

В. Л. АНДРЕЕВ, Р. В. ИВАНОВ, Е. Б. КОЗЛОВ, С. Г. ПОТУПЧИК, П. В. СОКОЛОВ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫМИ ДИСТАНЦИОННО ПИЛОТИРУЕМЫМИ САМОЛЕТАМИ

Рассматриваются системы управления малоразмерными дистанционно пилотируемыми самолетами (ДПС), разработанные в Центре технологии беспилотной авиации ГУАП в 2003—2009 гг. Представлена упрощенная система управления ДПС по телевизионному изображению. Рассмотрены принципы построения системы автоматического управления (САУ), приведено описание двух САУ малоразмерных ДПС.

Ключевые слова: малоразмерный дистанционно пилотируемый самолет, система управления, система автоматического управления, автопилот.

С 1993 года в лаборатории технического моделирования — в дальнейшем Центр технологий беспилотной авиации (ЦТБА) — проводились работы по созданию технологий дистанционно пилотируемых самолетов (ДПС) и их применению. В начале своей деятельности коллектив взялся за разработку только самих ДПС для проведения экологического мониторинга [1, 2], но вскоре убедился, что этим весь спектр задач, стоящих перед проектировщиками комплексов с ДПС, не решить.

Процесс разработки, изготовления и испытания комплексов с ДПС включает в себя два основных направления работ:

- 1) создание собственно самого ДПС с требуемыми характеристиками;
- 2) создание функционально связанных аппаратно-программного комплекса бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) и аппаратно-программного комплекса наземного пункта управления (НПУ).

Оба направления могут разрабатываться параллельно, но, как показывает практика создания таких комплексов, основная сложность заключается в том, что, когда планер уже готов, большое количество времени и средств затрачивается на разработку бортовой и наземной радиоэлектронной системы управления.

В настоящей статье рассматриваются три системы управления ДПС, разработанные в ЦТБА ГУАП с 2004 по 2009 год.

Упрощенная СУ ДПС. В период с 1993 года до 2003 гг. в России отсутствовала система управления малоразмерными ДПС в загоризонтном полете, тогда как уже существовала необходимость выполнения мониторинговых работ (фотовидеонаблюдение), ведения кадастровых съемок, картографирования небольших площадей и т.д. на расстоянии 5—10 километров. Поэтому была разработана СУ, которая позволила контролировать полет ДПС вне пределов визуальной видимости по телевизионному изображению подстилающей поверхности и измерениям основных параметров полета, поступающих с борта летательного аппарата (ЛА) на НПУ [3, 4]. Пилот-оператор по этому изображению осуществляет управление ДПС, замыкая на себе всю информацию, поступающую с борта ЛА [3]. Структурная схема БРЭО упрощенной СУ представлена на рис. 1, НПУ — на рис. 2.

В качестве системы формирования, передачи и приема команд управления использовалась авиамодельная аппаратура фирмы Futaba. С помощью усилителя мощности 3,0 Вт дальность устойчивой работы радиоканала между системой Futaba и передающей антенной возрастала до 10 км.

Для передачи ТВ-изображения, полученного с бортовых камер, был применен комплекс беспроводной связи охранных систем.

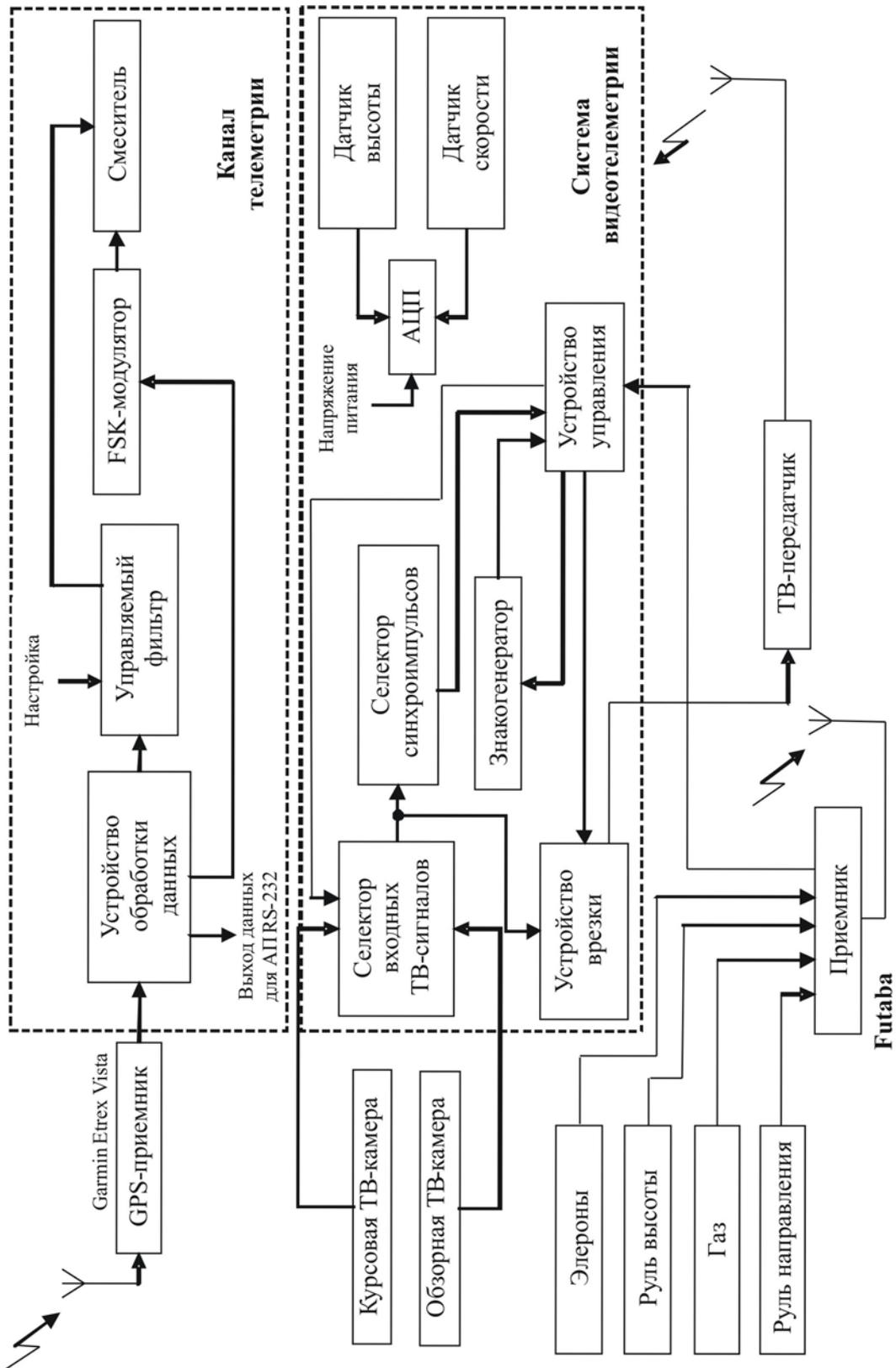


Рис. 1

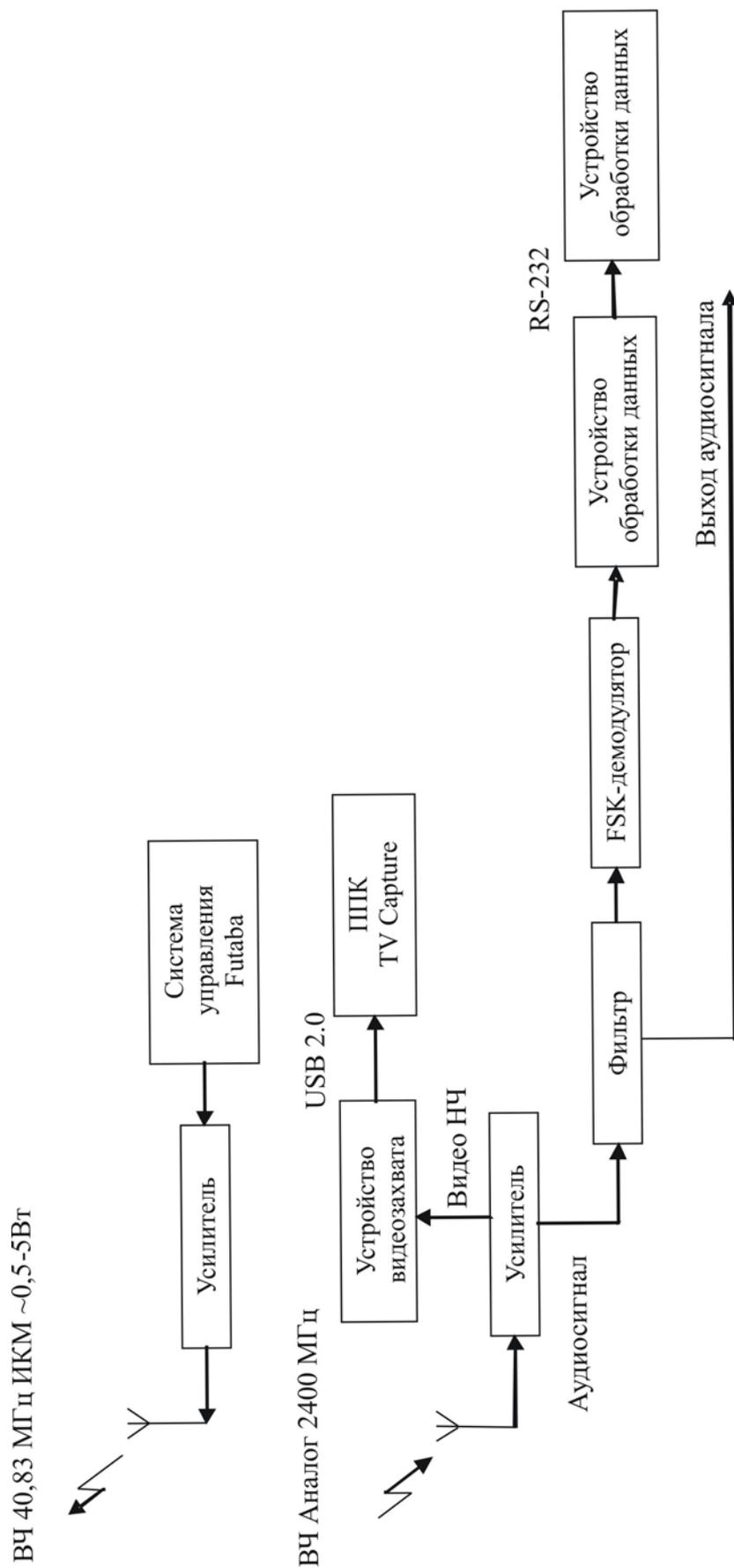


Рис. 2

Была разработана система видеотелеметрии, которая позволила измерять и накладывать на телевизионный сигнал информацию о высоте, скорости полета и напряжении питания бортовой сети (рис. 3, а). Конструктивно система выполнена в виде устройства, представляющего собой электронный блок размером $31 \times 50 \times 11$ мм и весом 12 г. К устройству подключались две ТВ-камеры (курсовая и обзорная), телевизионный передатчик, выключатель сброса барометрического высотомера и сигнал с приемника команд управления для коммутации камер. Для измерения высоты и скорости использовались термокомпенсированные датчики фирмы Motorola, а в качестве главного процессора — микроконтроллер фирмы Atmel.

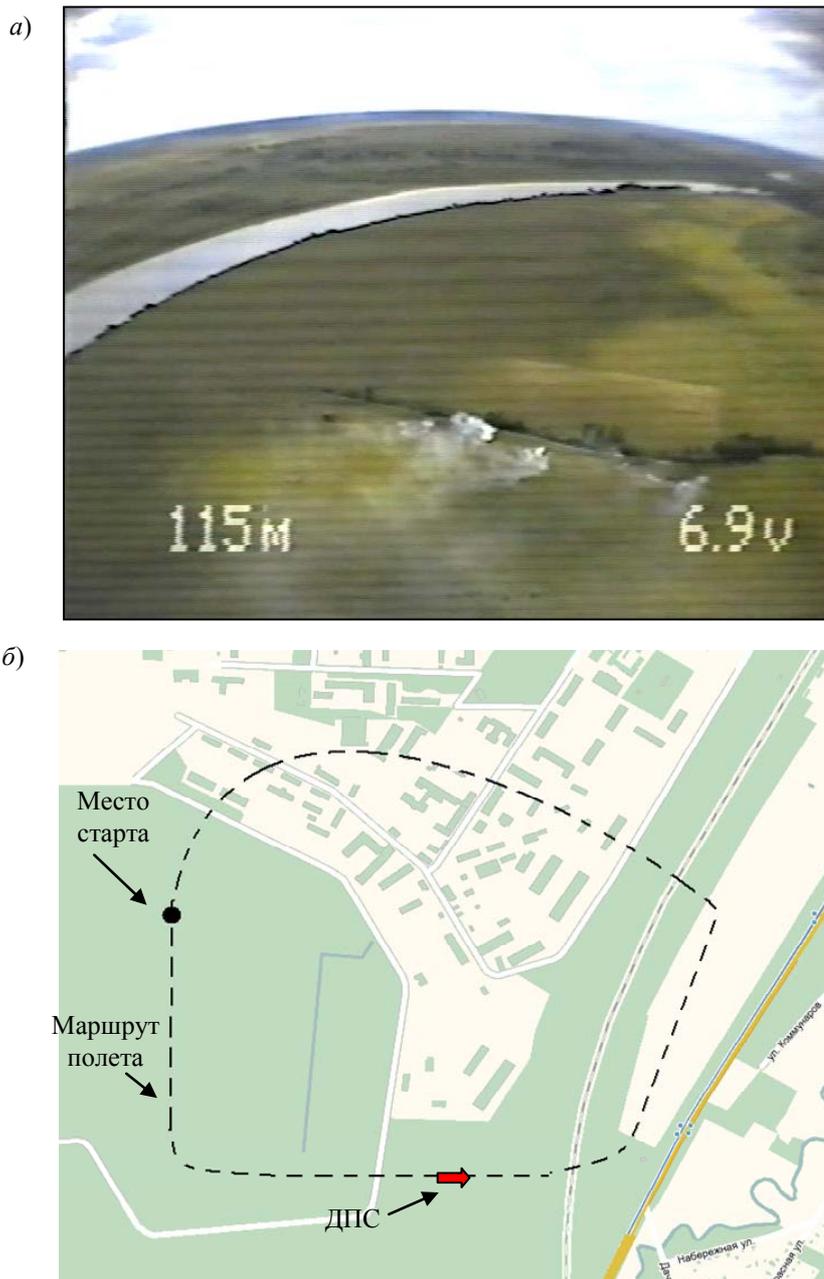


Рис. 3

СУ включала в себя приемник системы GPS и устройство передачи данных. В качестве GPS-приемника может использоваться любой приемник, имеющий выход RS-232 и передающий данные по протоколу NMEA 0183 (в данном случае Garmin Etrex Vista). В качестве радиоканала для передачи данных использовался канал передачи звука, входящий в состав телевизионного передатчика, имеющегося на борту ДПС. Таким образом, отпала необходимость в от-

дельном радиоканале передачи данных, что обеспечило преимущество в весе и позволило снизить энергопотребление бортовой аппаратуры ДПС.

Функционально устройство передачи данных представляет собой специализированный симплексный аудиомодем, работающий только в „одну сторону“ — на передачу данных. Скорость передачи данных — 1200—4800 бит/с.

Выходные данные представляют собой текстовые сообщения, содержащие информацию о координатах (широта и долгота), высоте, курсе, скорости, текущем времени, количестве видимых спутников и т.д. Для определения местонахождения ДПС по карте может быть использована любая геоинформационная система (ГИС), имеющая возможность работать с выходными данными по протоколу NMEA 0183, например OZI Explorer или MAP SOURCE.

Достаточный запас вычислительной мощности в передающей части модема позволил реализовать функцию „виртуального компаса“, предназначенного для определения расстояния и направления на наземный пункт управления ДПС или любую другую точку с известными координатами (рис. 3, б). Эти данные передаются в систему видеотелеметрии, которая обеспечивает их отображение на телевизионном экране совместно с изображением местности. Функция „виртуального компаса“ позволяет облегчить навигацию на местности при управлении ДПС по телевизионному изображению.

Следует отметить, что в данной СУ зарезервирован канал для связи с автопилотом, который будет подключаться между приемником системы управления Futaba и сервомеханизмами.

Данная упрощенная СУ ДПС успешно эксплуатировалась в течение двух лет.

Система автоматического управления АПС-2.1. С начала 2006 г., когда в свободной продаже появились микрогироскопы и микроакселерометры, выполненные по технологии MEMS, моноблоки GPS-системы и микроконтроллеры, коллектив ЦТБА начал разработку системы автоматического управления (САУ) для малоразмерных ДПС.

Рассмотрим условную структурную схему САУ ДПС (рис. 4).

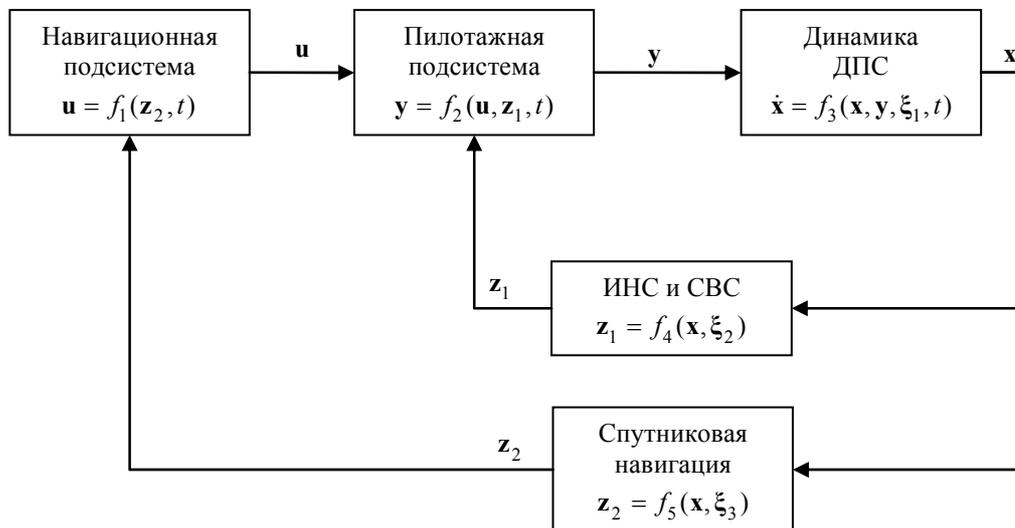


Рис. 4

Динамика ДПС как объекта управления описывается нелинейным дифференциальным уравнением вида:

$$\dot{\mathbf{x}} = f_3(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \xi_1, t),$$

где \mathbf{x} — n -мерный вектор состояния объекта; \mathbf{y} — m -мерный вектор управляющих воздействий (сигналов на рулевые машинки); ξ_1 — n -мерный вектор возмущающих воздействий.

Определение координат системы $\mathbf{z}_2 = f_5(\mathbf{x}, \xi_3)$ производится модулем спутниковой навигации, где \mathbf{z}_2 — l -мерный вектор координат; ξ_3 — l -мерный вектор помех.

Навигационная подсистема вырабатывает полетное задание:

$$\mathbf{u} = f_1(\mathbf{z}_2, t),$$

где \mathbf{u} — k -мерный вектор задающих сигналов для пилотажной подсистемы.

Положение ДПС в пространстве определяется инерциальной навигационной системой и системой воздушных сигналов:

$$\mathbf{z}_1 = b_5(\mathbf{x}, \xi_2),$$

где \mathbf{z}_1 — p -мерный вектор сигналов акселерометров, гироскопов, сигналов барометрической высоты и скорости; ξ_2 — p -мерный вектор помех.

Пилотажная подсистема вырабатывает воздействия на исполнительные сервомеханизмы.

Синтез алгоритмов управления ДПС производится на основе математической модели пространственного движения ДПС. Эта модель носит существенно нелинейный, многомерный характер с наличием перекрестных связей между каналами. Она учитывает не только собственную динамику ЛА и двигателя, но и модель атмосферы и внешних возмущений, а также требует учета типовых заданий ДПС в соответствии с его функциональностью, таких, например, как наведение на заданный курс, заданную точку, проход по специальным траекториям, заход на посадку и т.д. Отсутствие в контуре управления человека делает особенно важной задачу обеспечения робастности (грубости) по отношению к внешним возмущениям.

Программная реализация законов управления обеспечивает максимальную гибкость настройки, что в сочетании с грубостью используемых алгоритмов к внешним возмущениям позволяет использовать одно и то же программное обеспечение для управления ДПС различных аэродинамических схем, в том числе „летающее крыло“, „утка“, тандемной схемы. Предусмотрена возможность управления такими элементами механизации крыла, как закрылки, флапероны, тормозные щитки, обеспечивающими различные режимы полета.

На рис. 5 представлена функциональная схема САУ ДПС, из которой видно, что особая роль принадлежит автопилоту (АП), поскольку именно он реализует такие свойства ДПС, как автономность, независимость от человеческого фактора, „интеллектуальность“, устойчивость к внешним воздействиям. Автопилот осуществляет обмен информацией с НПУ, получает сигналы от инерциальной навигационной системы (ИНС), модуля спутниковой навигационной системы (СНС), системы воздушных сигналов (СВС) и других датчиков. На основе этой информации он вырабатывает управляющие воздействия на исполнительные сервомеханизмы, осуществляя автоматическую стабилизацию углов положения и угловых скоростей ДПС, регулируя скорость и высоту с целью обеспечения заданных параметров полета.

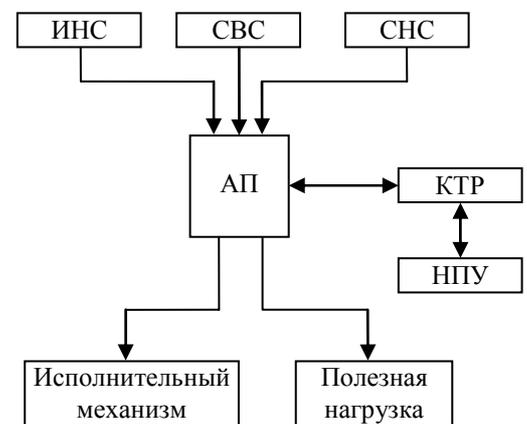


Рис. 5

Одной из характерных тенденций развития теории управления движением ЛА является интеграция систем управления, решающих частные задачи. Это особенно актуально для малоразмерных ДПС в силу ограниченности их массогабаритных и стоимостных характеристик. Поэтому помимо своей основной задачи — управления полетом ДПС по заданному маршруту — автопилот осуществляет управление полезной нагрузкой, а также вспомогательными бортовыми устройствами.

Решаемую автопилотом задачу по управлению полетом можно разделить на подзадачу навигации, состоящую в определении координат ДПС в пространстве, и подзадачу пилотирования, которая состоит в управлении ДПС по навигационным данным.

Решение задачи навигации осуществляется с помощью модуля спутниковой навигационной системы. Такой подход является в настоящее время стандартным для малоразмерных ДПС. Используемый приемник спутниковых сигналов имеет возможность работать по сигналам ГЛОНАСС и GPS. Резервный канал обеспечивается с помощью трехосевого магнитного датчика. Наличие резервного канала позволяет реализовать различные варианты наведения ДПС в случае временного или постоянного исчезновения сигналов со спутников или их искажения.

Подзадача пилотирования решается на основе информации, поступающей от инерциальной навигационной системы и системы воздушных сигналов. В состав модуля инерциальной навигационной системы входят три микромеханических датчика угловой скорости (гироскопа) и три микромеханических акселерометра [5]. Модуль системы воздушных сигналов имеет в своем составе датчики статического и динамического давления.

Указанные авторами положения были реализованы в САУ АПС-2.1, которая предназначена для управления малоразмерными ДПС самолетной схемы и его полезной нагрузкой, САУ обеспечивает:

- 1) стабилизацию углов положения ДПС в полете;
- 2) навигацию и управление ДПС при полете по заданной траектории;
- 3) передачу телеметрической информации о навигационных параметрах и углах положения ДПС в реальном режиме времени.

Система может работать в автоматическом, полуавтоматическом и автономном режимах. В автоматическом режиме производится полет ДПС по заданному маршруту с возможностью оперативной корректировки отдельных точек маршрута или всего маршрута в целом. Число точек маршрута — 100. Для каждой точки могут быть заданы своя высота и признак облета точки (барражирование над точкой и т.п.).

В автономном режиме система работает при отсутствии связи с ДПС (в режиме радиомолчания). Коррекция маршрута и контроль его выполнения при этом производиться не могут.

В полуавтоматическом режиме управление ДПС может производиться с манипулятора типа „джойстик“, с клавиатуры персонального компьютера или пульта управления. При этом осуществляется автоматическая стабилизация задаваемых углов положения и угловых скоростей ДПС с целью удержания их в пределах допустимых значений, также осуществляется удержание заданной высоты.

Взлет и посадка ДПС реализуются в ручном и автоматическом режиме. В настоящее время отработан алгоритм автоматического взлета и захода на посадку.

В состав САУ АПС-2.1 входят:

- 1) модуль автопилота имеет интегрированную ИНС, определяет ускорения и угловые скорости ЛА, вырабатывает управляющие воздействия на исполнительные механизмы, обменивается данными с остальными модулями. В базовой комплектации предусмотрены выходы на шесть стандартных сервомеханизмов, четыре из них задействованы в канале управления, два — для управления приборами навигации. Вес модуля — 8 г, размеры 35×40×12 мм;

- 2) модуль видеотелеметрии измеряет барометрическую высоту и скорость, обрабатывает видеосигнал с телевизионной камеры, производя врезку данных для отображения в составе изображения, передаваемого одной или двумя телевизионными камерами. Также производится отображение навигационной информации (номера точки маршрута, дальности и направления). Вес модуля — 7 г, размеры 30×32×12 мм;

- 3) модуль GPS включает в себя собственно приемник GPS (чипсет Sirf Star2 LP или Antaris) и аудиомодем, передающий данные о координатах в звуковом канале телевизионной

камеры совместно со звуком. Таким образом, канал передачи координат дублирован. Вес модуля — 13 г, размеры 25×50×7 мм;

4) модуль командно-телеметрической радиолинии (КТР) осуществляет связь с аналогичным наземным модулем, принимает команды управления и передает телеметрическую и навигационную информацию. Частотный диапазон — 900 МГц. Вес модуля — 7 г, размеры — 21×40×12 мм. Также на борту может быть установлен стандартный приемник системы радиоуправления моделями, автопилот может быть включен или выключен по команде. При этом управление осуществляется в ручном режиме со стандартного пульта. Напряжение питания всей системы 5—14 В, потребляемый ток — 300 мА;

5) наземный пункт управления состоит из наземного модуля КТР, стандартного ПК (ноутбука) и передатчика системы ручного управления.

Программное обеспечение НПУ позволяет:

а) использовать в качестве карты любое растровое изображение местности. Привязка может быть осуществлена пользователем по двум и более точкам, также можно использовать файлы привязки и электронные карты, совместимые с популярной программой Ozi Explorer;

б) вводить и редактировать маршрут ДПС — до 100 точек маршрута. Для каждой точки могут быть заданы высота и признак облета точки (барражирование). Облет задается по количеству проходов над точкой или по времени. Маршрут может быть скорректирован или введен заново и во время полета — для ввода маршрута используется радиоканал;

в) задавать точку „дом“ и точку посадки, а также алгоритмы поведения в нештатных ситуациях, таких как пропадание радиосвязи, отсутствие сигналов GPS, отказ двигателя.

Основой пользовательского интерфейса служат цифровая карта и накладываемые на нее интерактивные панели управления. Расположение и наличие панелей на карте пользователь может выбрать сам или использовать один из „стандартных“ вариантов.

При записи точек и любых действий, связанных с изменением режима управления ДПС, ведется лог (дневник) возникших событий. Также в него записываются поступающие телеметрические данные. GPS-трек полета пишется в отдельном файле, он совместим по формату с программой OZI Explorer и др. Панель оперативной индикации (под картой) позволяет оперативно контролировать все важные параметры для анализа функционирования и исправности бортовых систем.

Для просмотра логов полета, в том числе в режиме реального времени, анализа поведения аппарата в полете и оперативной корректировки настроек регуляторов с учетом отображаемых в виде графиков и диаграмм параметров используется отдельное программное обеспечение. Отладочный комплект также позволяет настроить и проверить корректность функционирования каждой системы отдельно с применением тестовых сигналов и симуляторов с отображением и записью результатов проверок в виде графиков, диаграмм и цветовых индикаторов.

Модули видеотелеметрии и GPS могут использоваться на дистанционно пилотируемых летательных аппаратах, оснащенных телевизионной системой, передающей видеоизображение в реальном масштабе времени в формате PAL. При этом данные видеотелеметрии отображаются непосредственно в кадре (рис. 3), а GPS-информация передается по звуковому каналу совместно со звуком, воспринимаемым встроенным микрофоном, и далее через интерфейсный кабель на COM-порт (RS-232).

Архитектура построения многомодульной системы оправдала себя в основном на аппаратах малых и сверхмалых размеров.

Выполнено свыше 1000 полетов ДПС, оснащенных САУ АПС-2.1, что доказывает правильность выбора стратегии построения системы автоматического управления для малоразмерных ДПС. В 2008 году САУ АПС-2.1 экспонировалась на Международном салоне „Комплексная безопасность“ (Москва), где и была отмечена дипломом. Выводы, сделанные в ходе эксплуатации САУ АПС-2.1, позволили наметить пути улучшения системы управления.

Система автоматического управления АПС-2.2 является модификацией САУ АПС-2.1 и имеет следующие основные отличия:

- 1) моноблочное исполнение;
- 2) предусмотрены выходы на 12 стандартных сервомеханизмов, четыре из них задействованы в канале управления, остальные могут быть конфигурированы как для управления сервомеханизмами, так и дискретными выключателями;
- 3) модуль GPS включает в себя собственно приемник GPS (чипсет Antaris4);
- 4) для обработки информации, цифровой фильтрации сигналов и реализации законов управления применен 8-разрядный AVR-микроконтроллер ATmega 128.

Конструктивно автопилот, инерциальная система и система спутниковой навигации выполнены в виде единого блока. Также на блоке смонтированы преобразователи напряжения для сервомеханизмов, модуля спутниковой навигации и аппаратуры командно-телеметрической радиолинии. Вес такого блока составляет всего 22 г, его габаритные размеры 54×40×25 мм, а потребляемая мощность около 1 Вт. Массогабаритные характеристики блока — одни из наименьших в своем классе, для сравнения: автопилотный модуль MicroPilot одноименной фирмы весит 28 г.

Тщательный выбор датчиков, а также примененные алгоритмы управления движением ДПС позволяют добиться высоких точностных показателей. При прохождении поворотного пункта маршрута ДПС „Орлан-3М“ на скорости 100—150 км/ч среднеквадратичное отклонение составляет менее 15 м, что дает возможность производить высококачественную фото-, видео- и тепловизионную съемку наземных объектов, в том числе с помощью стабилизированной камеры.

Ниже приведены основные параметры САУ АПС-2.2.

В заключение следует отметить, что САУ АПС-2.2 является комплексобразующей для всех разработок ЦТБА ГУАП в области ДПС начиная с 2009 г.

Технические характеристики	
Частота обновления данных GPS	до 4 Гц
Интерфейсы	RS-232, I2C, SPI
Частота обновления данных	до 200 Гц
Окружающая среда	
Рабочая температура	-40—+70 °С
Электрические параметры	
Напряжение питания	7,5—16,0 В
Потребляемая мощность	0,5 Вт
Рабочий диапазон	
Крен	±180°
Тангаж	±90°
Курс	360°
Ускорение	±10g
Угловая скорость	±300 °/с
Точностные характеристики	
Координаты	5,0 м
Высота	1,0 м
Путевая скорость	0,25 м/с
Вертикальная скорость	0,2 м/с
Углы ориентации:	
прямолинейный полет	0,2—0,3°
маневрирование	2,0°
курс	0,2°
Высота	до 10 000 м
Скорость	500 км/ч

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биненко В. И., Донченко В. К., Андреев В. Л., Иванов Р. В. Некоторые результаты и перспективы использования беспилотных летательных аппаратов для задач экологического мониторинга // Экологическая химия. 2001. Т. 10. С. 21—30.
2. Андреев В. Л., Биненко В. И., Иванов Р. В. Обнаружение нефтяных загрязнений акваторий портов Балтийского моря на основе микроавиации // Сб. докл. Пятого Междунар. экологического форума, посвященного 30-летию подписания Хельсинкской Конвенции. СПб, 2004.
3. Анцев Г. В., Тупиков В. Л., Турнецкий Л. С., Андреев В. Л., Иванов Р. В., Козлов Е. Б. Упрощенная система управления дистанционно пилотируемыми аппаратами // Мир авионики. 2004. № 2. С. 52—54.
4. Анцев Г. В., Андреев В. Л., Барабанов А. Д., Иванов Р. В. и др. Управление и навигация дистанционно пилотируемых вертолетов // Гироскопия и навигация. 2006. № 1(52). С. 85—94.
5. Анучин О. Н., Емельянов Г. И. Интегрированные системы ориентации для морских подвижных объектов / Под общ. ред. чл.-кор. РАН В. Г. Пешехонова. СПб, 1999. 367 с.

Сведения об авторах

- Владимир Леонидович Андреев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Центр технологии беспилотной авиации; старший научный сотрудник
- Роман Вячеславович Иванов** — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Центр технологии беспилотной авиации; директор; E-mail: roman_spb@mail.ru
- Евгений Борисович Козлов** — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Центр технологии беспилотной авиации; зав. лабораторией; E-mail: kozlov_e@inbox.ru
- Сергей Георгиевич Потупчик** — ООО „Специальный технологический центр“, Санкт-Петербург; руководитель отдела; E-mail: serj_uav@mail.ru
- Петр Валентинович Соколов** — ООО „Технологии автоматизации и программирования“, Санкт-Петербург; ведущий программист

Рекомендована ГУАП

Поступила в редакцию
04.04.11 г.