,10августа2004г.))
134. США строят новую "летающую крепость". www.lenta.ru/news/2006/01/13/killerdrone/
135. Турция начинает реализацию своих беспилотных самолетов. www.regnum.ru/news/614566.html
136. Тяжелые беспилотные самолеты помогут США бороться с терроризмом. РИА Новости, 29.07.2007. <http://news.mail.ru/incident/139053/>
137. Тяжелый спутник Boeing поддержит боевые беспилотники. <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2006/10/20/214530>
138. **Лукашева Э.** Беспилотники не выходят из пике // Независимое военное обозрение. 16.06.2000. http://www.nvo.ng.ru/armament/2000-06-16/6_dpla.html
139. **Лукашева Э. П., Чистяков Н. В.** "Новые" или мини-ДПЛА. <http://www.dpla.ru/Articles/NewMiniUAV.htm>
140. **Лукашева Э. П.** Главная тенденция ДПЛАстроения. <http://www.dpla.ru/Articles/PChGrBrat.htm>

УДК 629.7.05.07

В. М. Бражник, канд. техн. наук,

Г. И. Герасимов,

ОАО "РПКБ", г. Раменское Московской обл.

Развитие интегрированных комплексов бортового оборудования самолетов нового поколения

Рассматриваются этапы развития интегрированных комплексов бортового оборудования (КБО) боевых самолетов нового поколения и принципы, на базе которых необходимо проводить их проектирование. Представлены унифицированные структуры интегрированного КБО для маневренных самолетов нового поколения. Приводятся характеристики бортовых вычислительных систем и виды современных информационных связей между бортовыми системами и вычислительной средой интегрированных комплексов на основе коммутационных технологий по стандарту RepidIO.

Развитие современной боевой авиации проводится в направлении улучшения летных характеристик, повышения малозаметности, многофункциональности решаемых задач, применения точных управляемых средств, живучести, работы днем и ночью в любых погодных условиях с обеспечением критериев безопасности. Рассмотрим вопросы, касающиеся непосредственно развития бортового оборудования [1].

Многофункциональность объекта, требующая решения большого круга задач, включает в себя уничтожение воздушных и наземных целей с использованием широкой номенклатуры управляемых и неуправляемых видов оружия, проведения воздушной и наземной разведок, причем в реальных боевых действиях эти функции, как правило, должны выполняться одновременно.

Применение высокоточного оружия требует установки на борту точных датчиков первичной информации и комплексной обработки информации.

Высокая степень живучести самолета предполагает соответствующую структуру комплекса с системами и датчиками высокой степени надежности, с резервированием на аппаратном и функциональном уровнях.

Живучесть самолета определяется также высокими оборонительными функциями, для чего на борту должен находиться комплекс всех необходимых средств для решения этой важной задачи, включая и оборонительное оружие.

Работу экипажа днем и ночью при любых погодных условиях можно обеспечить при наличии радиолокаторов, тепловизоров высокого разрешения с многоспектральными чувствительными элементами.

Важную роль в обеспечении эффективного выполнения экипажем боевого задания играет информационно-управляющее поле кабины, оптимизация которого при многофункциональности самолета во многом определяет эргономичность действий экипажа.

Высокая эффективность и безопасность применения оружия, разведки, пилотирования при любых метеоусловиях, включая и предельно малые высоты, предполагает автоматизацию выполнения всех перечисленных выше задач с возможностью оперативно-го вмешательства экипажа в процессы управления.

Боевой многофункциональный маневренный самолет нового поколения рассматривается как элемент тактической системы, базирующейся на групповом взаимодействии с различными объектами специального назначения, такими как космические и воздушные средства получения информации о противнике, наземные средства обработки информации.

Постановка задач, решаемых комплексом бортового оборудования (КБО), его структура и возможности определены современным уровнем развития элементной базы электроники и вычислительной техники, микромеханики, глубиной теории решения широкого круга задач, уровнем технологий разработки различных систем и датчиков, а также технологии разработки программного обеспечения комплекса и систем.

Эволюция КБО на данном этапе развития боевой авиации заключается в принятии концепции широкой интеграции бортовых систем и задач на уровне аппаратных и программных модулей [2]. Это становится возможным в связи с внедрением на борту более скоростных унифицированных устройств обмена информацией, повышением характеристик бортовых вычислительных систем, совершенствованием и оптимизацией структуры построения комплекса бортового оборудования.

Интеграция на аппаратном и алгоритмическом уровнях позволяет создать единую для всего борта многоуровневую, магистрально-модульную, реконфигурируемую информационно-управляющую систему с открытой архитектурой, включающую в себя [3]:

- магистрально-модульную информационно-управляющую вычислительную систему;
- информационно-управляющее поле кабины;
- информационно-измерительные системы;
- исполнительные средства и объекты управления.

Другим важнейшим принципом создания перспективных комплексов является модульность его построения. Могут быть выделены следующие основные модули:

- информационный модуль как логически законченное сообщение, представленное и зафиксированное в некоторой форме и рассматриваемое

безотносительно к средствам и методам передачи и обработки информации в КБО;

- функциональный модуль как законченный объект, реализующий одну или конечный набор функций определенного уровня и рассматриваемый безотносительно к средствам физической реализации;
- аппаратный (конструктивный) модуль как физический объект, обладающий конструктивно-технологической завершенностью, рассматриваемый безотносительно к реализуемой функции в качестве элемента конструкции КБО;
- программный модуль как синтаксически и семантически законченная совокупность инструкций (операторов), рассматриваемая относительно реализуемой функции и/или информационного сообщения и имеющая программные средства согласования с другими модулями соответствующего уровня [4].

Принцип модульности позволяет осуществить построение КБО методом проектирования с использованием базового набора аппаратных и программных модулей, что дает возможность создать оптимальную по составу и интеллекту структуру комплекса [5, 6].

Следующий принцип, который необходимо учитывать при разработке перспективных КБО самолетов — это принцип унификации, который включает в себя следующие положения:

- универсальность конструкций аппаратных и программных модулей с возможностью использования их в составе самолетов различного назначения;
- стандартизация каналов информационного обмена и высокоскоростной среды передачи цифровых видеозображений и больших массивов данных;
- объединение методов проектирования наземных и воздушных комплексов управления в тактической системе и КБО маневренного самолета в единую систему управления для выполнения полетного задания с оптимальным разделением функций между ними;
- создание единой автоматизированной технологии разработки и модернизации КБО для любого типа самолета на основе базового унифицированного КБО [7].

Принцип открытости архитектуры подразумевает определенную структуру связей комплекса, которая обеспечивает возможность последующей модернизации комплекса путем простого наращивания или замены аппаратных и программных модулей.

Возможная структурная схема интегрированного комплекса оборудования для

перспективных самолетов боевой авиации на основе изложенных выше принципов представлена на рис. 1.

Средством интеграции бортового оборудования — ядром комплекса — служит интегрированная информационно-вычислительная система, обеспечивающая решение всей совокупности задач КБО, а также централизованное автоматизированное управление всеми процессами функционирования бортового оборудования.

В этом случае она включает две бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС1 и БЦВС2), блок преобразования телевизионных сигналов (БПКТС), два блока коммутации сигналов *FC* и систему базы данных и знаний (ВЗУ). Каждая БЦВС представляет собой многопроцессорную систему, включающую в себя модули процессоров обработки сигналов для обработки информации от обзорно-прицельных систем, модули процессоров обработки данных для обработки информации от навигационных систем, средств связи, систем обороны, решения задач навигации и наведения самолета, объективного контроля; модули графических процессоров для формирования информационных кадров, представляемых на экранах индикаторов, в том числе двумерной и трехмерной картографической информации; интерфейсные модули для обеспечения взаимодействия по каналам мультимедийного информационного обмена (МКИО) и бортовой вычислительной сети.

Взаимодействие систем на уровне данных осуществляется на основе четырех мультимедийных

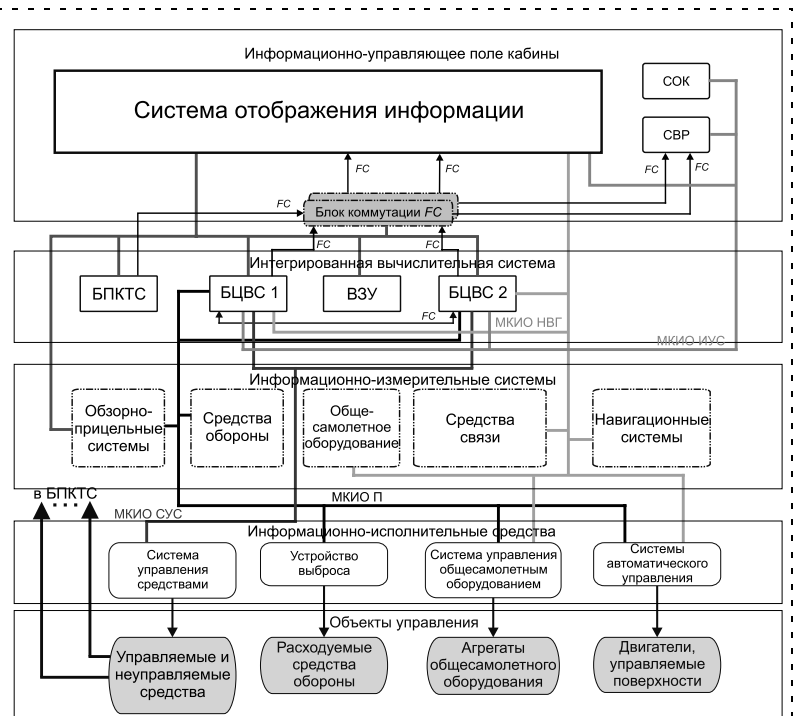


Рис. 1. Структурная схема базового комплекса маневренных самолетов

каналов информационного обмена МКИО, передача цифровых изображений и больших массивов проводится с помощью бортовой вычислительной сети на основе каналов Fiber Channel (FC)

Отметим, что группу информационно-измерительных систем составляют навигационные и обзорно-прицельные системы, средства обороны и связи, датчики системы общесамолетного оборудования.

Определение расположения различных объектов в воздушном пространстве и на земной поверхности относительно самолета осуществляется обзорно-прицельными системами — радиолокатором, тепловизионными и телевизионными обзорными системами, нацеленной системой целеуказания и индикации.

Системы радиосвязи представляют собой основное средство управления авиацией в воздухе. Поиск и обнаружение излучающих воздушных и наземных объектов осуществляются системами:

- предупреждения об излучении и о возможности столкновения с воздушными объектами;
- радиотехнической разведки.

В состав общесамолетных систем входят системы энергоснабжения, кондиционирования, топливная, противопожарная, пневмогидросистема, противообледенительная и другие.

К информационно-исполнительным системам относятся:

- комплексная система управления объектом;
- система управления оружием;
- устройства выбросов расходуемых средств;
- система активных помех;
- система автоматического управления.

Объектами управления КБО являются агрегаты, управляемые поверхности самолета, двигатели, управляемые и неуправляемые средства поражения, расходуемые средства обеспечения безопасности полета.

В качестве вычислительных машин верхнего уровня в 90-х гг. в бортовых комплексах применялись БЦВМ-486, которые построены с соблюдением основных архитектурных принципов персонального компьютера IBM PC AT [8]. Обмен между модулями из состава БЦВМ осуществлялся по системной асинхронной шине с разделенными линиями адреса и данных (число разрядов — 32, максимальная пропускная способность 40 Мбайт/с). Системная шина содержала, как правило, один активный центральный процессор, все остальные модули были пассивные и для центрального процессора представляли собой набор портов ввода/вывода. Тип центрального процессора — AMD486DX4 100 МГц.

Более поздняя разработка БЦВМ типа "Багет" имеет многопроцессорную шину VME-bus в соответствии со стандартом VME 64X и конструктивным исполнением Евромеханика 6U в стандарте

IEEE STD 1014. Шина VME-bus позволяет строить открытые архитектуры, содержащие до 21 модуля, семь уровней запроса прерываний и многопроцессорные конфигурации. В качестве центрального процессора применяется российская микросхема 1850BM2T с архитектурой MIPS 32.

В данной машине используются каналы передачи информации по мультиплексу в соответствии с ГОСТ 26765.52—87 (MIL STD—1553B), последовательный код по ГОСТ 18977—79 (ARINC429), дискретные сигналы по ГОСТ 18977—79 и дополнительно высокоскоростной последовательный интерфейс Fiber Channel.

В некоторых модулях машины используется принцип выделения функционально законченных частей в виде конструктивов, меньших, чем модули стандарта Евромеханика 6U в соответствии со стандартом ССРМС и РМС P1386.1/DRAFT 2.0. Эти так называемые мезонинные модули (не более двух штук), которые устанавливаются на основные модули (как правило процессоры общего назначения), используют для связи с основным модулем шину PCI версии 2.0 и позволяют существенно наращивать функциональные возможности основного модуля.

На базе такой технологии представляется возможность строить многопроцессорные машины со значительно большим быстродействием, чем однопроцессорная БЦВМ-486.

Технологическая независимость машины и программного обеспечения достигается за счет применения процессоров и чипсетов, модулей, операционных систем реального времени российского производства, выполнения СБИС основных контроллеров на основе широко распространенных ПЛИС фирм ALTERA и XILINX.

Следующим существенным шагом в развитии вычислительных машин для КБО может быть переход от классической шинной архитектуры к архитектуре с коммутацией соединений. Речь идет о создании поколения вычислительных систем для КБО военных самолетов с характеристиками на 1...2 порядка выше, чем существующие в настоящее время.

В одном из вариантов технического решения применяется известный электронный стандарт RapidIO (RIO) для коммутации чипов на монтажной схеме и монтажных схем с использованием объединительной платы. Для него в России в настоящее время создается элементная база. Это новая коммутационная технология с переключением пакетов для работы с сетями значительно расширяет возможности пересылки информации относительно известных шин типа PCI.

Архитектура RIO предлагает широкую полосу пропускания, программную независимость, отказоустойчивость и низкое время ожидания. Спецификация RIO определяет высокоэффективную

коммутационную архитектуру, для того чтобы передавать данные и информацию управления между микропроцессорами, коммуникациями и сетевыми процессорами, системной памятью и периферийными устройствами в пределах системы. Начальная спецификация RIO определяет технологию физического уровня, подходящую для связи чип—чип и плата—плата через стандарт напечатанной технологии монтажной схемы с производительностью 10 Гбит/с, использованием технологии низкого напряжения дифференциала сигнала (LVDS).

На рис. 2 приведена структурная схема процессорного модуля общего назначения с архитектурой обмена по RIO, который состоит из микропроцессора, коммутатора RIO, моста RIO, мезонинных модулей PMC (1 или 2), ОЗУ, ПЗУ, флеш-памяти, генератора тактовых сигналов для микросхем памяти, моста RepidIO-PCI, коммутатора RepidIO.

На рис. 3 представлена структура БЦВМ на основе процессорного модуля с архитектурой обмена по RIO, в которую входят следующие функциональные устройства:

- модуль процессора общего назначения (МПОН);
- мезонинный модуль графического контроллера (МГК);
- мезонинный модуль сетевого контроллера (МСК);
- мезонинный модуль мультиплексного обмена (ММК);
- мезонинный модуль обмена последовательным кодом (МОПс);
- мезонинный модуль обмена разовыми командами (МПК);
- мезонинный модуль ЛВС Ethernet 100 Мбит/с;
- устройство коммутации интерфейса внутри машины RIO;
- корпус и система питания.

Модули МПОН, имеющие по два независимых интерфейса RIO, связаны друг с другом с помощью интерфейса RIO через устройство коммутации.

Соединение микросхем коммутаторов обеспечивает два независимых пути коммутации в целях полного резервирования интерфейсов RIO.

Для связей с внешними абонентами, имеющих скоростной вид обмена, служат два модуля МСК-3 по стандарту Fiber Channel ANSI X3.230—1994 с двунаправленной линией по витой паре, с волновым сопротивлением 150 Ом, на скорости 1062,5 Мбит/с.

БЦВМ данной архитектуры позволяет обеспечить высокую степень толерантности специального и функционального программного обеспечения как самой машины, так и других вычислительных средств комплекса.

При этом можно использовать самые современные операционные системы ре-

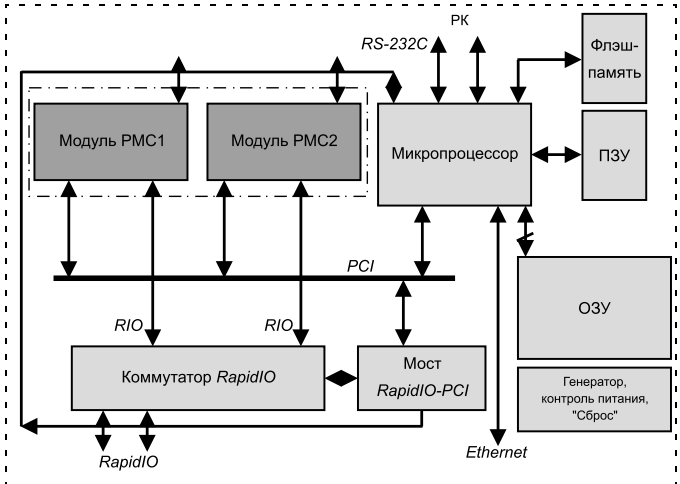


Рис. 2. Структурная схема модуля центрального процессора

ального времени, упрощаются протоколы обмена и процесс программирования программ ввода/вывода, унифицируется архитектура программ, достигается высокий уровень модернизируемости комплекса, независимости программ от аппаратных средств.

На уровне функциональных программ можно решать принципиально новые задачи, относящиеся к искусственному интеллекту с накоплением знаний и принятием соответствующих решений.

В таблице представлены сравнительные характеристики рассмотренных выше БЦВМ.

В практике проектирования комплексов как военной, так и гражданской авиации наметился переход от принятого до сих пор принципа пространственного обособления вычислительных процессов функциональных подсистем в своих модулях к

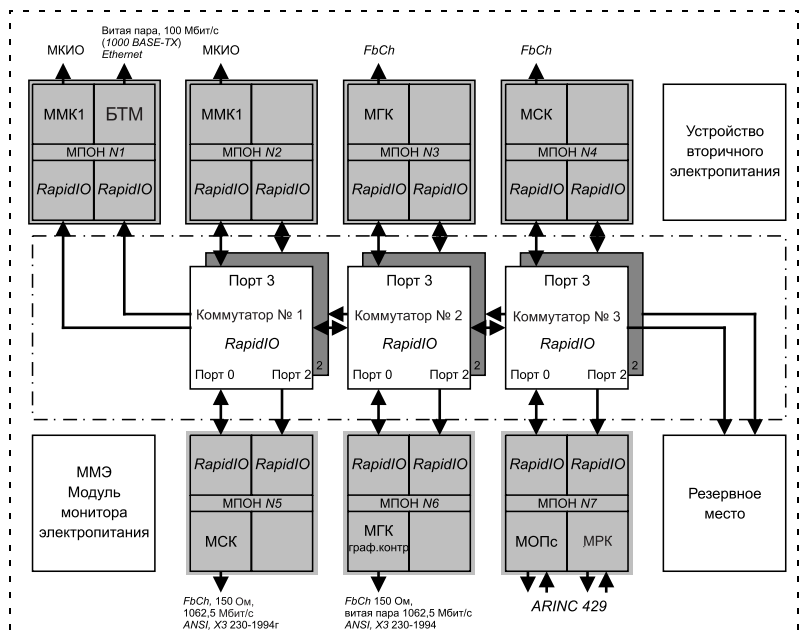


Рис. 3. Функциональная схема БЦВМ

Сравнительные характеристики БЦВМ

Характеристики БЦВС	БЦВС-486	БЦВМ Багет	Перспективная БЦВМ Багет
Тип процессора и быстродействие	486DX4, 90 МГц — 1 шт.	1850BM2T — до 6 шт.	Комдив 64, 280—350 МГц, 7 шт.
Архитектура	Intel	MIPS 32	MIPS 64
Объем ОЗУ/ПЗУ, Мбайт	2/4	16/64	512/0,512
Тип шины	PCI	VME	PCI + мост PCI — RapidIO
Объем энергонезависимой памяти Мбайт	0,032	2,048	1000
Каналы обмена по MIL STD 1553 В	2	4	4
Каналы обмена по ARINC 429 вх/вых	16/8	16/8	16/8
Тип графического интерфейса	—	Fibre Channel / 1 канал 1062,5 Мбит/с	Fibre Channel / 2 канал 1062,5 Мбит/с
Быстродействующие каналы информационного обмена с потребителями	—	Fibre Channel / 1 канал 1062,5 Мбит/с	Fibre Channel / 2 канал 1062,5 Мбит/с
Тип интерфейса для связи с аппаратурой отладки	RS232	Ethernet 10/100 Мбит/с	Ethernet 10/100 Мбит/с
Потребляемая мощность, Вт	100	150	120
Типоразмер конструкции БЦВМ	3 К по ARINC404	4 К по ARINC404	4 К по ARINC404

принципам глубокой функциональной интеграции и единого информационного пространства.

Основой этого решения могут являться сетевые технологии обработки информации, обеспечивающие организацию единой сетевой архитектуры, объединяющей все ее компоненты на уровне как отдельных вычислительных машин, так и функциональных модулей.

В качестве основы такого построения выбираются готовые отработанные в различных отраслях промышленности сетевые технологии Fiber Channel, AFDX (ARINC 664), Rapid IO, PCI Express, Advanced NCA.

Одним из ключевых моментов в конструкторской реализации таких решений является создание платформы интегрированной модульной авионики (ИМА), что, в свою очередь, определяет:

- снижение стоимости срока службы;
- улучшение характеристик полета;
- улучшение эксплуатационных характеристик — 150 летных часов или 30 дней без техобслуживания.

На рис. 4 представлена обобщенная структура КБО боевого самолета на основе платформы модульной авионики (ИМА), которую возможно проектировать на основе БЦВМ с обменом по коммутационной технологии Rapid IO.

Отличие данной схемы от ранее рассмотренной (см. рис. 1) заключается в том, что она построена на базе двух платформ ИМА, удаленных модулей и коммутаторов. Все вычисления бортовых параметров и сигналов управления проводятся в процессорных модулях ИМА. Функции датчиков первичной информации сведены к минимуму. Обмен параметрами в комплексе между процессорными модулями, датчиками и исполнительными устройствами осуществляется коммутаторами. Для связи датчиков и исполнительных устройств служат преобразователи-концентраторы.

Основное концептуальное отличие такой централизованной системы от существующих заключается в том, что функциональное прикладное программное обеспечение не остается резидентным на модулях, на которых оно должно обрабатываться, а может распределяться по всем без исключения процессорным модулям.

В ИМА все программные средства хранятся в устройствах массовой памяти и загружаются в модули, в которых они должны выполняться как часть процессов инициализации и конфигурации системы.

Выводы

Разработаны принципы построения интегрированных комплексов бортового оборудования современных самолетов боевой авиации. Интеграция на аппаратном и алгоритмическом уровнях позволяет создать единую для всего борта многоуровневую, магистрально-модульную, реконфигурируемую информационно-управляющую систему с открытой архитектурой.

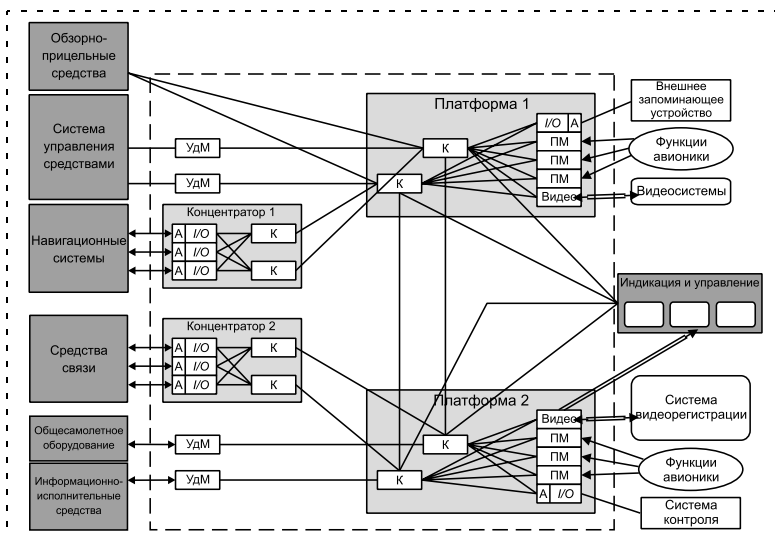


Рис. 4. Обобщенная структурная схема базового комплекса с сетевой структурой обмена

Представлены унифицированные структуры интегрированного КБО для маневренных самолетов нового поколения. Предложен состав вычислительных систем и виды информационных связей комплексов, обеспечивающих решение всего объема задач, толерантность программного обеспечения от аппаратного исполнения вычислительной среды. Приводятся характеристики бортовых вычислительных систем и виды современных информационных связей между бортовыми системами и вычислительной средой интегрированных комплексов на основе коммутационных технологий по стандарту RapidIO.

Список литературы

1. Федосов Е. А. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра. М.: Дрофа, 2005.

2. Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И. и др. Концепция создания интегрированных комплексов БРЭО ЛА нового поколения // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 6.

3. Джанджгава Г. И., Бражник В. М., Рогалев А. П. и др. Построение базовой структуры интегрированных комплексов бортового оборудования летательных аппаратов на основе объектно-ориентированного подхода // Управление, контроль, диагностика. 2000. № 9.

4. Бабаян В. А., Джанджгава Г. И., Федосов Е. А., Федосеев Е. П. Бортовые вычислительные системы перспективных комплексов авионики.

5. Рогалев А. П., Бареев Ф. Х., Никулин А. С., Орехов М. И. Программное обеспечение современных авиационных комплексов // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 6.

6. Никулин А. С., Орехов М. И., Рогалев А. П., Бареев Ф. Х. Создание механизмов независимой разработки и модернизации программного обеспечения авиационных комплексов // Матер. Междунар. конф. и Росс. науч. школы. "Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий". Ч. 5. М.: Изд. МГИЭМ, 2001.

7. Джанджгава Г. И., Рогалев А. П., Никулин А. С., Чарышев Ш. Ф. Перспективы проблемы применения CALS-технологии в авиационном приборостроении. // Там же.

8. ОАО "РПКБ". Регламент по технической эксплуатации изд. РИФ-А. RB-B/СМР-34-00-00-Р

УДК 531.383-11:531.714.7

В. Г. Пешехонов, акад. РАН,

Л. П. Несенюк, д-р техн. наук, проф.,

Д. Г. Грязин, д-р техн. наук,

М. И. Евстифеев, канд. техн. наук, **Я. А. Некрасов**,

В. Д. Аксёненко, канд. техн. наук,

ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург

Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ "Электроприбор"

Обсуждаются последние результаты, полученные ЦНИИ "Электроприбор" в области создания микромеханического гироскопа и бесплатформенных инерциальных систем на его основе. Показано, что разрабатываемый гироскоп может быть использован в системах управления высокодинамичными объектами. Приводятся результаты стендовых испытаний гироскопа, при проведении которых имитировали режимы его функционирования на объекте, обосновываются технические решения, позволяющие создать более совершенную конструкцию датчика.

Первая модификация микромеханического гироскопа

В работе [1] представлен микромеханический гироскоп (ММГ) с инерционной массой в форме диска, разработка которого ведется в ЦНИИ "Электроприбор" с 2001 г.

В качестве базовой была выбрана схема вибрационного RR-гироскопа с внутренней торсионной подвеской, электростатическим возбужде-

нием первичных колебаний, емкостным съемом информации. Конструкция гироскопа ориентирована на технологию "кремний-на-изоляторе".

На рис. 1 представлен внешний вид первой модификации гироскопа — ММГ-1. Электроника системы съема данных и управления ММГ размещена на трех электронных платах размером 21×35 мм и состоит из аналоговой и цифровой частей. На первой плате установлены микромеханический датчик гироскопа — вакуумированный кремниевый модуль (ВКМ) и двухканальный преобразователь емкость—напряжение. На второй плате — элементы опорного генератора, генерирующего несущую частоту опроса емкостных датчиков.

На третьей плате расположен контроллер ММГ-1, который преобразует выходные сигналы преобразователей емкость—напряжение в цифровой код, реализует выбранные алгоритмы фильтрации сигналов и управление инерционной массой, а также формирует цифровой выходной сигнал.

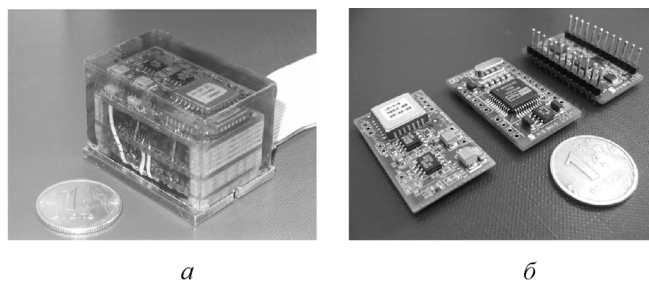


Рис. 1. Микромеханический гироскоп ММГ-1: а — внешний вид ММГ-1; б — электронные платы ММГ-1

Параметр	ММГ-1А	ММГ-1Б	Единицы
Диапазон измерений	±360	±900	°/с
Плотность шума	0,018	0,05	°/с√Гц
Нестабильность нуля	68	200	°/ч
Полоса пропускания (-3 дБ)	40	40	Гц

Разработаны два варианта ММГ-1: с диапазонами измерения 360°/с и 900°/с, основные характеристики которых представлены в таблице.

Характеристики точности ММГ-1 близки к соответствующим характеристикам известных зарубежных аналогов, например, к характеристикам микромеханических гироскопов фирмы Analog Devices, опубликованным на сайте этой фирмы в 2006 г. [2]. При этом гироскопы фирмы Analog Devices для коммерческого использования имеют значительно меньшие размеры, чем ММГ-1. Цена на эти изделия не превышает 50 USD, что в значительной степени обеспечивается за счет их массового производства. В то же время, представленный на этом сайте гироскоп ADIS16120 военного применения, близкий по точности к ММГ-1А, имеет сопоставимые с ним размеры и стоит 775 USD.

Стендовые испытания

Одна из возможных областей применения ММГ-1 — системы управления высокодинамичными объектами. В связи с этим после проведения конструкторских испытаний образцы ММГ-1 были исследованы на специализированных стендах, позволяющих воспроизвести режимы работы датчика в реальных условиях. Испытания выявили недостатки ММГ-1 в заданных условиях работы. Датчик оказался чувствительным к электромагнитным помехам. Кроме того, для использования ММГ-1 в бортовой системе управления выходной сигнал должен иметь не цифровой, а аналоговый вид.



Рис. 2. Блок 303MAB-150

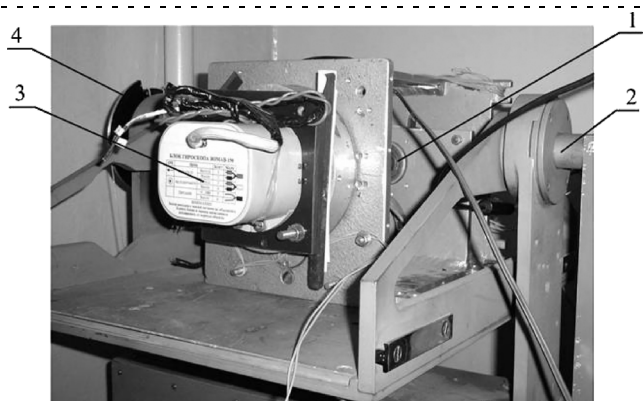


Рис. 3. Общий вид стенда:

1 — привод вращения по крену; 2 — привод колебаний по поперечной оси; 3 — блок 303MAB-150; 4 — потенциометрический датчик угла стенда

Для устранения указанных замечаний на базе ММГ-1 был разработан блок 303MAB-150 (рис. 2), имеющий пермалоевый магнитный экран и цифроаналоговый преобразователь сигнала.

Испытания блока на стенде, воспроизводящем вращательное движение объекта с одновременными его колебаниями (рис. 3), показали, что блок отвечает заданным требованиям, приведенным ниже:

- Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с ±25;
- Диапазон изменения напряжения выходного сигнала, В 0...2;
- Порог чувствительности прибора, °/с 0,15;
- Коэффициент передачи, мВ/°с 40.

Это позволило считать результаты стендовых испытаний удовлетворительными и перейти к подготовке испытаний на объекте [3].

Перспективные модификации датчика

Выявленные недостатки ММГ-1 учтены при разработке микромеханического гироскопа второй модификации — ММГ-2. Внешний вид изделия приведен на рис. 4.

ММГ-2, в отличие от ММГ-1, представляет собой одноплатную конструкцию (рис. 4, а), помещенную в корпус (рис. 4, б). В этом изделии функции аналогового опорного генератора и демодуляторов выходных сигналов преобразователя емкость — напряжение переданы контроллеру. Благодаря этому объем ММГ-2 сократится вдвое по сравнению с ММГ-1. Характеристики точности этого изделия не хуже, чем у предыдущего. Гироскоп имеет аналоговый и цифровой выходы. Существенно сокращено время готовности ММГ-2 по сравнению с ММГ-1.

Дальнейшие работы по совершенствованию ММГ предполагается вести в направлении повышения точности и уменьшения стоимости. Значительному снижению стоимости должно способствовать создание бескорпусного кристалла микромеханического гироскопа.

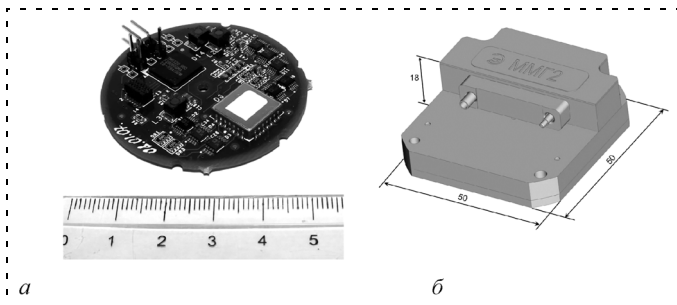


Рис. 4. Микромеханический гироскоп второй модификации: а — плата ММГ; б — внешний вид

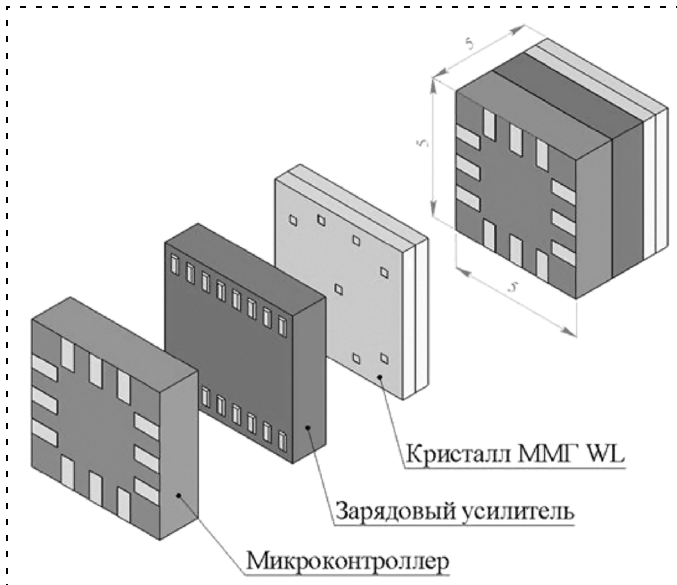


Рис. 5 Микромеханический гироскоп ММГ-3

скопа, который должен быть вакуумирован на этапе технологического процесса совмещения двух кремниевых пластин (wafer). Для этого обе пластины — ротора и крышки изделия — свариваются в вакууме и лишь затем разделяются на отдельные ЧИПы. Разрабатывается специализированная бескорпусная микросхема двухканального преобразователя емкость—напряжение. Гироскоп ММГ-3 состоит из трех кристаллов, смонтированных в едином конструктиве (рис. 5).

Разработка интегрированных систем

Достигнутые в процессе разработки ММГ-1 и ММГ-2 результаты позволили перейти к созданию инерциального измерительного модуля (ИИМ) и интегрированной инерциально-спутниковой системы ориентации и навигации (ИСОН). В ЦНИИ "Электроприбор" накоплен большой опыт разработку бесплатформенных инерциальных модулей и ИСОН на основе волоконно-оптических гироскопов. Созданное программно-математическое обеспечение, методы калибровки и испытаний, ряд конструкторских решений в значительной степени используются при разработке микромеханических систем. Разработан и прошел лабораторные испы-

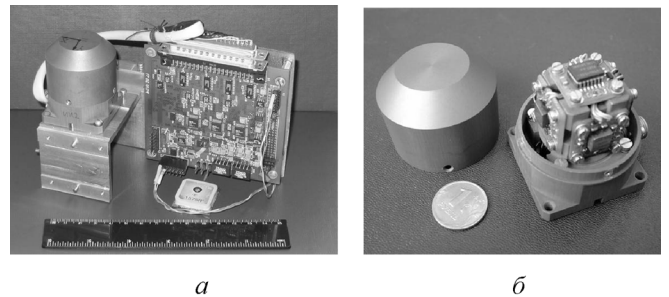


Рис. 6. Экспериментальные образцы: а — макет ИСОН; б — экспериментальный ИИМ

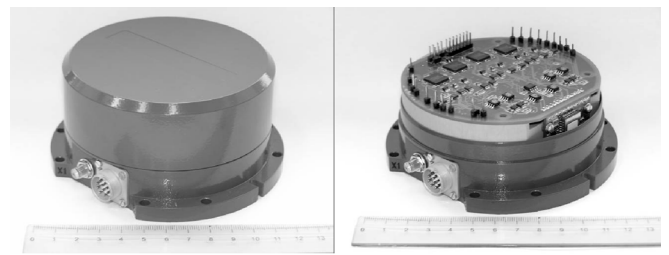


Рис. 7. Опытный образец ИСОН

тания и испытания на автомобиле экспериментальный образец ИСОН, построенный на микромеханических гироскопах и акселерометрах фирмы Analog Devices, микроэлектронном приемнике СНС RGPSM 202 и процессоре TMS320F2810 (рис. 6).

Проведенные испытания позволили определить достижимые характеристики ИСОН, уточнить модели погрешностей и приступить к созданию ИСОН с использованием ММГ собственной разработки. Опытный образец такой ИСОН представлен на рис. 7.

Результаты работы

Таким образом, в последние годы в ЦНИИ "Электроприбор" в области создания микромеханических изделий достигнуты следующие результаты:

- разработаны две модификации микромеханических гироскопов, прошедшие лабораторные и стендовые испытания;
- разрабатываются ИСОН на основе созданных гироскопов;
- разработка ММГ и гироскопических систем на их основе постепенно переходят из стадии ОКР к освоению этих изделий потенциальными потребителями.

(Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 07-08-00699-а)

Список литературы

1. Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П. Микромеханический гироскоп. Проблемы создания и состояние разработки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 32—36.
2. www.analog.com
3. Распопов В. Я., Марков А. П., Иванов Ю. В., Малютин Д. М., Горин А. А., Алагуев Р. В., Матвеев В. В. Демпфирование поперечных колебаний вращающейся по крену ракеты с помощью микрогироскопа // Гироскопия и навигация. 2007. № 1 (56).

УДК 623.094:681.51

И. А. Каляев, член-корр. РАН,
И. А. Шеремет, д-р техн. наук, проф.,
НИИ МВС ЮФУ, г. Таганрог

Военная робототехника: выбор пути

Анализируются пути развития современной военной робототехники. Акцентируется внимание на вопросах управления коллективами роботов, разработки распределенных интеллектуальных программных сред для их быстрого перепрограммирования и обработки соответствующих потоков информации.

Интенсивно ведущиеся в зарубежных странах разработки в области военной робототехники уже сейчас имеют осязаемый практический выход в виде большого количества беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и подводных роботов, принимаемых на вооружение и эффективно применяемых для решения различных задач.

Боевой робот есть не что иное, как безэкипажное средство вооруженной борьбы, в общем случае имеющее в своем составе несущую платформу, способную перемещаться в одной или нескольких физических средах (суша, вода, воздух, космос), и устанавливаемые на этом носителе средства навигации, связи, разведки и поражения. При этом основной особенностью боевого робота является наличие в его составе программируемого информационно-вычислительного комплекса, в идеале обеспечивающего его рациональное поведение в любой обстановке.

Осознание того обстоятельства, что "один робот в поле не воин", обусловило активизацию усилий в направлении развития теории и практики организации функционирования коллективов боевых роботов ("стай", "роев", "туч", "интеллектуальной пыли" и т. п.). Определенным итогом осмысления вопросов робототехнического системобразования стала выпущенная в 2000 г. корпорацией RAND книга Дж. Аркуилла и Д. Ронфельда "Принципы стай и будущие конфликты", в которой авторы, базируясь на результатах анализа эволюции вооруженных конфликтов, достаточно обоснованно формулируют вывод о перспективности так называемого стайного принципа организации боевых действий.

Современные подходы к развитию средств вооружения, как правило, сводятся к их все большему усложнению. Разрабатываются и создаются все более сложные "супертанки", "суперсамолеты", "суперракеты" и т. п., стоимость которых даже при серийном производстве зашкаливает за сотни миллионов долларов. При этом временные сроки проектирования, создания и отладки таких "супермашин" все более увеличиваются и занимают уже не один десяток лет.

В то же время, опыт боевых действий в Ираке, Афганистане, Сербии, да и в Чечне показывает, что все эти "супермашины" оказываются далеко не всегда такими уж эффективными. Они достаточно легко уничтожаются группировками плохо обученных и слабо вооруженных людей, которые используют стайную тактику ведения боевых действий. Под стайей здесь понимается децентра-

лизованная слабосвязанная "организация" боевых единиц, не имеющая ярко выраженного командования, но объединенная общей целью (например, нанесения максимального ущерба противнику), причем каждая из боевых единиц в процессе боестолкновений самостоятельно принимает решение о своих текущих действиях таким образом, чтобы внести максимально возможный вклад в достижение общей цели.

Противоборство между централизованной (единоначальной) и децентрализованной (стайной) тактикой ведения боевых действий идет на протяжении всей истории человечества. При этом, как правило, централизованная тактика применялась богатыми, развитыми государствами, имеющими возможность содержать регулярную армию, а стайная тактика — их бедным, слабо развитым противником. Тем не менее, гунны, татаро-монголы и прочие подобные "варвары", используя стайную тактику ведения боевых действий, достаточно легко побеждали регулярные войска римлян, китайцев и т. д. При этом, что интересно, после того, как варвары "оцивилизовывались", они начинали строить армию по классическим централизованным канонам и в результате через некоторое время теряли свое могущество.

Да что греха таить, стайные принципы ведения боевых действий в некотором смысле использовались и нашей Красной армией в годы Великой Отечественной войны, когда за счет простоты и массовости используемых боевых единиц нашей армии удавалось победить врага, оснащенного существенно более сложной техникой.

Стайная тактика действий в конфликтных ситуациях широко используется и в живой природе. Никакое самое сильное животное или рыба не может справиться с муравьиной колонной, роем ос, стайей пираний или других подобных особей, каждая из которых обладает крайне малыми индивидуальными возможностями, но, собравшись в стаю, "сметает" все на своем пути. Лев ("супермашина") никогда не может одолеть стаю гиен, каждая из которых слабее его на несколько порядков.

Таким образом, к преимуществам стайной тактики ведения боевых действий можно отнести:

1. **Живучесть.** Поскольку стая состоит из большого числа простых боевых единиц, то уничтожение одной из них или даже некоторого множества не приводит к уничтожению всей стаи в целом.

2. **Сокращение финансовых и временных затрат.** Значительно проще, быстрее и дешевле разработать и создать большое число простых боевых единиц, необходимых для организации стаи, чем создать одну "супермашину". При этом замена вышедших из строя или уничтоженных противником "дешевых" боевых единиц, входящих в стаю, не потребует больших финансовых и временных затрат.

3. **Быстрота реагирования.** Поскольку каждая боевая единица, входящая в состав стаи, в процессе боестолкновения принимает решение о своих текущих действиях самостоятельно, не дожидаясь команды "сверху", то время реакции стаи на изменение боевой ситуации резко сокращается.

Почему же тогда стайная тактика ведения боевых действий до сих пор не имеет широкого распространения? По-видимому, это вызвано тремя причинами.

Первая причина — это морально-этическая. Действительно, стайная тактика эффективна в случае массо-

вого использования достаточно простых и, как следствие, слабозащищенных боевых единиц. При этом изначально подразумевается возможность массовых потерь таких простых боевых единиц. Когда под боевой единицей понимается, например, некий робот, то это не вызывает никаких протестов. Однако, если речь идет о людях, то изначально закладываемые в стайную тактику массовые потери становятся неприемлемыми. Не случайно, что стайную тактику ведения боевых действий применяли и применяют либо автократические режимы, для которых жизнь солдат ничего не стоит, либо религиозные фанатики, которые также не заботятся ни о своей, ни о чужой жизни. Здесь можно вспомнить японских самураев, которые являлись примером стаи живых бомб.

Вторая причина, ограничивающая широкое применение стайной тактики ведения боевых действий, связана со следующим. Проблема эффективной координации действий в стае для достижения общей цели требует наличия, с одной стороны, дешевых, а с другой стороны, надежных и высокоскоростных средств обмена информацией между всеми членами стаи. До недавнего времени таких средств не было. Однако в настоящее время средства телекоммуникации развиваются настолько быстро, что проблема внутрискладового обмена уже не представляется принципиально сложной.

Третья причина заключается в отсутствии достаточно проработанной и проверенной на практике теории распределенной обработки информации и коллективного принятия решения при организации внутрискладового взаимодействия.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что с дальнейшим развитием технологий роботизации и телекоммуникаций стайная тактика ведения боевых действий будет завоевывать все более широкое распространение.

Практичность данной концепции доказывается, в частности, наличием и распространением в сфере социального противоборства так называемых сетевых структур, представляющих собой серьезную опасность для безопасности любого самого развитого государства именно благодаря реализации ими стайной тактики организации и проведения деструктивных (в том числе террористических) действий. Децентрализованность и внутренняя слабосвязанность сетевых структур существенно осложняет их оперативную разработку правоохранительными органами и противодействие им традиционными методами.

Эта своеобразная концепция положена в основу ряда конструктивных разработок, ведущихся по заказам управления перспективных исследований (DAPRA) министерства обороны США американскими научными центрами в рамках направлений "Крупномасштабные объединения роботов: биологические истоки и математические основы", "Подходы к интегрированным интеллектуальным системам", "Программное обеспечение для распределенных робототехнических систем" и т. д.

В то же время сводить всю совокупность возможных способов системообразования в сфере военной робототехники к стайной организации коллективов боевых роботов было бы, по-видимому, неправомерно. Чтобы еще на начальной стадии планирования путей развития этой перспективной области военно-технического обеспече-

ния национальной безопасности России "не выплеснуть с водой ребенка", целесообразно задаться системой координат, позволяющей, с одной стороны, максимально охватить пространство возможных подходов к построению (формированию) и применению упомянутых коллективов, а с другой — корректно позиционировать любую частную разработку в этом общем пространстве.

Именно с этой целью в статье "Сетецентричность и роботизация: две стороны облика боевых систем будущего" ("Национальная оборона", 2006, № 3) было введено понятие боевой робототехнической группировки (БРГ), которое, с одной стороны, является конкретизацией понятия коллектива роботов применительно к военной сфере, а с другой — достаточно удобной абстракцией, необходимой для фиксации системного взгляда на военную робототехнику и формирования разумной программы работ в этой области.

БРГ есть совокупность боевых роботов и центров управления, реализующих рациональное коллективное поведение по решению возложенных на нее задач.

Анализируя усилия, прилагаемые зарубежными странами в направлении создания и эффективного применения БРГ, можно выделить следующие ключевые вопросы, вокруг которых концентрируется основной исследовательский ресурс:

1) оптимизация индивидуальных характеристик боевых роботов (как несущих платформ, так и средств их оснащения);

2) изыскание путей формирования массовых БРГ, численность которых сопоставима с численностью частей и соединений массовых армий (в первую очередь, за счет снижения стоимости отдельных роботов);

3) обеспечение максимальной связности БРГ (т. е. возможности информационного обмена между роботами, входящими в группировку, в любых условиях их функционирования) на основе новых коммуникационных технологий;

4) разработка методов и средств обеспечения максимальной адаптивности БРГ, т. е. возможности быстрого перепрограммирования боевых роботов и центров управления в целях гарантированного обеспечения решения возложенных на БРГ задач в прогнозируемой обстановке за счет, главным образом, рационального коллективного взаимодействия.

Среди перечисленных направлений особое место занимает четвертое, успешность реализации которого при прочих равных условиях в решающей степени влияет на боевую эффективность БРГ. Робот (как и в целом БРГ) с "жесткой", т. е. в конечном итоге, предсказуемой, логикой поведения будет вести себя в сходных условиях практически одинаково, что создает благоприятные условия для его (ее) идентификации и нанесения ему (ей) фатального ущерба. Наиболее сложно противостоять БРГ с гибкой, а следовательно, плохо предсказуемой логикой поведения. Еще в 70-х годах прошлого века исследовательский центр ВВС США показал, что наличие у одной из противоборствующих сторон возможностей по перепрограммированию своих боевых компьютеров в течение 48 часов до начала боестолкновения сокращает ее потери на менее чем в два раза. В условиях противоборства БРГ эта цифра, несомненно, имеет тенденцию к резкому увеличению.

В связи с изложенным проблема обеспечения адаптивности БРГ, которая подлежит решению для достижения достаточно высокого уровня их интеллектуальности, а значит, и боевой эффективности, распадается на две взаимосвязанные задачи:

1) создание распределенной интеллектуальной программной среды (РИПС) универсального комплекса средств для быстрого перепрограммирования боевых роботов и центров управления БРГ, а также последующей реализации роботами распределенной обработки потоков информации, коллективного формирования и реализации решений в соответствии с текущим состоянием их памяти ("баз знаний");

2) разработка и реализация средствами РИПС методов рационального применения различных (в том числе массовых) БРГ для решения различных классов боевых задач как самостоятельно, так и в составе смешанных ("робото-войсковых") формирований.

Совокупность подобных методов образует систему знаний "робототехнического военного искусства", которая при правильной организации работ должна постоянно пополняться самыми разными тактическими приемами и способами применения БРГ, сочетающимися в се-

бе достоинства стайных, командно-иерархических и любых иных принципов ведения боевых действий.

Следует отметить, что отечественная наука обладает созданным еще в 80-е годы серьезным заделом как в части методов управления коллективами роботов, так и в части распределенных интеллектуальных программных сред (заинтересованный читатель найдет соответствующие материалы в монографиях И. А. Каляева, А. Р. Гайдука, С. Г. Капустяна "Распределенные системы планирования действий коллективов роботов", М: Янус-К, 2002, и И. А. Шеремета "Интеллектуальные программные среды для АСОИ", М.: Наука, 1994). Проблема состоит только в том, чтобы своевременно и грамотно воспользоваться этим заделом.

Вместе с тем, реализация любого задела в современных условиях функционирования российского ОПК — процесс далеко не простой и, естественно, протяженный во времени. Поэтому еще более назревшая проблема — ускоренная разработка мер и средств эффективной нейтрализации угроз со стороны боевых робототехнических группировок потенциальных противников. Промедление в решении этой проблемы чревато самыми серьезными последствиями.

УДК 681.511.4

В. Х. Пшихопов, канд. техн. наук, доц.,
Технологический институт ЮФУ, г. Таганрог

Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями

Рассматривается вопрос управляемости мобильных роботов и предлагаются структурно-алгоритмические решения для управления автономными мобильными роботами при их движении в среде с препятствиями. При этом препятствия трансформируются в репеллеры посредством синтезируемых управлений. Приведены примеры синтеза и результаты моделирования.

Введение

В связи с расширяющейся сферой использования автономных мобильных роботов (АМР) в различных отраслях человеческой деятельности к структурно-алгоритмической реализации их систем управления предъявляются новые, все более жесткие требования. В первую очередь, это касается организации движения АМР в априори неформализуемых средах в случае наличия стационарных и нестационарных препятствий. С нашей точки зрения, основные проблемы при синтезе и реализации таких систем управления определяются рядом факторов [1]. Первый из них заключается в сепарации исходно многосвязных моделей объектов управления, что, с одной стороны, упрощает

процедуру синтеза и структуру системы управления, с другой стороны, не позволяет достичь требуемых качественных показателей функционирования замкнутой системы. Так, например, использование линейных ПИД-регуляторов в каналах продольного и поперечного движения дирижабля или летательного аппарата допустимо и эффективно в случае присутствия в контуре управления оператора-пилота, компенсирующего динамические эффекты, неучтенные в процедуре синтеза. Использование же классических подходов к синтезу регуляторов АМР может не только не позволить достичь требуемых количественных показателей, предъявляемых к точности отработки спланированных траекторий, но и привести к потере качественных свойств замкнутой системы и, в частности, устойчивости. На рис. 1 представлены результаты моделирования поведения объекта, рассмотренного в работе [2], замкнутого линейными регуляторами и векторным синергетическим регулятором, синтезированным там же с учетом нелинейности и многосвязности математической модели объекта, без учета ограничений на управляющие воздействия. Очевидно, что при нарушении допущений, принимаемых при синтезе регуляторов по сепарированной модели, замкнутая система не обеспечивает заданной точности, а в случае ограничений на управляющие воздействия может и утратить свойство устойчивости спланированной траектории.

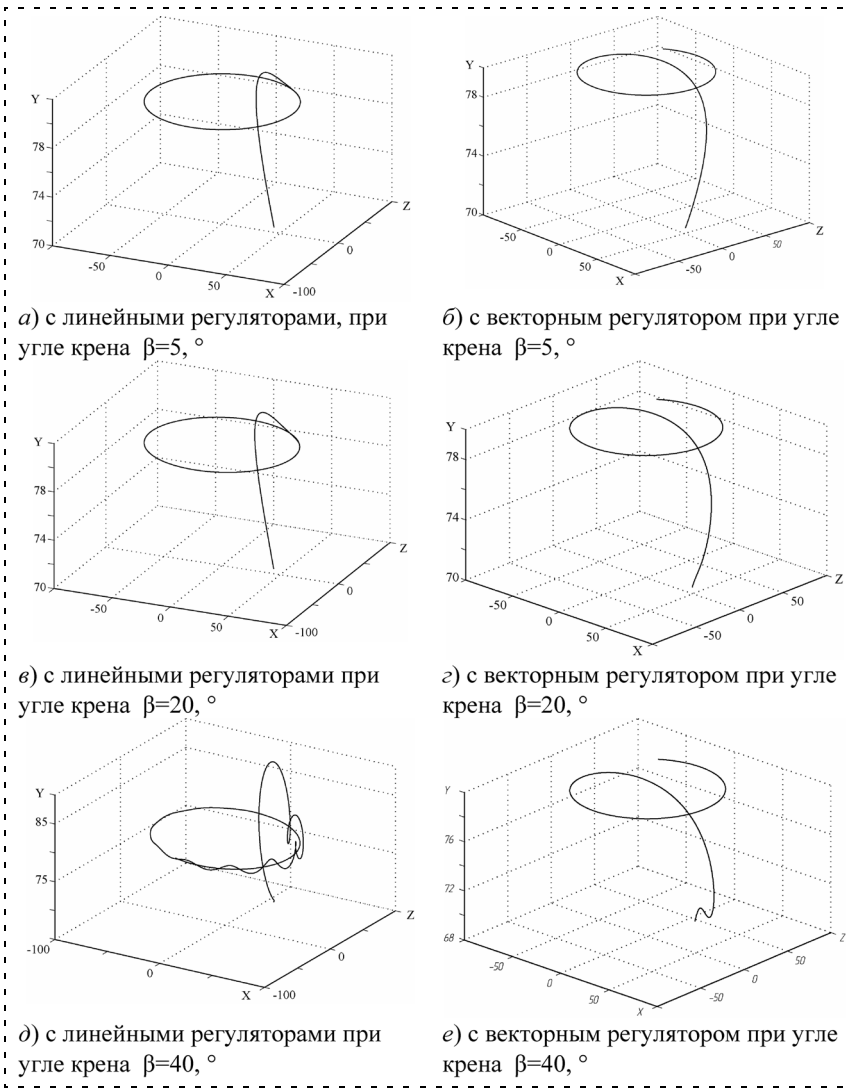


Рис. 1. Результаты сравнительного моделирования поведения замкнутой системы

Вторым фактором, определяющим возможность организации заданного характера движения АМР в среде с препятствиями, является отсутствие эффективных методов сопряжения подсистем планирования перемещений (стратегического уровня системы управления) с тактическим, регуляторным уровнем. Известные подходы к конструированию систем управления АМР предполагают включение в их структуру, представленную на рис. 2 (см. третью сторону обложки), блоков аппроксимации, решения обратной задачи кинематики и интерполяции, что приводит к дополнительной погрешности в расчет уставок на приводы исполнительных механизмов, а следовательно, и в отработку спланированных траекторий. Кроме того, включение дополнительных блоков в структуру системы управления может приводить к снижению надежности замкнутой системы в целом. Различные структурно-алгоритмические аспекты реализации связи между подсистемой планирования переме-

ний на базе нейроподобных структур и нейросетей с синергетическими регуляторами рассмотрены, соответственно, в работах [3, 4, 5] и [9] и представлены на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

В работах [1–9] уже рассмотрены некоторые вопросы синтеза и реализации систем управления АМР, обеспечивающих их движение вдоль траекторий, заданных квадратичными формами базовых координат, позволяющих реализовать обход стационарных и нестационарных препятствий. Представленные в указанных работах результаты синтеза синергетических регуляторов базируются на положениях теории структурного синтеза Л. М. Бойчука, изложенных им в 60–70-х годах прошлого века, в частности в работе [10], и развивают представленные в них подходы на класс мобильных роботов. Так, например, в работе [1] нестационарные и стационарные препятствия предложено трансформировать в отталкивающие многообразия — репеллеры, охватывая их притягивающими многообразиями — аттракторами.

В предлагаемой статье рассматривается процедура организации репеллеров в смысле определения, данного в работе [1].

1. Математическая модель объекта и качественный анализ управляемости

Известно множество определений управляемости [11]. В дальнейшем под управляемостью будем понимать сле-

дующее: объект называется полностью управляемым в области $Q \subset R^n$, если для любой пары точек $\bar{x}^0, \bar{x}^f \in Q$ существует допустимое управление $\bar{u}(\bar{x}, t)$ на конечном интервале времени $[t_0, t_f]$, переводящее объект из точки $\bar{x}(t_0) = \bar{x}^0$ в сколь угодно малую окрестность точки $\bar{x}(t_f) = \bar{x}^f$. Здесь \bar{x} — n -мерный вектор пространства состояний.

Оценка свойства управляемости, в смысле данного определения, является необходимой для планирования корректных перемещений АМР и формирования соответствующих законов управления.

Известные на сегодня подходы к исследованию управляемости нелинейных систем, а большинство АМР, в общем случае, описываются многосвязными системами существенно нелинейных дифференциальных уравнений, или позволяют получить частные, во многом эмпирические решения [12], или же рассматривают скалярные уравнения [11], неадекватные динамике многосвязных систем.

В данной статье предлагается подход, основанный на использовании матрицы условия общности положения [13], невырожденность которой характеризует существование оптимального управления, а значит и наличие свойства управляемости у рассматриваемого объекта [14].

В дальнейшем набор координат, однозначно описывающий положение мобильного робота в пространстве внешних (базовых, инерциальных, абсолютных) координат (положение центра тяжести мобильного робота в системе внешних координат, ориентацию осей связанной с ним системы координат относительно осей внешней системы), будем называть вектором *внешних* координат Y и предполагать измеряемость всех его элементов, а набор непосредственно управляемых координат (скорость вращения ведущих колес, угол поворота ведомого колеса, линейные и угловые скорости робота и т. п.) будем называть вектором *внутренних* координат x и также предполагать измеряемость всех его элементов.

Пусть модель динамики АМР и его кинематические свойства описываются в виде системы следующих дифференциальных уравнений:

$$\dot{x} = M^{-1}(F_u - F_d - F_v); \quad (1)$$

$$\dot{\delta} = KU; \quad (2)$$

$$\dot{Y} = \Sigma(\Theta, x) = \begin{pmatrix} \Sigma_P(\Theta, x) \\ \Sigma_\Theta(\Theta, x) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где x — m -мерный вектор внутренних координат; M — $(m \times m)$ -мерная матрица массоинерционных параметров, элементами которой являются масса, моменты инерции, присоединенные массы АМР; $F_u(x, Y, \delta, l)$ — m -мерный вектор управляющих сил и моментов, здесь l — вектор конструктивных параметров; $F_d(x, Y, l)$ — m -мерный вектор нелинейных элементов динамики АМР; F_v — m -мерный вектор измеряемых и неизменяемых внешних возмущений; δ — m -мерный вектор управляемых координат (углы отклонения рулей, рычагов управления тягой двигателя и т. п.); K — $(m \times m)$ -мерная матрица коэффициентов управления; U — m -мерный вектор управляющих воздействий; $Y = (P, \Theta)^T$ — n -мерный вектор положения P и ориентации Θ связанной системы координат относительно базовой, $n \leq 6$; $\Sigma(\Theta, x)$ — n -мерный вектор кинематических связей; $\Sigma_P(\Theta, x)$ — вектор линейных скоростей связанной системы координат относительно базовой; $\Sigma_\Theta(\Theta, x)$ — вектор угловых скоростей связанной системы координат относительно базовой.

Модели динамики подвижного объекта вида (1), (2) и (3) представляют собой многосвязные системы нелинейных дифференциальных уравнений, элементы которых определяются компоновкой и

параметрами конкретного АМР, а также структурой и характером внешних возмущений.

Запишем матрицу условия общности положения (УОП) [13] для объекта (1)–(3) в виде

$$D = (B_1, B_2, \dots, B_\mu), \quad (4)$$

где μ — порядок системы (1)–(3), в данном случае определяется размерностью вектора $z = |x \ \delta \ Y|^T$ ($\mu = 3$); B_i — столбцы матрицы УОП, определяемые как

$$B_i = \frac{\partial B_{i-1}}{\partial z^T} (F + B\tilde{U}) - \left(\frac{\partial F}{\partial z^T} + \frac{\partial B}{\partial z^T} \tilde{U} \right) B_{i-1},$$

$$B_1 = B, \quad i = \overline{1, \mu}.$$

Здесь $F = |M^{-1}(F_u - F_d - F_v) \ 0 \ \Sigma|^T$;

$B = |0 \ K \ 0|^T$; $\tilde{U} = U$; 0 — матрицы нулевых элементов соответствующей размерности.

С учетом приведенных выражений и того факта, что матрица K не является функцией координат z , получим следующую матрицу УОП для объекта (1)–(3):

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -M^{-1} \frac{\partial F_u}{\partial \delta^T} K e_1 + \frac{\partial (F_u - F_d)}{\partial x^T} M^{-1} \frac{\partial F_u}{\partial \delta^T} K & \\ K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \Sigma}{\partial x^T} M^{-1} \frac{\partial F_u}{\partial \delta^T} K \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где $e_1 = -M^{-1} \left(\frac{\partial^2 F_u}{\partial \delta^T \partial x^T} K M^{-1} F_1 + \frac{\partial^2 F_u}{\partial (\delta^T)^2} K^T K u + \frac{\partial^2 F_u}{\partial \delta^T \partial Y^T} K \Sigma \right)$, здесь $F_1 = M^{-1}(F_u - F_d - F_v)$.

Принимая во внимание условие существования оптимального управления [4], с учетом полученной матрицы УОП сформулируем следующее утверждение: объект (1)–(3) является полностью управляемым в смысле приведенного определения в том случае, если определитель матрицы УОП (5) не равен нулю и, следовательно, выполняются следующие условия:

$$\det M^{-1} \neq 0; \det K \neq 0; \det \frac{\partial \Sigma}{\partial x^T} \neq 0; \det \frac{\partial F_u}{\partial \delta} \neq 0. \quad (6)$$

Первое из условий (6) отражает невозможность управления объектом с бесконечно большими массоинерционными параметрами, второе условие определяет работоспособность всех приводов АМР, третье условие характеризует корректность равенства (3). Что касается четвертого условия, то оно совпадает с определением управляемости, принятым в авиационной технике и подразумевает способность АМР реагировать на воздействия δ , предназначенные для перехода от одного режима движения к другому [15].

Приведенное утверждение снимает вопрос о необходимости детерминантного условия при исследовании управляемости лагранжевых систем [16] и, в отличие от процедур исследования управляемости, приведенных в [17], позволяет делать выводы об управляемости объекта на структурном уровне.

При пренебрежении динамикой приводов АМР описывается уравнениями (1), (3), и условие управляемости сводится к первому и третьему неравенствам из (6).

Строго говоря, при невыполнении условия (6) оценка неуправляемости, в смысле данного выше определения, требует дополнительных исследований. Следует также отметить, что предлагаемые для оценки управляемости выражения (6) и связанные с ними процедуры не учитывают ограничений на управления, что не позволяет дать количественных оценок свойства управляемости, но, в тоже время, позволяют качественно оценить подмножества фазового пространства для каждого конкретного АМР, в которых решение задач управления может быть невыполнимо в силу структурных, кинематических и динамических особенностей объекта.

2. Организация репеллеров при обходе препятствий

Сформулируем задачу организации репеллеров при движении мобильного робота, описываемого системой уравнений (1), (3), в среде с препятствиями.

Пусть целевое движение АМР в пространстве $R^{m \times m}$ базовых координат Y и скоростей \dot{Y} в общем случае задается системой уравнений следующего вида [5, 7]:

$$\Psi = \Psi_{tr} + A\Psi_{ck} = 0;$$

$$\Psi_{tr} = \begin{pmatrix} P^T A_{11} P + A_{12} P + A_{13} \\ P^T A_{21} P + A_{22} P + A_{23} \\ P^T A_{31} P + A_{32} P + A_{33} \\ \Phi_1(P, \Theta) \\ \Phi_2(P, \Theta) \\ \Phi_3(P, \Theta) \end{pmatrix} = 0;$$

$$\Psi_{ck} = J_s \dot{Y} + \tilde{V} = 0; \dim \Psi_{tr} = \dim \Psi_{ck} = n;$$

$$\tilde{V} = (0, 0, \xi(V^2 - V^{*2}), 0, 0, 0);$$

$$J_s = \left(2P^T A_{11}, 2P^T A_{21} + A_{22}, \right.$$

$$\left. 2P^T A_{31} + A_{32}, \frac{\partial \Phi_1}{\partial Y^T}, \frac{\partial \Phi_2}{\partial Y^T}, \frac{\partial \Phi_3}{\partial Y^T} \right)^T, \quad (7)$$

где A — матрица задаваемых параметров; $\dim A = (n \times n)$, в данном случае $n = 6$, требования к элементам матрицы A рассмотрим ниже; A_{ij} — матрицы коэффициентов соответствующей размерности,

определяющие вид желаемой траектории движения в R^m , формируемой планировщиком перемещений [5, 9] на основе данных сенсорных систем; Φ_k — дважды дифференцируемая функция своих аргументов, отражающая желаемые требования к углам ориентации АМР; ξ — параметр, принимающий значение 0 или 1 (для случая движения с заданной скоростью); V, V^* — скорость АМР и ее желаемое значение.

Многообразия (7), по существу, задают желаемые требования к установившемуся режиму АМР. В зависимости от поставленной задачи многообразия (7) при различных значениях матриц A_{ij} могут описывать желаемое движение АМР из произвольной точки фазового пространства базовых координат в заданную с ненулевой скоростью; обеспечить движение робота вдоль траекторий во всем классе квадратичных форм с заданной траекторной скоростью; осуществить перемещение робота вдоль заданной траектории в заданную точку без предъявления дополнительных требований к траекторной скорости.

При решении задач контурного (траекторного) управления в общем случае имеем следующие значения матриц A_{ij} :

$A_{k1} \neq 0, A_{k2} \neq 0, A_{k3} \neq 0, k = 1, \overline{v-1}$, здесь v — размерность пространства задачи, $v = 2$ — для плоских задач, $v = 3$ — для трехмерных задач; $A_{v1} \equiv 0, A_{v2} \equiv 0, A_{v3} \equiv 0, \xi = 1, V^* \neq 0$ [1, 7]. При решении задач позиционного управления $A_{k1} \equiv 0, A_{k2} \equiv 1, A_{k3} \neq 0, k = \overline{1, v}, \xi = 0$ [1, 7].

Предположим также, что в зоне движения АМР расположено препятствие Π и известны координаты x_p, y_p, z_p его характерной точки P_p .

Постановка задачи заключается в следующем: для АМР, описываемого системой уравнений (1), (3), необходимо синтезировать такой закон управления $F_u(P, x)$, который обеспечивал бы асимптотическую устойчивость многообразия (7), трансформируя их в аттракторы, а препятствие Π , положение характерной точки которого описывается вектором $P_p = [x_p, y_p, z_p]^T$, трансформируя в репеллер, т. е. отталкивающее многообразие с радиусом обхода, не превышающим значения r .

Следует отметить, что в отличие от постановки задачи, сформулированной в [1], в данном случае для расчета траектории обхода препятствия не требуются значения скорости и ускорения, с которыми перемещается препятствие Π .

Используя процедуры синтеза, изложенные в [1, 2, 7], получим следующие алгоритмы управления:

$$F_U = -K_0^{-1} K_1 + (F_d + \tilde{F}_v); \quad (8)$$

$$K_0 = \tilde{T} \tilde{A} J M^{-1};$$

$$K_1 = \begin{vmatrix} K_{1s}\Sigma_p + \Psi_{tr} \\ \Psi_v \\ T_\varphi A_\varphi J_\varphi J_{\Sigma\theta}\Sigma_\theta + K_{1\varphi}\Sigma + \varphi \end{vmatrix},$$

где \tilde{F}_v — вектор оценок измеряемых и неизменяемых возмущений; \tilde{T} , \tilde{A} , J , K_{1s} , Ψ_v , T_φ , A_φ , J_φ , $J_{\Sigma\theta}$, $K_{1\varphi}$ — функциональные коэффициенты, имеющие следующую структуру:

$$\tilde{T} = \begin{vmatrix} T & 0 & 0 \\ 0 & 2T_g & 0 \\ 0 & 0 & T_\varphi \end{vmatrix}; \quad \tilde{A} = \begin{vmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & A_\varphi \end{vmatrix};$$

$$J = \begin{vmatrix} J_s^* J_{\Sigma px} & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_p^T J_{\Sigma px} & 0 \\ 0 & 0 & J_\varphi J_{\Sigma x} \end{vmatrix};$$

$$K_{1(\cdot)} = TA\Gamma(\cdot) + (T + A)J(\cdot);$$

$$J_s^* = (2P^T A_{k1} + A_{k2}), \quad k = \overline{1, v-1}; \quad J_\varphi = \frac{\partial \Phi}{\partial Y^T};$$

$$\Gamma(\cdot) = \frac{d(J(\cdot))}{dt};$$

$$\Psi_v = \dot{P}^T \dot{P} - V_k^2;$$

$$J_{\Sigma\theta} = \frac{\partial \Sigma}{\partial \theta^T}; \quad J_{\Sigma px} = \frac{\partial \Sigma_p}{\partial x^T}; \quad J_{\Sigma x} = \frac{\partial \Sigma}{\partial x^T},$$

здесь T_g — константа, определяющая характер изменения траекторной скорости V_k в переходном режиме; T_φ — матрица констант соответствующей размерности, определяющая характер переходных процессов по углам ориентации АМР; T — диагональная $(v-1) \times (v-1)$ -мерная матрица, определяющая характер движения АМР относительно траекторного многообразия Ψ_{tr} .

Подставив уравнение (8) в уравнение модели (1), получим следующие дифференциальные уравнения, описывающие поведение АМР при его движении вдоль многообразия Ψ_{tr} :

$$TA\ddot{\Psi}_{tr} + (T + A)\dot{\Psi}_{tr} + \Psi_{tr} = 0.$$

Очевидно, что при выборе векторной функции Ляпунова вида $L = \Psi_{tr}^T \Psi + \dot{\Psi}_{tr}^T D \dot{\Psi}_{tr}$ при выполнении условия $TA = D$ получим следующее выражение для скорости ее изменения:

$$\frac{dL}{dt} = -2(T + A)\dot{\Psi}_{tr}^T \dot{\Psi}_{tr}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что устойчивый характер движения АМР вдоль траектории Ψ_{tr} обес-

печивается при положительной определенности суммы матриц T и A .

Возникает вопрос: как, в соответствии с поставленной задачей, трансформировать препятствие Π , описываемое координатами X_p, Y_p, Z_p его характерной точки P_p , в репеллер?

Очевидно, что в некоторой задаваемой r -зоне точки P_p сумма матриц T и A должна быть отрицательно определенной. Без потери общности предположим, что $T = A = \text{diag} S_i, i = \overline{1, v-1}$, где S_i — некоторый функциональный параметр, который зададим выражением

$$S_i = a_{oi} - \frac{R_i^2}{\varepsilon^2}, \quad (10)$$

где $\varepsilon^2 = (X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2 + (Z - Z_p)^2$.

Из выражения (10) следует, что при конечных значениях констант a_{oi} и R_i в зоне больших отклонений от препятствия значение параметра S_i будет стремиться к значению константы a_{oi} , которая и будет определять динамику движения АМР относительно многообразия Ψ_{tr} , т. е. $\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} S_i = a_{oi}$. В зоне же препятствия будет справедливо выражение $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} S_i = -\infty$, что в силу условия (9) превращает препятствие Π в неустойчивую точку, т. е. репеллер. При этом граница неустойчивости определяется очевидным выражением

$$r_i = \frac{R_i}{\sqrt{a_{oi}}}.$$

Таким образом, формируя элементы матриц T и A в соответствии с зависимостью вида (10), мы обеспечиваем устойчивый характер движения АМР вдоль многообразия Ψ_{tr} , за исключением r -окрестности точки P_p .

При $v = 3$ траектория движения АМР определяется пересечением двух квадратичных форм, скорость притяжения к ним может быть различной, заданной посредством соответствующего значения параметров a_{oi} .

3. Пример синтеза регулятора с репеллером

Рассмотрим движение АМР на базе колесной тележки, имеющей переднее рулевое колесо и два задних ведущих колеса, управляемых одним приводом.

Математическая модель АМР имеет вид (1), (3), где

$$x = \begin{vmatrix} \omega \\ \beta \end{vmatrix}; \quad M^{-1} = \begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{vmatrix}; \quad (11)$$

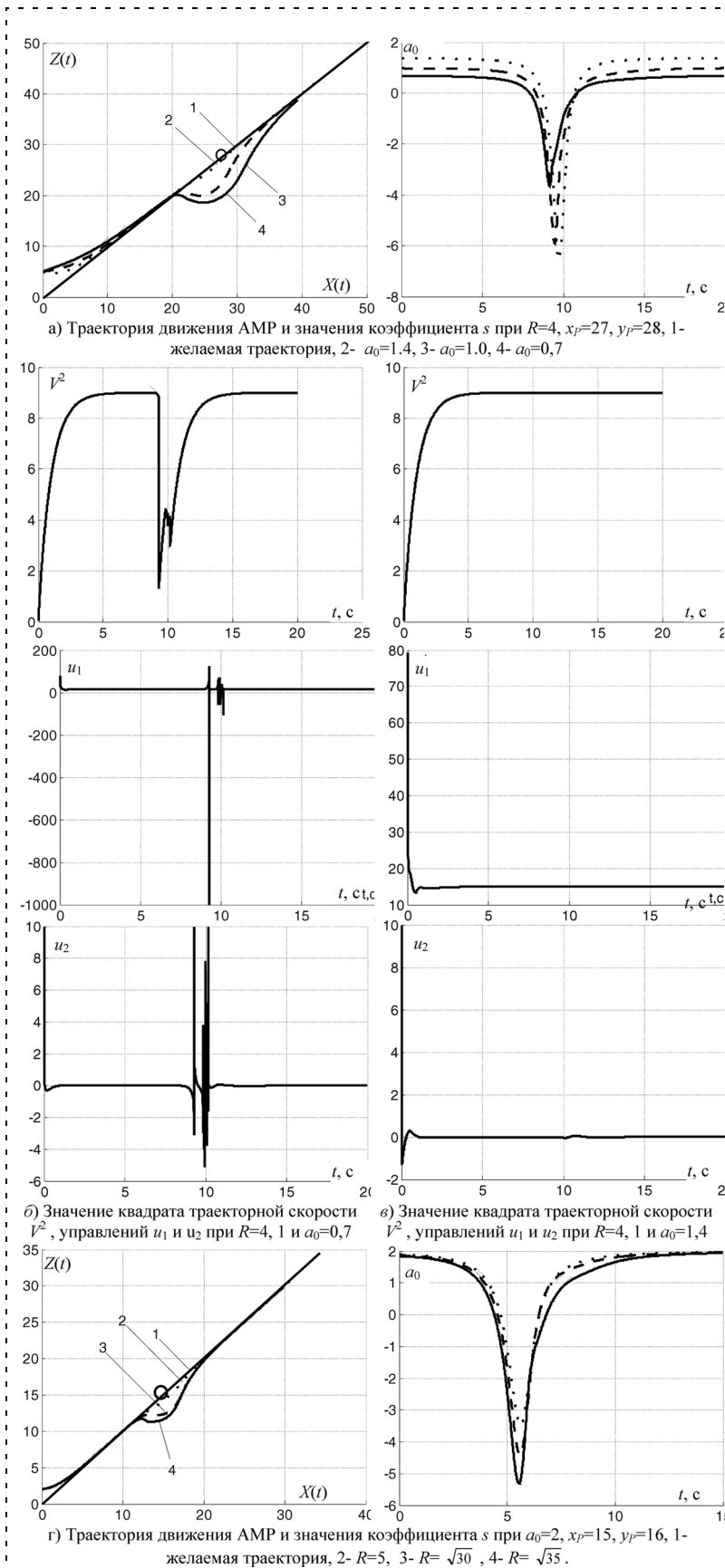


Рис. 4. Результаты моделирования

$$F_v \equiv 0; M^{-1}F_d = \begin{vmatrix} -\alpha\omega \\ 0 \end{vmatrix};$$

$$\Sigma_p = \begin{vmatrix} r^* \omega \left(c\beta c\alpha - h \frac{s\beta c\alpha}{d} \right) \\ r^* \omega \left(c\beta s\alpha + h \frac{s\beta c\alpha}{d} \right) \end{vmatrix}; \Sigma_0 = \left| \frac{r^* \omega s\beta}{d} \right|;$$

$$s(\cdot) = \sin(\cdot); c(\cdot) = \cos(\cdot),$$

здесь ω — угловая скорость задних колес; β — угол поворота рулевого колеса; α — угол ориентации продольной оси тележки относительно базовой системы координат; $r^*, h, d, \alpha, b_1, b_2$ — конструктивные параметры.

Требуется организовать движение АМР (1), (3), (11) вдоль прямой $y = x$ с траекторной скоростью $V_k = 3$ м/с. Известно положение препятствия, описываемого вектором $P_p = |x_p z_p|^T$.

В соответствии с заданием имеем следующие выражения для вычислений управления (7):

$$\Psi_{tr} = \begin{vmatrix} z-x \\ 0 \end{vmatrix}; \Psi_v = \Sigma_p^2(1) + \Sigma_p^2(2) - V_k^2;$$

$$A_{11} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}; A_{12} = |-1 \ 1|; A_{13} = 0; \quad (12)$$

$$J_{\Sigma x} = \begin{vmatrix} r^* \left(c\beta c\alpha - \frac{hs\beta s\alpha}{d} \right) & r^* \omega \left(-s\beta c\alpha - \frac{hc\beta s\alpha}{d} \right) \\ r^* \left(c\beta s\alpha + \frac{hs\beta c\alpha}{d} \right) & r^* \omega \left(-s\beta s\alpha + \frac{hc\beta c\alpha}{d} \right) \end{vmatrix};$$

$$J_{\Sigma px} = J_{\Sigma x};$$

$$J_{\Sigma \theta} = \begin{vmatrix} r^* \omega \left(-c\beta s\alpha - h \frac{s\beta c\alpha}{d} \right) \\ r^* \omega \left(c\beta c\alpha - h \frac{s\beta s\alpha}{d} \right) \end{vmatrix};$$

$$J_\varphi \equiv 0; J_s^* = |-1 \ 1|;$$

$$J = \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ \Sigma_p(1) & \Sigma_p(2) \end{vmatrix} J_{\Sigma x}; K_{1\varphi} \equiv 0;$$

$$K_{1s} = |-2S \ 2S|; T = A = \begin{vmatrix} S & 0 \\ 0 & a_0 \end{vmatrix},$$

здесь $\Sigma_p(1), \Sigma_p(2)$ — элементы вектора Σ_p . Результаты моделирования АМР (1), (3), (11), замкнутого управлением U (7), (12), представлены на рис. 4 и полностью подтверждают изложенные выше положения.

4. Реализация систем управления

Эффективность алгоритмов вида (7) подтверждена реализацией систем управления колесного АМР "Скиф", представленного на рис. 5, и АМР "Стерх" на базе мини-дирижабля [18, 19], представленного на рис. 6.

АМР "Скиф" был создан в 2002 г. в Таганрогском государственном радиотехническом университете (ТРТУ) для участия в соревнованиях мобильных роботов, проводимых в рамках ежегодного Всероссийского фестиваля молодежи "Мобильные роботы" (Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова).

На фестивале "Мобильные роботы—2005" (г. Монт-ля-Жоли, Франция) мобильный робот "Скиф" занял первое место в упражнении "Картографирование". Следует отметить, что данный проект является не только реализацией новых научных подходов к разработке систем управления мобильными роботами, но, что не менее важно, играет значительную роль в организации учебного процесса.

Действующий образец АМР "Стерх" на базе мини-дирижабля [18, 19] реализован в ноябре 2004 г. при финансовой поддержке программ Минобрнауки РФ. Система управления дирижаблем использует интеллектуальные технологии планирования, обеспечивающие перемещение АМР вдоль заданных траекторий. Указанная разработка позволяет



Рис. 6. Внешний вид АМР "Стерх"

автоматизировать процессы мониторинга, значительно снизить стоимость их проведения, минимизировать участие в них человека, а также оперативно вырабатывать стратегии движения в зависимости от состояния собственных параметров и воздействия окружающей среды.

Заключение

Предложенные в работе процедуры анализа управляемости и организации репеллеров в пространстве движения АМР позволяют организовать корректное перемещение АМР в априори неформализуемых средах. В отличие от известных подходов полученные структурно-алгоритмические решения не требуют знания значений скоростей и ускорений препятствий. Полученные результаты могут быть использованы в задачах группового управления, в системах управления беспилотных летательных аппаратов и т. д.

Список литературы

1. Пшихопов В. Х. Атракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Изв. ТРТУ. Темат. вып. Перспективные системы и задачи управления. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006, № 3 (58). С. 117—123.
2. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оценением возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. № 1. С. 103—109.
3. Чернухин Ю. В., Пшихопов В. Х., Писаренко С. Н., Трубачев О. Н. Программная среда для моделирования поведения адаптивных мобильных роботов с двухуровневой системой управления // Мехатроника. 2000. № 6. С. 26—30.
4. Чернухин Ю. В., Пшихопов В. Х., Писаренко С. Н., Трубачев О. Н. Программно-аппаратный комплекс моделирования нейросетевых систем управления интеллектуальных мобильных роботов // Мехатроника. 2002. № 1. С. 27—29.
5. Пшихопов В. Х., Сиротенко М. Ю. Структурно-алгоритмическая реализация системы управления автономным мобильным роботом с нейросетевым планировщиком перемеще-



Рис. 5. Внешний вид АМР "Скиф"

ний // Изв. ТРТУ. Темат. вып. "Интеллектуальные САПР". Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. № 3. С. 185—191.

6. Пшихопов В. Х., Корнеев И. Г. Структурно-алгоритмическая реализация комбинированной системы управления движением интеллектуальных мобильных роботов в экстремальных средах // Изв. ТРТУ. Темат. вып. "Интеллектуальные САПР". Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. № 3. С. 191—196.

7. Пшихопов В. Х. Устройство позиционно-траекторного управления мобильным роботом. Патент РФ № 2185279, бюл. № 20, 2002.

8. Чернухин Ю. В. Пшихопов В. Х., Писаренко С. Н. Трубачев О. Е. Устройство управления адаптивным мобильным роботом". Патент РФ № 2187832, бюл. № 23, 2002.

9. Pshikhopov V., Chernukhin Y. Path Following Regulator for Neural Network Implemented Control System of Adaptive Mobile Robot Moving with a Set Speed // Proc. of Int. Conf. "Mathematical Theory of Network and Systems", Perpignian, France, June 19—23, 2000.

10. Бойчук Л. М. Структурный синтез автоматических многоуровневых систем функционального управления динамическими объектами. Препринт 74—23. Киев: Изд-во института кибернетики АН УССР, 1974.

11. Крищенко А. П. Исследование управляемости и множеств достижимости нелинейных систем управления // АиТ. 1984. № 6. С. 30—36.

12. Жаринов А. В., Чижова Н. Т. Динамика и аэродинамика дирижаблей (по материалам открытой иностранной печати). Обзор № 704. М.: Изд. отдел ЦАГИ. 1990. 128 с.

13. Олейников В. А. Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. Л.: Недра, 1982. 216 с.

14. Пшихопов В. Х. Об управляемости манипуляционных роботов // Тез. докл. 3-й международной конференции "Системный анализ—93", г. Ташкент, 1993.

15. Мхитарян А. М., Лазнюк П. С., Максимов В. С. и др. Динамика полета. М.: Машиностроение, 1978. 424 с.

16. Пятницкий Е. С. Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями // АиТ. 1996. № 12. С. 29—37.

17. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. М.: Таганрог, 1994.

18. Пшихопов В. Х. Дирижабли: перспективы использования в робототехнике // Мехатроника, автоматизация и управление. 2004. № 5. С. 15—20.

19. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Сиротенко М. Ю., Носко О. Э., Юрченко А. С. Проектирование систем управления роботизированных воздухоплавательных комплексов на базе дирижаблей // Изв. ТРТУ. Темат. вып. Перспективные системы и задачи управления. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. № 3 (58). С. 160—167.

УДК 681.51:007.52:631.324

А. А. Евсеев, В. П. Носков, канд. техн. наук, доц., МГТУ им. Н. Э. Баумана,

А. К. Платонов, д-р физ.-мат. наук, проф., ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Формирование электронной карты при автономном движении в индустриальной среде*

Обсуждается подход к решению задачи картографического обеспечения процессов управления движением мобильных роботов. Приводится способ формирования бортовыми средствами в автоматическом режиме картографической базы данных среды передвижения, позволяющий использовать ее не только для возврата в точку старта, но и для организации автономного движения в данной среде.

Задача картографического обеспечения процессов управления движением является одной из важных в мобильной робототехнике. Текущее знание среды передвижения, как правило, ограничено условиями прямой видимости и характеристиками датчиков сбора информации. Очевидно, что в ряде случаев может помочь априорная информация об особенностях среды передвижения, извлекаемая из памяти системы управления, дополнительно к информации, получаемой в процессе прямого наблюдения. При этом недостающие данные могут

* Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ № 05-01-00885

быть заложены в память изначально — в виде картографической базы данных (КБД) среды передвижения [1, 2], но могут и собираться и заноситься в память КБД автоматически — по мере движения.

Данные, хранимые в КБД, описывают характеристики местности с учетом ходовых возможностей мобильного робота. Характеристиками местности являются: тип области местности (поле, лес, болото), тип объектов на местности (ручей, дорога, препятствие), координаты границ областей и объектов на местности, свойства объектов и областей на местности (значения высот, замкнутость или линейность границ, допустимая скорость движения для данного объекта управления). Стандартные объекты КБД хранятся в виде совокупности файлов с содержанием, упорядоченным по типу областей и объектов на местности. Каждый из объектов КБД состоит из набора данных в разных файлах, составляющих в совокупности класс данных объекта. Координаты и свойства объектов класса упорядочены внутри файлов по числу образцов данного класса. Сформированные таким образом структуры данных позволяют получить изображения электронной карты местности, на которой оператор имеет возможность отслеживать положение робота, задавать ему целевые указания, либо вмешиваться в управление при возникновении нестандартных ситуаций.

Однако для того, чтобы такая электронная карта могла непосредственно использоваться в системе автономного управления движением, необходимо перейти к модели, с которой могла бы работать

бортовая система. В качестве такой модели может быть использован граф со взвешенными ребрами (дугами), вершины которого соответствуют всем участкам слияния-разветвления путей, а ребра — всем возможным путям движения (они взвешены, например, их длиной, допустимой скоростью движения, расходом топлива). Таким графом могут быть представлены все пути на больших по площади рабочих зонах, поэтому назовем его глобальным графом. На глобальном графе также в виде вершин могут быть заданы начальное (текущее) и конечное (целевое) положения мобильного робота. Правила построения глобального графа по известному плану внешней среды следующие:

- перекресткам, поворотам, выпуклым углам препятствий и участкам внешней среды, которым принадлежат начальное (текущее) и целевое положения мобильного робота, ставятся в соответствие вершины графа;
- все пары вершин, между соответствующими участками которых на плане можно провести прямолинейный отрезок, проходящий только по свободным от препятствий участкам внешней среды, соединяются неориентированными ребрами;
- каждому ребру глобального графа приписывается вес (или вектор весов).

Фрагменты электронной карты и глобального графа показаны на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки).

Построенный таким образом глобальный граф может быть использован для планирования глобальных траекторий движения в соответствии с каким-либо критерием оптимальности (минимальной длиной, минимальным временем движения, минимальным расходом топлива). На рис. 2 показаны кратчайшая по длине (*a*) и проходящая за минимальное время (*б*) глобальные траектории, найденные на глобальном графе. При этом вторая траектория построена с учетом того, что для данного мобильного робота скорость движения по сети дорог выше, чем по пересеченной местности.

В настоящее время построены примеры КБД для индустриальной среды, города, сети дорог и

пересеченной местности. Они интегрированы в бортовые системы управления действующих мобильных роботов и прошли экспериментальную проверку в реальных условиях. Опыт их использования показал следующее. Глобальный граф может быть сформирован предварительно, но затем в процессе функционирования мобильного робота в данной среде он должен по мере необходимости корректироваться автоматически по данным системы технического зрения (СТЗ) и навигационной системы [3, 4]. При обнаружении не учтенного в КБД непроходимого препятствия (например, перекрытой дороги; разрушенного моста) оно в соответствии с текущими координатами вносится в память. При этом корректировка глобального графа сводится к добавлению или исключению вершин и дуг в исходном графе (исключаются вершины и дуги, принадлежащие и проходящие через обнаруженное препятствие, добавляются новые вершины и дуги в соответствии с описанными выше правилами).

На рис. 3, 5 (см. четвертую сторону обложки) и на рис. 4 демонстрируется использование глобального графа и его корректировка по данным бортовых систем мобильного робота при его автономном движении в индустриальной среде. На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) показаны заданные целевые точки (1, 2, 3, 4) и спланированная на исходном глобальном графе соответствующая кратчайшая траектория.

При обнаружении СТЗ неизвестного ранее препятствия (на рис. 4 и 5 (см. четвертую сторону обложки) оно показано заштрихованной областью) последнее в соответствии с его положением в зоне обзора и текущими координатами робота вносится в КБД.

Затем выполняется корректировка глобального графа и находится новая траектория (рис. 5, см. четвертую сторону обложки).

Следует отметить, что все перечисленные выше операции (определение текущих координат и ориентации, обнаружение препятствий и внесение их в КБД, корректировка глобального графа и построение новой траектории) выполняются бортовыми средствами в темпе движения робота в индустриальной среде (при скоростях до 1 м/с).

Более сложная проблема возникает тогда, когда необходимо организовать автономное движение мобильного робота в неизвестной среде при отсутствии априорных картографических данных. В этом случае необходимо решить задачу автоматического построения КБД с помощью бортовых средств в процессе автономного движения.

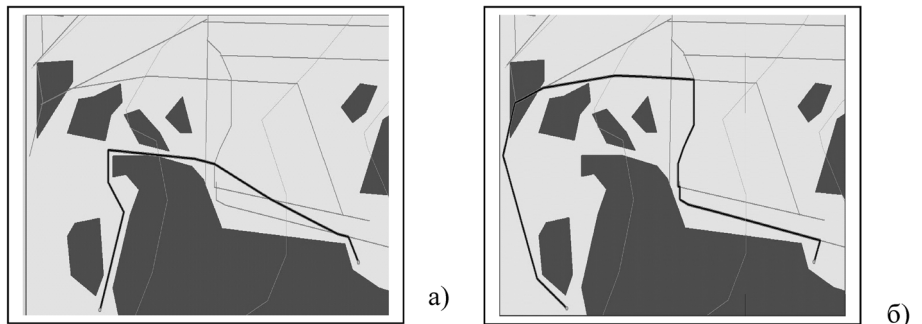


Рис. 2. Построение на глобальном графе траекторий движения

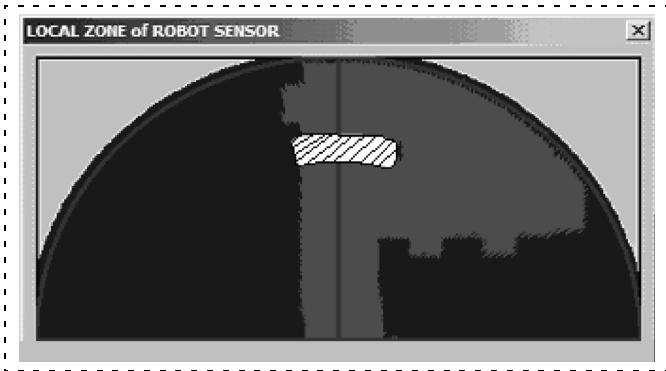


Рис. 4. Препятствие, обнаруженное системой технического зрения

Рассмотрим решение этой задачи в помещениях здания, для которого по каким-то причинам нет априорных данных о его внутренней геометрии (поэтажного плана помещений, лестничных пролетов, расстановки мебели и оборудования, возможных разрушений). Помещения внутри зданий можно отнести к тому классу индустриальных сред, где спутниковая навигация, как правило, невозможна, а движение осуществляется по горизонтальным поверхностям в отсутствие крена и дифферента.

В этом случае КБД может быть представлена в виде матрицы препятствий, ячейки которой моделируют неизвестные, разрешенные или запрещенные для движения участки поверхности. Признаки разрешения или запрещения движения формируются бортовыми средствами по мере движения следующим образом. По дальнометрическим изображениям внешней среды, получаемым с помощью светолокационно-дальнометрической СТЗ [3], в подвижной системе координат, связанной с мобильным роботом, выделяются участки с препятствиями и участки, разрешенные для движения. Осмотренные участки заносятся в КБД путем пересчета их из подвижной системы координат в неподвижную с учетом текущего положения мобильного робота (начало неподвижной системы координат может быть связано с точкой старта).

Текущее положение робота (две линейные координаты на плоскости и курс) определяется методами экстремальной навигации по тем же дальнометрическим изображениям [4]. Цель движения может быть задана координатами одной или нескольких точек, которые должен посетить мобильный робот. Траектории движения к целевым точкам строятся как с учетом оперативных данных, поставляемых СТЗ, так и с учетом данных, уже занесенных в КБД на предыдущих этапах движения.

При получении каждого нового кадра СТЗ информация в КБД обновляется, т. е. запрещенные в предыдущем кадре ячейки могут стать разрешенными и наоборот. Так отслеживаются нестационарные препятствия и происходит постоянное уточнение КБД. На рис. 6 приведен результат формирования бортовыми средствами автономного мобильного робота цифровой карты второго этажа корпуса специального машиностроения МГТУ им. Н. Э. Баумана. На рис. 6, а изображен фрагмент построенного плана помещений с траекторией, приводящей мобильного робота в зону неизвестности для дальнейшего уточнения и наращивания плана, а на рис. 6, б — уже практически полный план одного этажа.

Основной проблемой автоматического формирования КБД при автономном движении в неизвестной среде является задача повышения точности решения навигационной задачи. Для среды с заранее известной геометрией задача сброса накапливаемой в процессе движения ошибки определения текущего положения решается путем периодического вычисления текущего приращения координат не относительно предыдущего дальнометрического изображения, а относительно так называемого опорного или эталонного дальнометрического изображения, построенного по КБД [4].

Для среды с заранее неизвестной геометрией можно поступать аналогично, но важным отличием будет то, что в данном случае целесообразно определять текущее приращение координат относительно дальнометрических изображений, полученных на более ранних стадиях движения и имеющих пересечение с текущим дальнометрическим изображением. Тогда будет сброшена ошибка решения навигационной задачи, накопленная в процессе движения между моментами получения текущего дальнометрического изображения и моментом получения сравниваемого с ним более раннего изображения.

Из сказанного следует, что процесс автоматического построения КБД должен быть увязан с процессом минимизации ошибки решения навигационной задачи. Задача минимизации ошибки определения текущего положения сводится к поиску

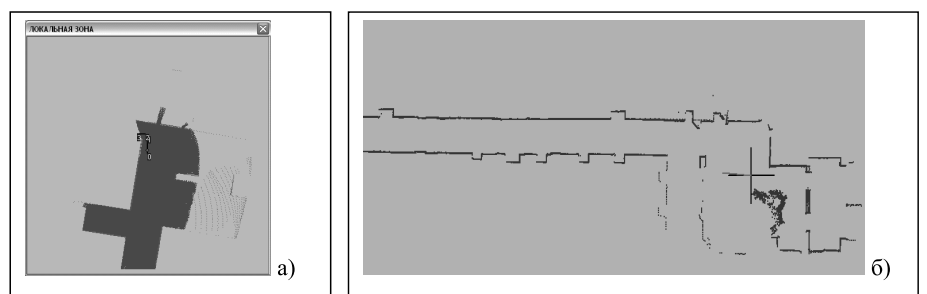


Рис. 6. Автоматическое формирование цифровой карты помещений

целенаправленных траекторий на построенном в данный момент глобальном графе с учетом этого критерия.

Рассмотрим один из возможных методов минимизации ошибки навигационной системы счисления координат при автоматическом построении электронной карты неизвестного помещения. Очевидно, что при движении суммарная ошибка счисления координат будет равна сумме ошибок определения приращений координат текущего дальнометрического изображения относительно предыдущего. Принимая данную ошибку одинаковой на каждом шаге ($\forall i[\varepsilon_i, i+1 = \varepsilon]$), положим суммарную ошибку равной $E_n = n\varepsilon$ (n — число шагов определения приращения координат), т. е. возрастающей прямо пропорционально длине пройденного пути. Заметим, что эта ошибка может быть минимизирована, если траектория движения проходит так, что возможен возврат робота на уже пройденный участок траектории, на котором суммарная ошибка навигации меньше текущей. Такая ситуация приведена на рис. 7. Здесь показана траектория движения в виде графа, вершины которого взвешены суммарной навигационной ошибкой (при $\varepsilon = 1$ суммарная ошибка равно номеру вершины). При таком варианте движения, находясь в точке 16, полезно вернуться в точку 3 и сбросить накопившуюся ошибку навигационной системы. Условие возврата на ранее пройденный участок траектории, приведенной на рис. 7, можно записать следующим образом:

$$E_{16} > E_3 + \varepsilon_{3,18} + \varepsilon_{18,17} + \varepsilon_{17,16},$$

где E_3 , E_{16} — суммарные ошибки приращения координат в соответствующих точках траектории; $\varepsilon_{3,18} + \varepsilon_{18,17} + \varepsilon_{17,16}$ — суммарная ошибка на участке траектории 3—18—17—16. В нашем случае данное условие истинно ($16 > 3 + 1 + 1 + 1$) и можно уменьшить навигационную ошибку на участке 11—18 (новые суммарные навигационные ошибки приведены на рис. 7 в скобках).

Для записи формального алгоритма проверки условия возврата на ранее пройденные участки для минимизации навигационной ошибки и нахождения соответствующей траектории используем введенную выше матрицу препятствий, элементы которой находятся в отношении геометрического соседства на плоскости и помечены как запрещенные или разрешенные для движения и как неизвестные. Последние взвесим заведомо большим весом (например, числом элементов матрицы). Обозначим G — множество вершин пройденного пути, взвешенных их суммарными навигационными ошибками. Требуется найти на данной матрице траекторию движения из текущего положения (q_k), которая минимизирует суммарные навигационные ошибки на вершинах пройденного пути. Данная задача может быть решена одной из модификаций

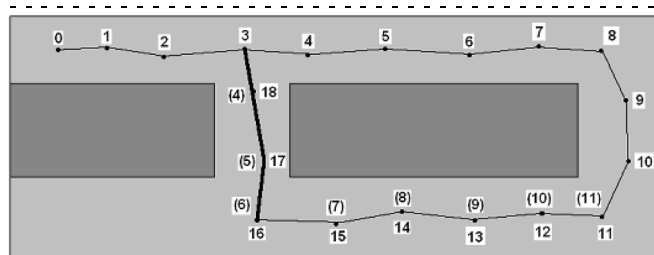


Рис. 7. Траектория движения в виде графа, вершины которого взвешены суммарной навигационной ошибкой



Рис. 8. План реального помещения

волнового алгоритма [5], который может быть сформулирован следующим образом:

Алгоритм.

0°. Элементу матрицы M , соответствующему элементу q_k множества G , приписываем вес, равный нулю.

1°. Для всех взвешенных на предыдущем шаге элементов матрицы (порождающих) находим смежные (порожденные) элементы (если они помечены как разрешенные или неизвестные на матрице M) и приписываем им веса, равные сумме веса порождающего элемента матрицы и расстояния между этими элементами (порождающим и порожденным), в том случае, если собственный вес порожденного элемента больше; в противном случае порожденный элемент вновь не взвешивается.

2°. Если множество вновь взвешенных элементов матрицы пусто, то глобальной траектории не существует — переход к 9°; иначе

3°. Если среди этих, вновь взвешенных, элементов нет элементов множества G , то переход к 1°; иначе

4°. Находим из вновь взвешенных вершин элементы, принадлежащие множеству G , и определяем элемент с минимальным весом q_{\min}^* .

5°. Если вес конечного элемента q_k множества G меньше суммы весов порожденного элемента и вновь найденного элемента множества G с минимальным весом q_{\min} , то переход к 1°; иначе

6°. $t = 0$, помечаем элемент матрицы M , соответствующий q_{\min} , номером t .

7°. $t = t + 1$, среди элементов матрицы M , смежных с элементом, помеченным номером $t - 1$, находим элемент, вес которого в сумме с соответствующим расстоянием между элементами минимален, и помечаем его номером t^* .

8°. Если элемент с номером t не является элементом матрицы M , соответствующим элементу q_k множества G , то переходим к 7°; иначе

9°. Конец работы алгоритма.

* Если таких элементов несколько, то выбирается любой из них.

Найденная последовательность q_k, \dots, q_{\min} будет оптимальной траекторией на матрице M по критерию минимизации ошибки навигационной системы.

На рис. 8 показан автоматически построенный план реального помещения с реализованными траекторией движения робота и участками коррекции навигационной ошибки (1, 2, 3), найденными в соответствии с приведенным алгоритмом.

Описанный выше способ позволяет бортовыми средствами в автоматическом режиме формировать КБД неизвестных помещений и использовать ее не только для возврата в точку старта, но и для организации автономного движения в дан-

ной среде. В настоящее время в соответствии с описанным алгоритмом созданы программно-аппаратные средства автоматического формирования КБД индустриальной среды, которые прошли экспериментальную проверку в составе действующего мобильного робота.

Список литературы

1. Носков В. П., Рубцов И. В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 21—24.
2. Евсеев А. А., Носков В. П., Платонов А. К. Электронная карта в системе управления автономным движением мобильного робота // Изв. Тульского государственного университета. Сер. "Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления". Вып. 3 "Системы управления". Т. 1. Тула: Из-во ТулГУ, 2006. С. 166—169.
3. Кузин Ю. Р., Носков А. В., Носков В. П. Разработка и исследование систем технического зрения для обеспечения автономного движения // Науч.-техн. сб. "Оборонная техника". М.: НТЦ Информтехника, 2001. № 8—9. С. 34—39.
4. Носков В. П., Носков А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 16—21.
5. Каляев А. В., Носков В. П., Чернухин Ю. В. Алгоритм управляющей структуры транспортного робота. // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1980. № 4. С. 64—72.

УДК 621.952.8

Е. В. Красильникъянц, канд. техн. наук,
А. П. Бурков, канд. техн. наук, В. А. Иванков,
НИИ электронной техники, г. Иваново

Применение контроллеров движения для систем управления электромеханическими объектами

Рассматриваются вопросы построения систем управления движением различного назначения на основе встраиваемых вычислительных устройств — контроллеров движения.

Введение

В настоящее время в машиностроении существует тенденция к росту применений устройств, обеспечивающих заданный характер движения или взаимную синхронизацию отдельных машин. Использование программируемых электромеханических связей позволяет, как правило, добиться значительного расширения функциональных возможностей, повысить производительность машин и уровень автоматизации производства. Функциональные воз-

можности, предоставляемые программируемыми логическими контроллерами (ПЛК), обеспечивают решения задач управления автоматизированными технологическими процессами (АСУТП). Однако для построения систем управления движением (СУД) манипуляционных роботов, металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), ряда поточных линий их ресурсов оказывается недостаточно. Последнее связано с тем, что ПЛК традиционно создавались для управления технологическими объектами, и значение термина "реальное время" применительно к АСУТП определяется быстродействием механических, гидравлических или пневматических элементов. Для решения задач, требующих высокой точности, быстродействия, координирующего управления, применяются, как правило, системы автоматического управления многодвигательным электроприводом, построенные на одном или нескольких вычислительных устройствах. В случае однопроцессорных вычислителей предельное быстродействие определяется числом одновременно обслуживаемых электродвигателей и временем нарастания тока в электрических цепях, обычно составляющем десятки микросекунд. Необходимая точность вычислений координат траекторий движения может быть достигнута при 24—32-битовой разрядной сетке.

Использование для этой цели комплектных электроприводов с цифровым управлением совместно с ПЛК не дает возможности достигнуть высоких результатов вследствие ограниченного быстродействия интерфейсов, сложности организации перекрестных связей между электроприводами и недостаточного развитого программного обеспечения.

Другое развиваемое в настоящее время направление использования PC-совместимых компьютеров (PC-base) для управления многодвигательными электроприводами [1] также не лишено ряда недостатков. Несмотря на высокую вычислительную мощность процессоров реализовать ее в полной степени для СУД не удается вследствие следующих причин:

- жесткие требования по стабильности времени квантования, высокоскоростному интерфейсу, быстрому отклику на прерывание, типичные для СУД, несущественны для (PC-base) процессоров. Вместе с тем, для СУД нет необходимости в обеспечении совместной работы программ различных производителей, механизма трансляции логических адресов в физические, наличия большого объема памяти и т. п.;
- частота системной шины существенно ниже тактовой частоты процессора, а кэширование приводит к непредсказуемому изменению времени обработки;
- программы логического и цифрового управления состоят из фрагментов, имеющих небольшой объем (от десятков до сотен машинных команд). Использование операционных систем (ОС) для управления подобными задачами приводит к значительному увеличению затрат времени на переключение контекста, а вывод таких задач за рамки операционных систем весьма существенно тормозит работу самой ОС. Особые требования предъявляются к анализу и обработке исключительных ситуаций в СУД, так как последние используются в ответственных и потенциально опасных машинах.

В связи с этим, а также вследствие увеличивающихся потребностей в системах управления движением в различных отраслях промышленности рядом иностранных фирм предприняты попытки создания встраиваемых вычислительных устройств, предназначенных для решения широкого класса задач управления движением — контроллеров движения (КД) [2].

Принципы построения КД

Характерной особенностью КД можно считать то, что производитель предлагает целый комплекс изделий, включающий помимо собственно вычислительного устройства силовые модули для двигателей различного типа, развитый набор перифе-

рийных устройств, средства интерфейса с ведущим компьютером (хостом) и силовыми модулями, а также специализированное программное обеспечение для разработки СУД. Конкретная разработка СУД выполняется системными интеграторами. К устройствам подобного рода можно отнести изделия фирм ACS Motion Control (SPiPlus) [3], Galil (Accelerata DMC) [4], Performance Motion (Navigator) [5], Delta Tau (PMAC) [6] и некоторые другие. КД может использоваться для создания СУД совместно с персональным компьютером или автономно.

Стандартный набор функций управления движением, поставляемый с КД, включает в себя управление положением "точка—точка", толчковый режим "jog", режим "PVT" (положение—скорость—время), слежение за положением, позиционирование, линейную, круговую и сплайновую интерполяции. Некоторые производители включают в этот набор возможность поддержки алгоритмов прямой и инверсной кинематики. Программное обеспечение позволяет задавать, помимо значений перемещения, профили скоростей и ускорений. Все КД обеспечивают кроме функций управления движением также и функции логического управления, типичные для ПЛК.

В контроллерах предусматриваются возможности управления коллекторными и бесколлекторными двигателями постоянного и переменного тока, линейными и шаговыми двигателями. Для организации обратных связей по положению могут быть использованы квадратурные и синусоидальные энкодеры, резольверы и датчики Холла. В качестве регуляторов положения, как правило, применяются ПИД-регуляторы с упреждающими связями по скорости и положению, настраиваемые пользователем. Для сложных объектов управления имеется возможность использования регуляторов высокого порядка, например, полиномиальных. В ряде случаев возможно применение регуляторов, создаваемых пользователем контроллера, что однако допускается при их достаточной квалификации. Для управления электроавтоматикой СУД контроллеры имеют широкий набор дискретных входов и выходов.

Конструктивное исполнение КД возможно в виде платы расширения шины PCI, на которой установлен процессор с устройствами памяти и интерфейса, или в виде отдельного блока, причем в последнем случае связь с ведущим компьютером осуществляется по высокоскоростному каналу USB или Ethernet.

Появление контроллеров движения было обусловлено, с одной стороны, возникновением новых, более совершенных микропроцессоров, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), силовых модулей и, с другой стороны, — усложнением задач управления многодвигатель-

ными электроприводами, повышением требований к точности, быстродействию и надежности приводных устройств.

Важной особенностью КД является аппаратная реализация функций, требующих высокого быстродействия, таких как формирование широтно-модулированных импульсов управления силовыми ключами, интерполяция сигналов измерительных преобразователей положения, фиксация начала отсчета положения. С этой целью используются ПЛИС. Как правило, на ПЛИС реализуется и многоканальная система ввода-вывода дискретных сигналов связи с многочисленными модулями расширения. Такое решение позволяет значительно снизить вычислительную нагрузку процессора и освободить его от необходимости решения большого числа быстродействующих задач.

Обычно КД имеет около 200 линий ввода-вывода, обеспечивающих взаимодействие с группой приводных устройств. Общее число управляемых электроприводов зависит от сложности решаемых задач и, как правило, секционируется с кратностью, равной 4.

Основная вычислительная мощность КД определяется используемым процессором. По различным данным, в КД применяются процессоры цифровой обработки сигналов (DSP) или RISC-процессоры с тактовой частотой 120...240 МГц.

Типичным примером использования однопроцессорных КД является семейство РМАС фирмы Delta Tau [6], снабженное процессорами 563xx фирмы Motorola с тактовой частотой 80...240 МГц. Контроллеры могут иметь память команд и данных от 128 Кбит \times 24 до 512 Кбит \times 24-разрядных слов. Для постоянного хранения программ и данных используется внешняя энергонезависимая Flash-память объемом от 1 МБ.

Примером использования распределенной микропроцессорной архитектуры является устройство SPiPlus [3], в котором один процессор движения управляет группой RISC-сервопроцессоров с тактовой частотой 120 МГц, каждый из которых контролирует два электропривода. Каждый сопроцессор имеет доступ к 2 Кбайт памяти программ, 352 \times 24-разрядным словам оперативной и 96 \times 24-разрядным словам двухпортовой памяти.

Структура программного обеспечения КД

Программные модули в КД могут быть разделены на три основных типа — программы логического управления (PLC), управления движением (РМС) и очереди, включающие кольцевые буферы данных с программами соответствующей обработки. Наивысшим приоритетом обладают РМС-программы, запускаемые через равные промежутки времени по прерыванию таймера, а также некото-

рые из PLC-программ, требующие фиксированного временного масштаба, и программы прямого цифрового управления. Свободную часть временного интервала занимают остальные PLC-программы, очереди и ряд сервисных функций. Результаты вычислений значений регуляторов и широтно-импульсных сигналов объединяются в единый "сервоцикл", наличие которого в системе может быть обязательным в случае, если КД используется без силовых модулей или с отдельными силовыми преобразователями. Период расчета "сервоцикла" в большинстве случаев находится в пределах 50...120 мкс.

Каждому двигателю в СУД назначается ось, характеризующая геометрические параметры механизма. Возможно использование линейных и круговых осей. Ось имеет масштабные коэффициенты и начало отсчета.

При необходимости согласованного управления группой электродвигателей оси могут быть объединены в координатные системы (КС). Общее число КС и осей определяется быстродействием используемого процессора. Любой из КС могут быть присвоены стандартные имена *XYZ*, *ABC*, *UVW*. КС могут быть определены как линейные и ортогональные. В этом случае РМС-программы могут использовать линейную и круговую интерполяцию в плоскостях, перпендикулярных направляющим осям *I*, *J*, *K*.

Основой РМС-программ являются генераторы траекторий (ГТ). При вызове РМС-программ ГТ формируют задания для положений одной или нескольких осей. При каждом вызове РМС расчет проводится для всех КС, определенных в системе.

Генераторы траекторий могут иметь различные источники данных:

- значения приращений на каждом такте квантования, вычисляемые на основе начального, промежуточных и конечного положений, вида и характера кривой разгона, наличия или отсутствия интерполяции, допустимых значений скоростей и ускорений;
- значения положений других ГТ или измерителей, установленных на других осях, возможно, не имеющих собственных двигателей — при работе в следящем режиме;
- значения приращений, считываемые из особого буфера, заполняемого программой-планировщиком.

Для механизмов циклического действия возможно циклическое выполнение РМС-программ, загруженных в специальный буфер. При использовании КД для управления станками с ЧПУ программы движения считываются из кольцевого буфера, пополняемого с хост-компьютера или локальной сети. Каждая КС имеет собственный кольцевой буфер.

PLC- и ПМС-программы могут формировать значения логических переменных — события. События означают достижение заданных значений внешними или внутренними переменными. События используются для управления работой системы и синхронизации различных КС.

Кольцевые буфера ПМС- и PLC-программ заполняются кодами исполняемых команд, которые формируются интерпретатором текста (компилирующим интерпретатором), в режиме загрузки программ.

КД могут поставляться с обычными средствами разработки типа VB, C/C++ и с проблемно-ориентированными языками программирования собственной разработки фирм-производителей. Компиляция управляющих программ может происходить либо на хост-компьютере с последующей загрузкой во Flash-память, либо на самом КД. Кроме того, для отладки СУД предлагаются программные средства, позволяющие вести диалоговый обмен, сбор данных и их визуализацию, мониторинг текущих процессов, автоматизировать процесс настройки приводов.

Недостатком использования КД для построения СУД можно считать необходимость применения нестандартизированных программных средств [7]. Различие аппаратных платформ и высокая стоимость средств разработки препятствуют широкому распространению КД. Однако появление в последние годы новых систем на кристалле (SoC) на основе платформы ARM позволяет рассчитывать на преодоление этих недостатков. Наличие большого числа независимых производителей (до нескольких десятков), бесплатного программного обеспечения, широкие ценовой и функциональный диапазоны, совместимость программного обеспечения снизу вверх позволяет надеяться на то, что платформа ARM станет стандартом "де факто" для встраиваемых систем.

Система управления стеклоформирующего агрегата

В качестве примера использования предложенного подхода можно привести создание цифровой СУД стеклоформирующего агрегата [8] (рис. 1). Основное требование — синхронно-синфазное движение четырех рабочих органов с возможностью регулирования взаимного фазового положения. Учитывая трехфазный режим работы агрегата, сложные условия эксплуатации и, соответственно, требования высокой надежности, был реализован вариант системы управления на базе автономного контроллера движения (рис. 2), причем по мере реализации системы ее возможности возрастали. К ним можно отнести возможность работы СУД с механизмами, имеющими различные, в том числе и дробные, коэффициенты редукции, фазирование механизмов в процессе разгона агрегата, вариативность типов дат-

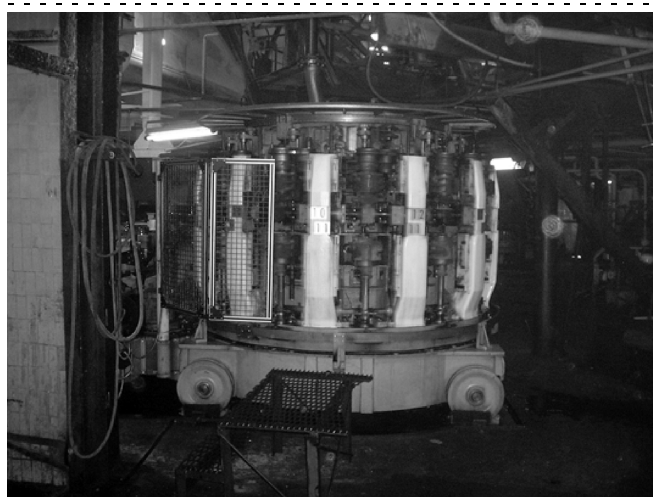


Рис. 1. Стеклоформирующий агрегат U8

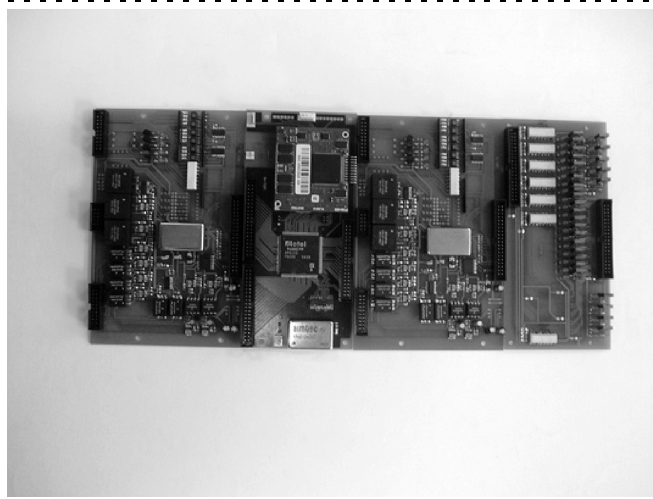


Рис. 2. Контроллер движения

чиков положения, управление сложным, изменяющимся в зависимости от производимого изделия циклом работы комплекта пневмомеханизмов, динамический контроль аварийных режимов и т. п. Важным результатом явилось то, что возрастающие требования заказчика удавалось благодаря заложенным принципам относительно быстро и легко реализовывать. Конкурентные разработки, реализованные на ПЛК-контроллерах, не смогли выполнить весь комплекс поставленных требований и были вынуждены уступить этот сектор рынка.

Система управления металлорежущим станком с ЧПУ

Следующим применением предложенной концепции явилось создание систем управления электрооборудованием "Интеграл" для металлорежущих станков с ЧПУ [9]. Традиционно системы управления для станков с ЧПУ включают в свой состав стойку ЧПУ, комплект электроприводов и набор

электроавтоматики, изготовленные, как правило, разными производителями. Использование таких отдельных, неинтегрированных систем порождает ряд сложностей при их разработке и обслуживании, создает большое число межблочных соединений, приводит к увеличению цены без повышения качественных показателей.

Основной принцип построения системы управления "Интеграл" заключается в том, что задачи расчета траектории движения, логического управления электроприводами и логического управления электроавтоматики интегрированы на единой платформе, основу которой составляет специализированный КД. Система управления в этом случае становится более компактной и надежной вследствие уменьшения аппаратной части и сокращения числа реальных связей между устройствами, которые теперь реализуются на программном уровне. Кроме того, объединение этих устройств на одной базе создает условия для разработки новых алгоритмов как управления оборудованием станка, так и технологических процессов обработки.

В КД реализован эффективный алгоритм цифрового управления стандартными асинхронными двигателями, что позволяет использовать их в приводах подач и главного движения. Вариант исполнения силовых блоков с прямым ШИМ-управлением от КД обеспечивает максимально простое, качественное и надежное управление приводами. В систему инсталлирована программа, позволяющая проводить автоматическую настройку приводов и отображать в графическом режиме значения токов, момента нагрузки, ошибку слежения и т. п. Кроме того, в такой системе программист может использовать значения переменных привода (момента нагрузки на шпинделе, ошибки рассогласования по положению и т. д.) в технологической программе.

Система "Интеграл" относится к классу систем с открытой архитектурой PCNC. На компьютере

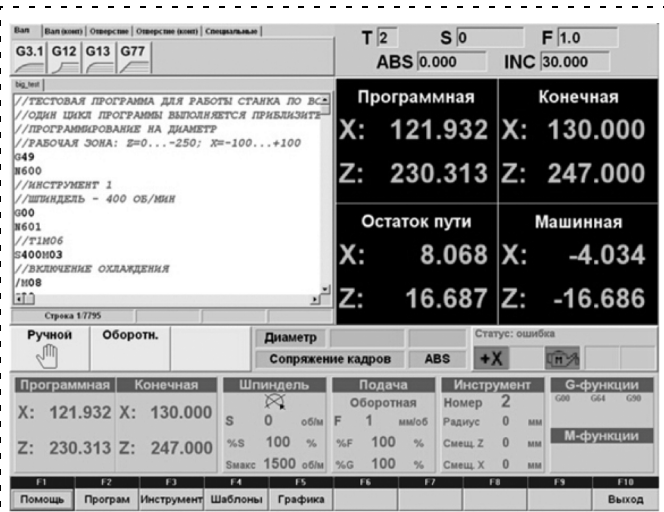


Рис. 3. Терминальное окно управления IntNC



Рис. 4. Токарный станок 16A20Ф3 с ЧПУ "Интеграл"

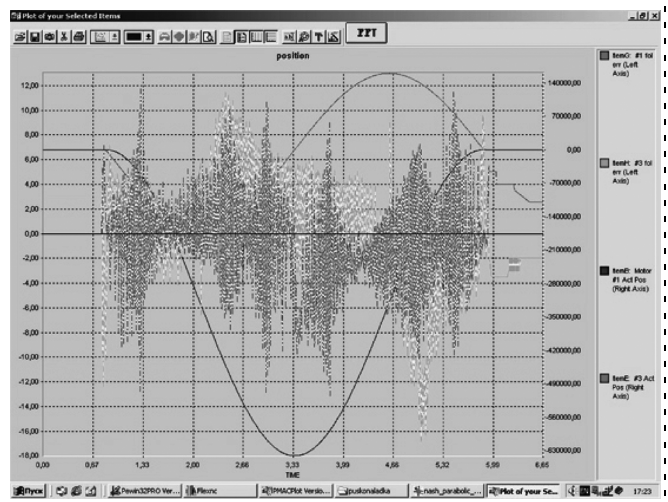


Рис. 5. Ошибка воспроизведения кругового движения

реализованы терминальные задачи и функции интерпретатора управляющих программ. Открытая архитектура на аппаратном уровне дает возможность использовать такие преимущества ПК, как большой ресурс памяти, наращиваемая вычислительная мощность, стандартные интерфейсы, а на программном уровне интегрировать в состав системы развитое системное, инструментальное и пользовательское программное обеспечение, работающее под операционной системой Windows. Для организации интерфейса между системой ЧПУ и оператором на компьютере устанавливается специальная программная среда IntNC (рис. 3).

В качестве интегральной оценки точности разработанной системы и корректного сравнения с существующими системами ЧПУ была выбрана ошибка воспроизведения кругового движения. В результате на токарно-винторезном станке 16A20Ф3 (рис. 4) при круговом движении на рабочей подаче $F = 6$ м/мин максимальное отклонение от траектории составило 28 мкм (рис. 5). Достигнутое повышение качества получаемой поверхности позволяет отказаться от финишной обработки деталей и

тем самым не только сократить время изготовления (т. е. повысить производительность), но и уменьшить число станков, задействованных в технологическом цикле.

Таким образом, "Интеграл" — это комплексная промышленная цифровая система управления металлорежущего станка, в результате использования которой достигаются высокая производительность, надежность и современные технические возможности.

В настоящее время ведется разработка СУД с использованием системы технического зрения (intCAM285-1) [10] для промышленного пятиосевого манипулятора типа PUMA 560.

Список литературы

1. www.powerautomation.com
2. Бурков А. П., Красильникьянц Е. В. Принципы построения контроллеров движения // Тез. докл. Междунар. науч.-

техн. конф. по автоматизированному электроприводу "АЭП 2007", Санкт-Петербург, 2007. С. 200.

3. www.acs.com
4. www.galil.com
5. Turbo PMAC. User manual. Delta Tau Data Systems, Inc. documentation, 2004.
6. Turbo PMAC. Software Reference manual. Delta Tau Data Systems, Inc. documentation, 2000.
7. Захаров Н. А. ПЛК и PC-совместимые контроллеры: два подхода к построению систем // Автоматизация в промышленности. 2003. № 4. С. 44.
8. Красильникьянц Е. В. Новые системы управления для стеклоформирующих машин // Стекловая тара. 2003. № 5. С. 10.
9. Красильникьянц Е. В., Иванков В. А. Принципы рационального построения системы управления металлорежущего станка // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. "Состояние и перспективы развития энерготехнологии". Иваново, 2005. Т. 2. С. 5.
10. Бурков А. П., Комин В. Г., Красильникьянц Е. В., Салахутдинов Н. В. Математическое и аппаратное обеспечение промышленной системы машинного зрения // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники", Дивноморское, 2007. Т. 2. С. 256.

УПРАВЛЯЮЩИЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 62-50

А. А. Александров,

С. А. Кабанов, д-р техн. наук, проф.,
Балтийский государственный технический
университет "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова,
Санкт-Петербург

Оптимизация посадки беспилотного летательного аппарата с учетом ограничений на управление

Решена задача оптимального управления движением беспилотного летательного аппарата как материальной точки. Решение построено с использованием принципа максимума Л. С. Понтрягина. Исследована сходимости метода Ньютона в зависимости от вида критерия качества. Представлены результаты моделирования.

Введение

Для управления полетом беспилотного летательного аппарата (БПЛА) важным является получение его оптимальных траекторий на различных участках полета.

Рассматривается задача управления БПЛА при посадке по различным критериям оптимальности с учетом ограничений на управление.

Исследуются задачи оптимального управления полетом с рассмотрением терминального критерия качества при ограничении на управление в форме неравенства и критерия с интегральными ограничениями на управление [1, 2]. Рассматривается как случай с управлением нормальной составляющей перегрузки, так и с возможностью управления продольной ее составляющей.

1. Постановка задачи

Уравнения движения БПЛА как материальной точки в вертикальной плоскости имеют вид [3, 4]

$$\dot{v} = g(n_x - \sin\theta); \quad \dot{\theta} = \frac{g}{v}(n_y - \cos\theta);$$

$$\dot{x} = v\cos\theta; \quad \dot{y} = v\sin\theta,$$

где v — скорость БПЛА; θ — угол наклона траектории; x и y — продольная дальность и высота полета соответственно; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $X = (v, \theta, x, y)^T$ — вектор состояния.

Рассматриваются случаи: 1) $\dot{v} = 0$; 2) $\dot{v} \neq 0$.

В качестве управления принимается либо вектор $u = n = (n_x, n_y)^T$, либо только нормальная составляющая перегрузки $u = n_y$.

В качестве критериев оптимальности выбираются: а) критерий Майера:

$$I = 0,5\rho_1(x(t_f) - x_f)^2 + 0,5\rho_2(y(t_f) - y_f)^2 + 0,5\rho_3(\theta(t_f) - \theta_f)^2;$$

б) критерий Больца: $I_1 = I + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} u^T k^{-2} u dt;$

в) критерий Больца с функцией штрафа:

$$I_2 = I_1 + \int Q_s dt,$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 — постоянные коэффициенты; $k^2 = \text{diag}(k_1^2, k_2^2)$ — при $u = (n_x, n_y)^T$, k^2 — заданный коэффициент при $u = n_x$ и $u = n_y$; t_0 и t_f — начальный и конечный моменты времени соответственно; x_f, y_f, θ_f — заданные значения x, y, θ в момент времени t_f .

Задача состоит в приведении БПЛА из начальных условий $X(t_0) = X_0$: $\theta_0 = 0$ рад, $x_0 = 0$ м, $y_0 = 1000$ м, $u_0 = 300$ м/с в конечное состояние X_f : $\theta_f = 0$ рад, $x_f = 2000$ м, $y_f = 0$ м.

Численное решение краевой задачи выполнялось методом Ньютона. При этом интегрирование дифференциальных уравнений проводилось методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,01$ с. Для свободного конечного времени t_f в метод Ньютона была включена функция автоподбора конечного времени выполнения задачи для обеспечения условия оптимальности $H(X, P, t_f) = 0$ [1, 2, 4]. Вектор невязок включал в себя три составляющие:

$$Z_j(\xi^i(t_f)) = [\theta(t_f) - \theta_f, x(t_f) - x_f, y(t_f) - y_f]^T.$$

Итерационная процедура выполнялась с точностью $\|Z(\xi(t_f))\| \leq 10$.

2. Оптимизация динамики с интегральными ограничениями на управление

Рассмотрим случай с $\dot{v} \neq 0$ и критерием Больца. Вектор управления содержит продольную и нормальную составляющие перегрузки. Гамильтониан для такой системы будет иметь вид

$$H = P_v g (n_x - \sin\theta) + P_\theta \frac{g}{v} (n_y - \cos\theta) + P_x v \cos\theta + P_y v \sin\theta + \frac{1}{2} u^T k^{-2} u.$$

Уравнения для сопряженных переменных следующие:

$$\dot{P}_v = -\frac{\partial H}{\partial v} = P_\theta \frac{g}{v^2} (n_y - \cos\theta) - P_x \cos\theta - P_y \sin\theta;$$

$$\dot{P}_\theta = -\frac{\partial H}{\partial \theta} = P_v g \cos\theta - P_\theta \frac{g}{v} \sin\theta + P_x v \sin\theta - P_y v \cos\theta;$$

$$\dot{P}_x = -\frac{\partial H}{\partial x} = 0; \dot{P}_y = -\frac{\partial H}{\partial y} = 0.$$

Управление определяется из условий $\frac{\partial H}{\partial n_x} = 0$

и $\frac{\partial H}{\partial n_y} = 0$ соответственно в виде $n_x = -P_v g k_1^2$ и

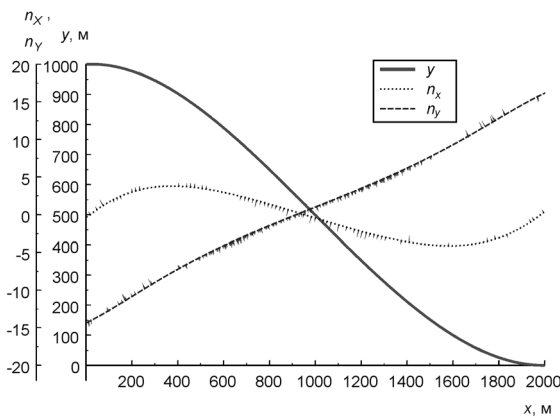
$$n_y = -P_\theta \frac{g}{v} k_2^2.$$

В процессе проведения численных экспериментов для $\dot{v} \neq 0$ подтверждено, что метод Ньютона для данной системы сходится с заданной точностью при небольшом числе итераций из широкого диапазона начальных условий для вектора сопряженных переменных $P(t_0)$ [5]. Например, можно выбрать $P_\theta(t_0) = [1, 1, 1]^T$. Тогда за одну итерацию были получены оптимальные начальные значения сопряженных переменных $P_\theta(t_0)^{\text{опт}} = 43857,07$; $P_x(t_0)^{\text{опт}} = 0,021$; $P_y(t_0)^{\text{опт}} = 47,913$.

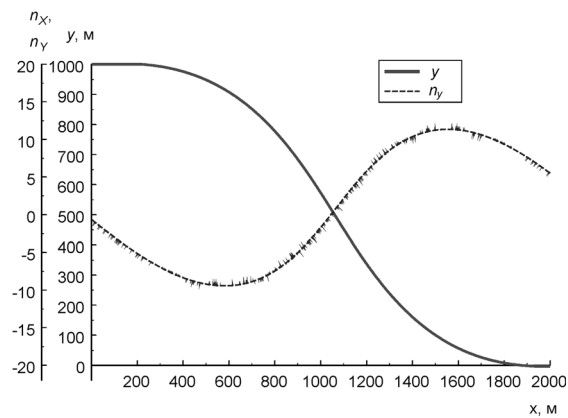
При $\dot{v} = 0$ с критерием Больца вектор управления содержит только нормальную составляющую перегрузки. Управление будет иметь вид

$$n_y = -P_\theta \frac{g}{v} k^2.$$

Для сходимости метода Ньютона в этом случае начальные условия надо выбирать близкими к оптимальным значениям, например, в виде оптимальных значений сопряженных переменных для случая $\dot{v} \neq 0$. Задача решалась при начальных условиях



а) $\dot{v} \neq 0$



б) $\dot{v} = 0$

Рис. 1. Зависимости $n_x(x), n_y(x), u(x)$ для критерия Больца

$P(t_0) = P^{опт}(t_0)$, найденных для случая $\dot{v} \neq 0$. За пять итераций были получены оптимальные значения начальных сопряженных переменных $P_\theta(t_0)^{опт} = 2129,74$; $P_x(t_0)^{опт} = 153,96$, $P_y(t_0)^{опт} = -67,99$.

Таким образом, метод Ньютона при $\dot{v} = 0$ сходится при небольшом числе итераций только для близких к оптимальным значениям начальных сопряженных переменных.

На рис. 1 для одного из вариантов начальных условий представлены оптимальные траектории и зависимости $n_x(x)$, $n_y(x)$.

3. Оптимизация динамики с учетом ограничений на управление в виде неравенства

В соответствии с принципом максимума при строгих ограничениях на управление возникают режимы предельного и особого управлений. Краевая задача решается методом Ньютона.

Рассмотрим вариант управления с $\dot{v} \neq 0$ и критерием Больца. Вектор управления в данном случае содержит продольную и нормальную составляющие вектора перегрузки n . В критерии Больца полагается $u = n_x$, и имеется ограничение $|n_y| \leq n_{y_m}$.

Гамильтониан для такой системы будет иметь вид

$$H = P_v g(n_x - \sin\theta) + P_\theta \frac{g}{v} (n_y - \cos\theta) + P_x v \cos\theta + P_y v \sin\theta + \frac{1}{2} n_x^2 k^{-2}.$$

Уравнения для сопряженных переменных будут выглядеть так же, как и в рассмотренном в п. 2 случае с $\dot{v} \neq 0$.

Управление n_x находится из условия $\frac{\partial H}{\partial n_x} = 0$ в виде $n_x = -P_v g k^2$.

Для n_y из условия $\min_{n_y} H$ получаем

$$n_y = \begin{cases} n_{y_m} \text{ sign } P_\theta, & P_\theta \neq 0; \\ n_{y \text{ особ}}, & P_\theta = 0. \end{cases}$$

Особое управление находится из условий равенства нулю четных производных по времени от производной гамильтониана по управлению [2]:

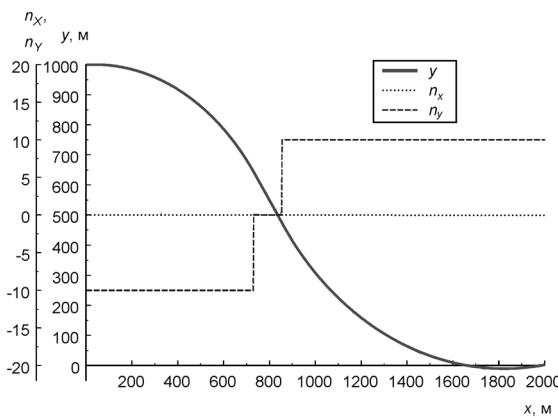
$$\frac{\partial H}{\partial n_y} = P_\theta \frac{g}{v} = 0 \text{ и } \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial n_y} \right) = 0.$$

При $\dot{g} = \ddot{g} = 0$ выражение для $n_y = n_{y \text{ особ}}$ следует из уравнения

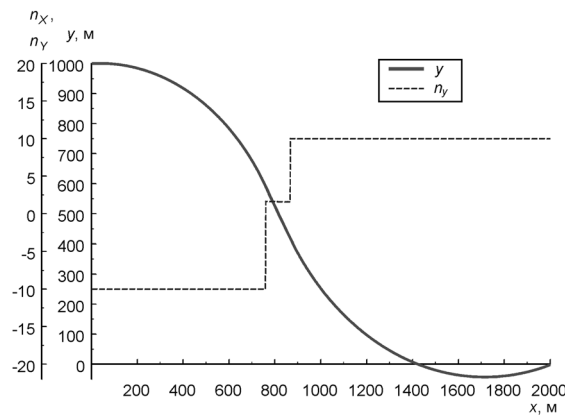
$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial n_y} \right) = & n_y \frac{g^2}{v^3} \left[P_\theta \cos\theta g - P_v v \sin\theta g + P_x v^2 \cos\theta + \right. \\ & \left. + P_y v^2 \sin\theta - \frac{P_\theta^2 g^2 k^2}{v} \right] - 2 \frac{P_x \cos^2 \theta g^2}{v} - \frac{P_\theta \cos^2 \theta g^3}{v^3} - \\ & - \frac{n_x P_\theta \sin\theta g^3}{v^3} - 2 n_x \frac{P_v \cos\theta g^3}{v^2} + n_x \frac{P_y \cos\theta g^2}{v} - \\ & - n_x \frac{P_x \sin\theta g^2}{v} + \frac{P_\theta^2 g^3 k^2 g \cos\theta}{v^4} + 2 \frac{P_v \sin\theta \cos\theta g^3}{v^2} - \\ & - 2 \frac{P_y \sin\theta \cos\theta g^2}{v} + \frac{P_\theta P_x g^3 k^2 \cos\theta}{v^2} + \\ & + \frac{P_\theta P_y g^3 k^2 \sin\theta}{v^2} + \frac{2 P_\theta g^3 n_x^2}{v^3} = 0. \end{aligned}$$

Вычисления с использованием метода Ньютона проводили при $n_{y_m} = 10$. Начальные значения сопряженных переменных выбираются близкими к оптимальным для случая с интегральными ограничениями.

Режим особого управления применялся при условии $|P_\theta| \leq \varepsilon$ ($\varepsilon = 0,1$).



а) $\dot{v} \neq 0$, критерий Больца



б) $\dot{v} = 0$, критерий Майера

Рис. 2. Зависимости $n_x(x)$, $n_y(x)$, $y(x)$ для оптимальных траекторий при $|n_y| < \bar{n}_{y_m}$

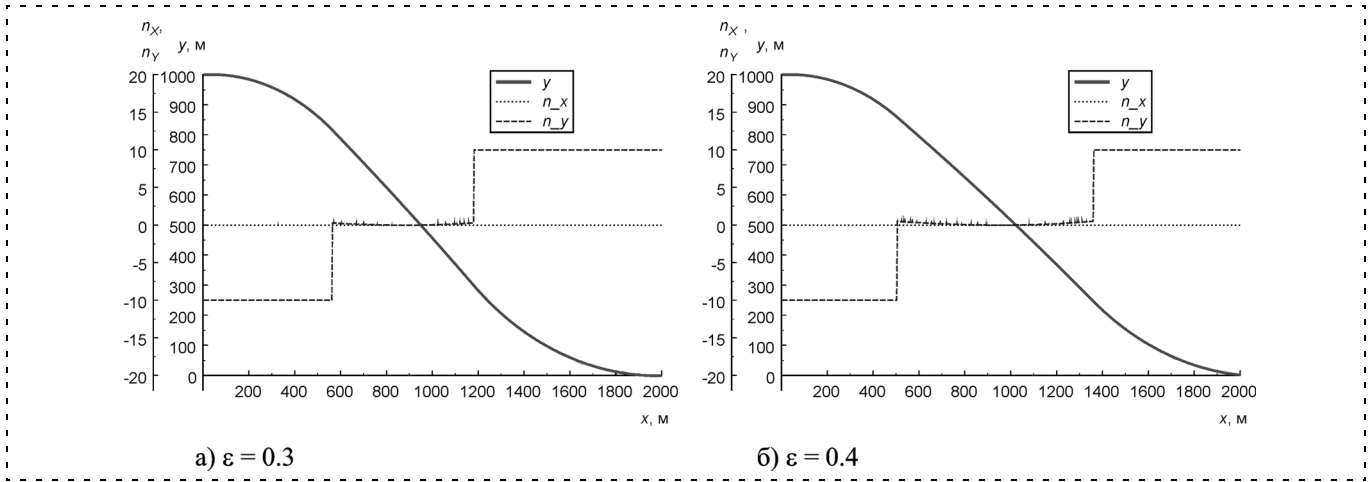


Рис. 3. Зависимости $n_x(x)$, $n_y(x)$, $y(x)$ для критерия Больца при $|n_y| < \bar{n}_{y_m}$

Аналогичные рассуждения при $\dot{v} = 0$ (критерий Майера) приводят к следующим выражениям:

$$H = P_\theta \frac{g}{v} (n_y - \cos\theta) + P_x v \cos\theta + P_y v \sin\theta;$$

$$n_{y_{\text{особ}}} = - \frac{\left(\frac{P_\theta g \sin\theta}{v^2} - P_x \sin\theta + P_y \cos\theta \right) \sin\theta}{P_y \sin\theta + P_x \cos\theta - \frac{P_\theta g \cos\theta}{v^2}} + \cos\theta.$$

Метод Ньютона сходится в том случае, если начальные условия выбраны близкими к оптимальным значениям, например, в виде оптимальных значений $P^{\text{опт}}(t_0)$ для аналогичного случая с $\dot{v} \neq 0$.

На рис. 2 представлены соответствующие оптимальные траектории и зависимости $n_x(x)$, $n_y(x)$. При этом высота полета имеет значения ниже нулевой отметки, что можно увидеть на рис. 2. Такой участок попадает на отрезок предельного управления $n_y = n_{y_m}$. Это обусловлено тем, что для выбранных начальных и конечных условий интервал оптимизации фиксирован. При $v = \text{const}$ следует полагать момент касания земли свободным или компенсировать неточность выбора величины t_f удлинением участка особого управления путем увеличения ϵ .

Для улучшения ситуаций, представленных на рис. 2, варьировали значение ϵ . Так, при $\epsilon = 0,3$ и $\epsilon = 0,4$ получаются заметно лучшие траектории (рис. 3). Наиболее подходящими по точности являются результаты с $\epsilon = 0,3$.

4. Оптимизация динамики с использованием функций штрафа

Рассмотрим задачу с функцией штрафа Q_s , использование которой позволяет получить аналог случая строгих ограничений на управление.

Первый случай: $\dot{v} \neq 0$, принимается критерий Больца.

Вектор управления содержит продольную и нормальную составляющие перегрузки. Гамильтониан для данного случая имеет вид

$$H = P_v g (n_x - \sin\theta) + P_\theta \frac{g}{v} (n_y - \cos\theta) + P_x v \cos\theta + P_y v \sin\theta + \frac{u^T u}{2k^2} + Q_s.$$

Уравнения для сопряженных переменных будут выглядеть так же, как и в рассмотренном в п. 2 случае с $\dot{v} \neq 0$. Полагаем, что задано ограничение $\bar{n}_{y_m} = 10$.

Управление n_x находится из условия $\frac{\partial H}{\partial n_x} = 0$ в виде $n_x = -P_v g k_1^2$.

Из условия $\min_{n_y} H$ с учетом

$$Q_s = \begin{cases} M[a + |a|], & |n_y| > \bar{n}_{y_m}; \\ 0, & |n_y| \leq \bar{n}_{y_m}; \end{cases}$$

$$a = \Delta n_y \text{sign} n_y; \Delta n_y = n_y - n_{y_m};$$

$$n_{y_m} = \bar{n}_{y_m} \text{sign} n_y; \bar{n}_{y_m} > 0 \text{ и } M \gg 0,$$

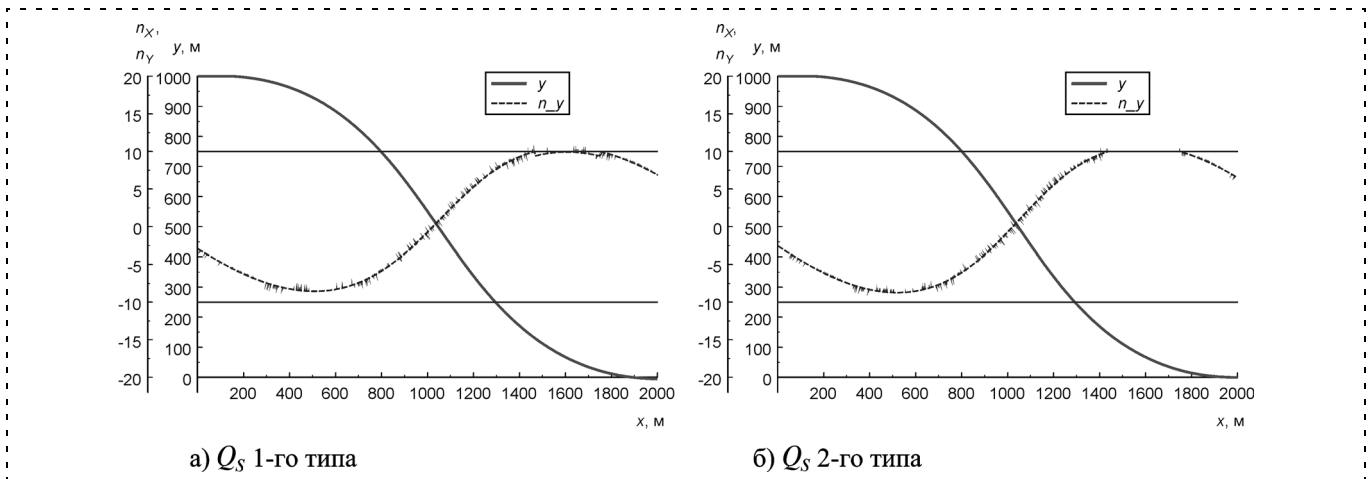
получаем

$$Q_s = \begin{cases} M[\Delta n_y + \Delta n_y] \text{sign} n_y = 2M(n_y - n_{y_m}) \text{sign} n_y, & \Delta n_y \text{sign} n_y > 0; \\ M[-|\Delta n_y| + |\Delta n_y|] \text{sign} n_y = 0, & \Delta n_y \text{sign} n_y > 0; \end{cases}$$

$$\frac{\partial H}{\partial n_y} = P_\theta \frac{g}{v} + \frac{n_y}{k^2} + \frac{\partial Q_s}{\partial n_y} = 0,$$

откуда находим искомое управление

$$n_y = -k^2 \left(P_\theta \frac{g}{v} + \frac{\partial Q_s}{\partial n_y} \right);$$


 Рис. 4. Зависимости $n_x(x)$, $n_y(x)$, $y(x)$ для критерия Больца, $\dot{v} = 0$

$$\frac{\partial Q_S}{\partial n_y} = \begin{cases} 2M \operatorname{sign} n_y, & |n_y| > \bar{n}_{y_m}; \\ 0, & |n_y| \leq \bar{n}_{y_m}. \end{cases}$$

Второй случай: $\dot{v} = 0$, принимается критерий Больца с функцией штрафа.

В этом случае используется тот же алгоритм, что и для $\dot{v} \neq 0$, но начальные значения сопряженных переменных задаются как оптимальные значения из решения задачи с $\dot{v} = 0$ и критерием Больца без функции штрафа.

На рис. 4, а приведены результаты решения для данного случая.

Далее рассмотрим случай с $\dot{v} = 0$ и критерием Больца с функцией штрафа вида

$$Q_S = \begin{cases} \frac{1}{2} M \Delta n_y^2, & |n_y| > \bar{n}_{y_m}; \\ 0, & |n_y| \leq \bar{n}_{y_m}. \end{cases}$$

Управление n_x находится из условия $\frac{\partial H}{\partial n_x} = 0$

аналогично предыдущему случаю для условия $\dot{v} \neq 0$.

Для n_y из условия $\min_{n_y} H$ получаем

$$\frac{\partial H}{\partial n_y} = P_\theta \frac{g}{v} + \frac{n_y}{k^2} + M \Delta n_y = 0,$$

$$\text{откуда } n_y = \frac{-k^2 P_\theta \frac{g}{v} + M k^2 \bar{n}_{y_m}}{1 + M k^2}; \quad M = \begin{cases} M, & |n_y| > \bar{n}_{y_m}; \\ 0, & |n_y| \leq \bar{n}_{y_m}. \end{cases}$$

Вектор управления $u = n = (n_x, n_y)^T$.

Переход к задаче с $\dot{v} = 0$ и критерием Больца с функцией штрафа осуществляется аналогичным предыдущему случаю с $\dot{v} = 0$ образом.

На рис. 4, б приведены результаты моделирования для данного случая.

Заключение

В работе исследовалась сходимость метода Ньютона в зависимости от вида критерия качества. При переходе от близкой к линейной функции управления $n_y(x)$ к системе с полностью или частично нелинейным вектором управления начальные значения вектора $P(t_0)$ для метода Ньютона следует выбирать как оптимальные $P^{\text{опт}}(t_0)$ для линейных случаев. Это позволяет сократить число итераций решения задачи методом Ньютона. Данные рекомендации возможно использовать и для систем более высокого порядка. Результаты расчетов демонстрируют возможность построения оптимальных траекторий спуска по различным критериям, реализация которых позволит повысить безопасность автоматической посадки БПЛА.

Список литературы

1. Справочник по теории автоматического управления/ Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
2. Горбатенко С. А., Макашов Э. М., Полушкин Ю. Ф., Шефтель Л. Е. Расчет и анализ движения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1971.
3. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973.
4. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб.: Изд. СПбГУ, 1997.
5. Кабанов С. А., Александров А. А. Прикладные задачи оптимального управления: учеб. пособие к практическим занятиям. СПб.: Изд. Балт. гос. техн. ун-та, 2007.

УДК 629.7.05

А. М. Бронников, д-р техн. наук, проф.,
Военно-воздушная инженерная академия
им. Н. Е. Жуковского, Москва

Формализованный синтез нелинейных законов управления систем улучшения устойчивости и управляемости летательных аппаратов

Предлагается методика синтеза нелинейных законов управления систем улучшения устойчивости и управляемости летательных аппаратов, основанная на распространении результатов технологии вложения по решению матричных уравнений на нелинейные системы. Требования к качеству системы формализуются в виде эталонной модели. Эффективность предлагаемой методики демонстрируется на примере продольного канала системы улучшения устойчивости и управляемости маневренного самолета.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 629.195.1:531.28

А. И. Заведеев, канд. техн. наук, доц.,
Р. А. Архипов,
Московский авиационный институт
(государственный технический университет).

Возможные подходы к построению перспективных систем управления ориентацией космических аппаратов с помощью гиросиловых устройств

Рассмотрены возможные подходы к построению перспективных систем управления ориентацией (СУО) космических аппаратов. Проведен сравнительный анализ динамических свойств СУО для двух вариантов приборного состава: с применением силового гироскопического комплекса и комплекса управляющих двигателей-маховиков

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 62-50

С. В. Соколов, д-р техн. наук, проф.,
И. В. Щербань, д-р техн. наук, доц.
Ю. А. Куликов,

Ростовский военный институт ракетных войск

Решение задачи управления наведением подвижного объекта на цель с априорно неопределенным подвижным центром на основе оптимального оценивания

Рассматривается задача управления наведением объекта на подвижную уклоняющуюся цель в условиях, когда цель имеет точную информацию о параметрах движения этого объекта. Управление объектом осуществляется на основе использования апостериорных оценок его вектора состояния и вектора состояния подвижной цели, полученных по показаниям собственного измерительного комплекса. Приведен практический пример, иллюстрирующий эффективность использования разработанного решения в реальных системах.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

УДК 621.396.96

Д. Г. Митрофанов, д-р техн. наук,
ВА войсковой ПВО ВС РФ, г. Смоленск,
В. В. Слатин, канд. техн. наук,
В. Ф. Грибков, канд. техн. наук,
Т. В. Овчинникова, канд. техн. наук,
ГосНИИ авиационных систем, Москва

Сравнение методов получения радиолокационных изображений с использованием синтезирования апертуры бортовой антенны РЛС

Исследуется вопрос получения радиолокационных изображений (РЛИ) воздушных целей с использованием синтезирования апертуры бортовой антенны РЛС. Первый метод базируется на линеаризованной модели вращения цели и определения значений ее координат с помощью анализа спектра отраженного сигнала при перестройке частоты, а второй — нелинейный метод — базируется на принципах томографии и после проведения линеаризации приводит к тем же расчетным соотношениям, что и первый. Второй метод обладает большей общностью представления задачи и позволяет получить новые результаты в процедурах формирования РЛИ.

*Полный текст статьи опубликован
в Приложении к журналу*

CONTENTS

Alfimov S. M. <i>Perspective Directions of the Development of Base Military Technologies in the Area Control Systems Creation and Information Processing</i>	2
Makarov I. M., Lokhin V. M., Manjko S. V., Romanov M. P. <i>Intellectual Control Systems by Autonomous Mobil Objects</i>	6
Sokolov V. B., Teryaev E. D. <i>Aircrafts without Pilots: Some Questions of the Development and Use</i>	12
Brazhnik V. M., Gerasimov G. I. <i>Development of Integrated Complexes of New Generation Aircraft Board Equipment</i>	24
Peshehonov V. G., Nesyuk L. P., Gryazin D. G., Evstifeev M. I., Nekrasov Ya. A., Aksenenko V. D. <i>Micromechanical Gyroscope Worked out at CSRI «ELECTROPRIBOR»</i>	29
Kalyaev I. A., Sheremet I. A. <i>Military Robotics: the Choice of the Way</i>	32
Pshikhopov V. Kh. <i>Construction of Repellers in Motion of Mobil Robots in the Medium with Obstructions</i>	34
Evseev A. A., Noskov V. P., Platonov A. K. <i>Formation of Electronic Card in Autonomus Motion into the Industrial Medium</i>	41
Krasiljnyants E. V., Burkov A. P., Ivankov V. A. <i>Use of Controllers of the Motions for Control Systems by Electromechanical Objects</i>	45
Aleksandrov A. A., Kabanov S. A. <i>Optimization of the Unmanned Flying Object Boarding with Restrictions on Control</i>	50
Bronnikov A. M. <i>The Formalized Synthesis of Nonlinear Laws of Management of Systems of Improvement of Stability and Controllability of Flying Machines</i>	55
Zavedeyev A. I., Arkhipov R. A. <i>Possible Approaches Construction of Perspective Spacecraft Attitude Control Systems by Means of Gyro Power Arrangements</i>	55
Sokolov S. V., Shcherban' I. V., Kulikov Ju. A. <i>Control Problem Solution by Guiding the Mobile Object to the Aim with the Apriori Uncertain Mobile Center on the Basis of the Optimal Estimation</i>	55
Mitrofanov D. G., Slatin V. V., Gribkov V. F., Ovchinnikova T. V. <i>The Comparative Analysis of Inverse Synthesizing Methods in Problems of Reception of Radar-Tracking Images</i>	55

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1

Телефон редакции журнала: **(495) 269-5397**, тел./факс: **(495) 269-5510**

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Художник *В.Н. Погорелов*.

Технический редактор *О.А. Ефремова*. Корректор *Е.В. Комиссарова*

Сдано в набор 05.12.2007. Подписано в печать 17.01.2008. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,47. Заказ 81. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15
