

УДК 621.314.5

doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-78-88

Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА

И.Н. Пантелеймонов¹, А.В. Белозерцев¹, А.А. Монастыренко¹,
В.В. Боцва², А.В. Наумкин³

¹ АО «Российские Космические Системы»

² АО «ЦНИИМаш»

³ Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение города Москвы «Колледж связи № 54» имени П.М. Вострухина

The Main Trends in Developing Highly Reliable Communication and Control Systems for Unmanned Aerial Vehicles

I.N. Panteleimonov¹, A.V. Belozertsev¹, A.A. Monastyrenko¹,
V.V. Botsva², A.V. Naumkin³

¹ AO Russian Space Systems

² System Engineering Center for Space Activities AO TSNIIMASH

³ State Budgetary Vocational Educational Institution of the City of Moscow — Communications College No. 54 named after P.M. Vostrukhin

Рассмотрена проблема создания высоконадежной универсальной системы связи и управления для беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающей их бесперебойную работу независимо от местоположения и назначения. Для решения этой проблемы предложено использовать три цифровые сети передачи данных — наземную, воздушную и спутниковую — с применением стека протоколов TCP/IP и SCADA-системы — современных способов управления, обработки и отображения информации. В целях повышения надежности, живучести, скрытности и помехозащищенности системы связи и управления рекомендовано передавать информацию в оптическом и радиодиапазонах.

Ключевые слова: системы связи и управления, БПЛА, спутник-ретранслятор, воздушный ретранслятор, наземный ретранслятор, линия связи, бортовой ретрансляционный комплекс, антенная система

This work examines the problem of developing a highly reliable and universal communication and control system for unmanned aerial vehicles that provides uninterrupted operation regardless of the vehicles' location and destination. For this purpose, it is proposed to create three digital data transmission networks: ground, air and satellite using a stack of TCP/IP protocols and modern methods of management, processing and display of information (SCADA-system). To improve reliability, survivability, stealth and noise immunity of the communication and control system of unmanned aerial vehicles it is proposed to transmit information in the optical and radio bands.

Keywords: communication and control systems, UAV, satellite-repeater, air repeater, ground repeater, communication line, onboard radio complex, antenna system

Реализация целевого назначения различных автоматизированных систем во многом определяется качеством системы связи и управления (ССУ). Основными показателями качества ССУ являются непрерывность, оперативность, глобальность, надежность, живучесть, скрытность и производительность [1, 2].

Для обеспечения глобальной связи с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) могут быть использованы различные сети ретрансляторов: наземные специализированные радиостанции, базовые станции сети подвижной связи, воздушные ретрансляторы (ВР), спутники-ретрансляторы (СР). У каждой из этих сетей есть свои преимущества и недостатки.

Так, ССУ с применением наземных специализированных радиостанций не обеспечивает глобальность (так как имеет низкий радиус действия — до 100 км) и высоко уязвим в случае природных и техногенных катастроф.

ССУ с использованием наземных базовых станций сети подвижной связи не обеспечивает глобальность в труднодоступных и малонаселенных районах, акваториях морей и океанов, не предназначена для задач управления БПЛА (что приводит к перерывам связи особенно в высокоскоростном канале связи), нуждается в дополнительных средствах защиты информации, обладает высокой уязвимостью при природных и техногенных катастрофах.

ССУ с применением ВР (специализированных БПЛА, аэростатов, дирижаблей и самолетов) не обеспечивает глобальность и высоко уязвима при неблагоприятных погодных условиях (например, при урагане) и ведении боевых действий.

ССУ с использованием СР, в качестве которых могут выступать геостационарные, средние и низкоорбитальные космические аппараты (КА), не обеспечивает высокую оперативность доведения критичной к задержкам информации и имеет большую стоимость создания и развертывания.

Цель работы — разработка основных направлений создания современной эффективной универсальной системы связи и управления полетом группировок БПЛА различного назначения, обеспечивающей непрерывную глобальную доступность БПЛА для контроля и управления оператором центра управления полетом (ЦУП), оперативность, высокую надежность, производительность, устойчивость и

живучесть ССУ, скрытность связи и требуемую криптостойкость информации.

В настоящее время активно развиваются технологии группового взаимодействия БПЛА (летающие сенсорные сети) [3–10], расположенных на значительном удалении от сети общего пользования [9–11].

Основные методы обеспечения выполнения заданных требований к ССУ БПЛА. Для исключения указанных недостатков и реализации технологии группового взаимодействия БПЛА, расположенных на значительном удалении от сети связи общего пользования, предлагается следующий комплекс мер.

Методы обеспечения непрерывной глобальной доступности БПЛА для контроля и управления оператором ЦУП:

- применение трех видов сетей ретрансляторов: наземных, воздушных и спутниковых;
- использование двух диапазонов электромагнитного излучения: оптического (ОД) и радиодиапазона (РД);
- применение четырех малонаправленных антенных систем (АС) ОД, расположенных по осям симметрии БПЛА Y и X (или Z), с диаграммой направленности 90° для установления связи и передачи информации управления (ИУ) и низкоскоростной целевой информации (ЦИ), а также для передачи высокоскоростной ЦИ от ведомых БПЛА на ведущий БПЛА;
- использование остронаправленных АС ОД и РД для передачи ИУ и ЦИ от ведущего БПЛА на ретранслятор.

Методы повышения оперативности ССУ:

- обеспечение постоянной доступности БПЛА;
- построение протоколов маршрутизации, основанных на алгоритмах поиска кратчайших маршрутов передачи информации.

Методы повышения надежности и живучести ССУ:

- применение двух диапазонов электромагнитного излучения: ОД и РД;
- использование двух видов каналов связи: низко- и высокоскоростного;
- обеспечение скрытности связи с БПЛА.

Методы обеспечения скрытности связи:

- применение зонального способа регистрации БПЛА в ретрансляторе [12], что позволяет работать БПЛА только на прием;
- осуществление связи ЦУП при групповом полете только с ведущим БПЛА, который ре-

транслирует информацию на остальные ведомые БПЛА группы (кластеры), при этом расстояние между ними может составлять до 1,5 км [13–15]; для этого заранее выбирается (на конкурсной основе или административно назначается) ведущий БПЛА и его заместитель; при выходе из строя ведущего БПЛА, его функции автоматически переходят к его заместителю, и сразу осуществляется процедура определения нового заместителя;

- применение для высокоскоростной связи ведущего БПЛА с ЦУП при благоприятных атмосферных условиях инфракрасного поддиапазона ОД;

- использование радиолиний низкоскоростной связи для процедуры установления связи ведущего БПЛА с ЦУП и для передачи инфор-

мации на небольшие расстояния между ведомыми и ведущим БПЛА;

- применение для высокоскоростной связи ведущего БПЛА с ЦУП при неблагоприятных атмосферных условиях РД; в случае ухудшения светопрозрачности атмосферы система связи автоматически переходит с работы в ОД на РД;

- при работе в РД предлагается использовать технологии шумоподобных сигналов, псевдослучайной перестройки по рабочей частоте (Frequency Hopping), сжатия информации с целью уменьшения длительности ее передачи; в качестве остронаправленных АС в высокоскоростном канале связи радиолинии целесообразно применять приемную и передающую активные фазированные антенные

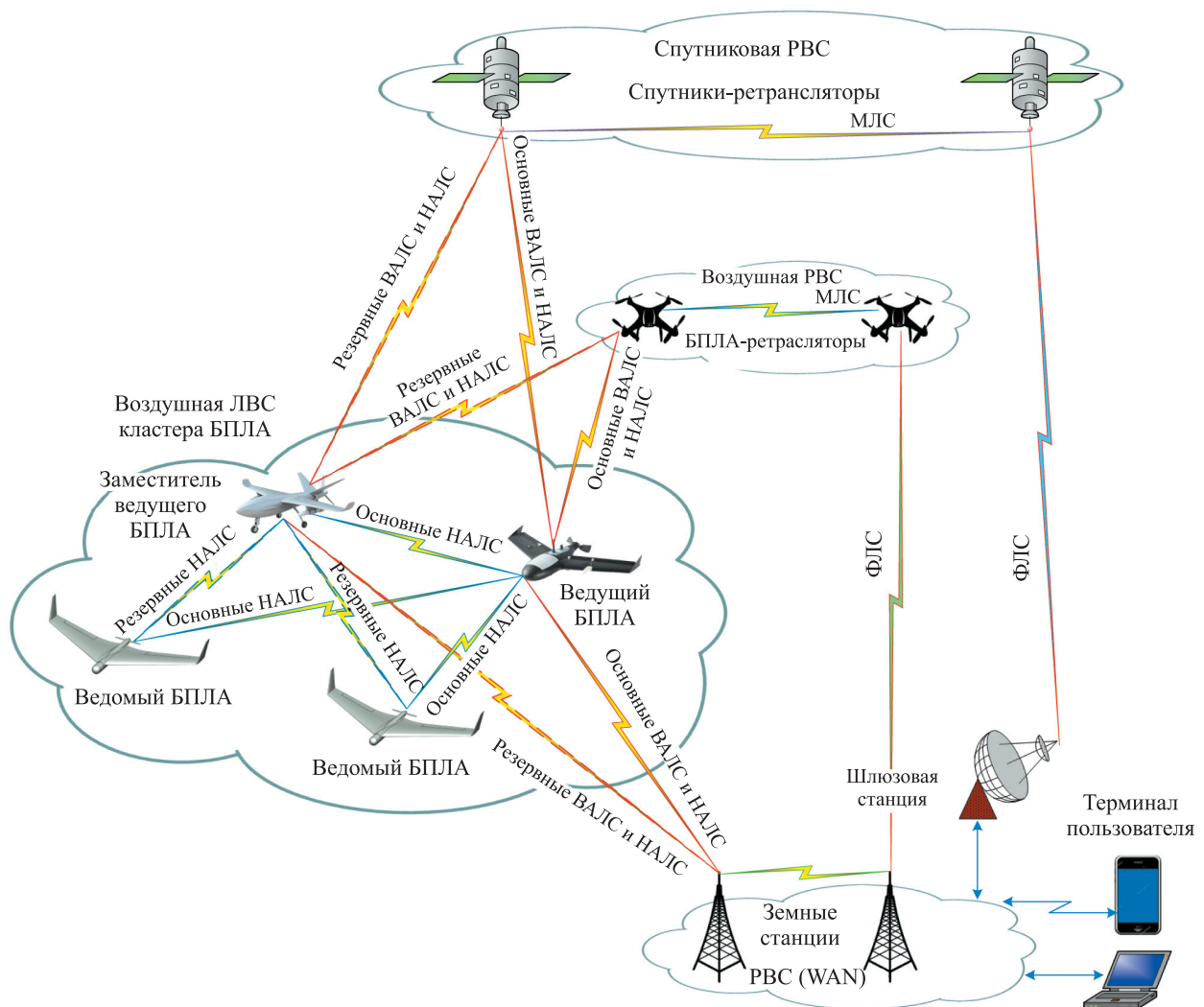


Рис. 1. Схема комплексного применения наземных, воздушных, спутниковых сетей и ведущих БПЛА для организации связи:

РВС и ЛВС — распределенная и локальная вычислительная сеть;
WAN (Wide Area Network) — глобальная вычислительная сеть

решетки (АФАР), а в качестве малонаправленных АС в низкоскоростном канале — спиральные, щелевые или полосковые АС.

Схема комплексного применения наземных, воздушных, спутниковых сетей и ведущих БПЛА для организации связи приведена на рис. 1.

Методы повышения производительности ССУ:

- увеличение автономности функционирования БПЛА или его кластера;
- адаптивное динамическое перераспределение задач между БПЛА одного кластера;
- автоматизация процедуры выбора ведущего БПЛА и его заместителя;
- автоматизация процедуры установления связи: между ведущим и ведомыми БПЛА, между ведущим БПЛА и ретрансляторами;
- применение стека протоколов TCP/IP;

- использование современных способов сбора и обработки информации — системы SCADA;
- применение современных способов удаленного доступа — Telnet, HTTP и VNC;
- автономная синхронизация бортовой шкалы времени БПЛА по сигналам ГЛОНАСС;
- автономная работа бортовой навигационной системы БПЛА по сигналам ГЛОНАСС.

Методы обеспечения криптостойкости информации:

- использование криптостойких и сертифицированных в РФ алгоритмов шифрования информации алгоритмов и аутентификации;
- передача ЦИ и ИУ в отдельных виртуальных локальных сетях (VLAN) с целью отдельного шифрования;
- обеспечение скрытности связи.

Схема организации защиты информации в каналах связи приведена на рис. 2.

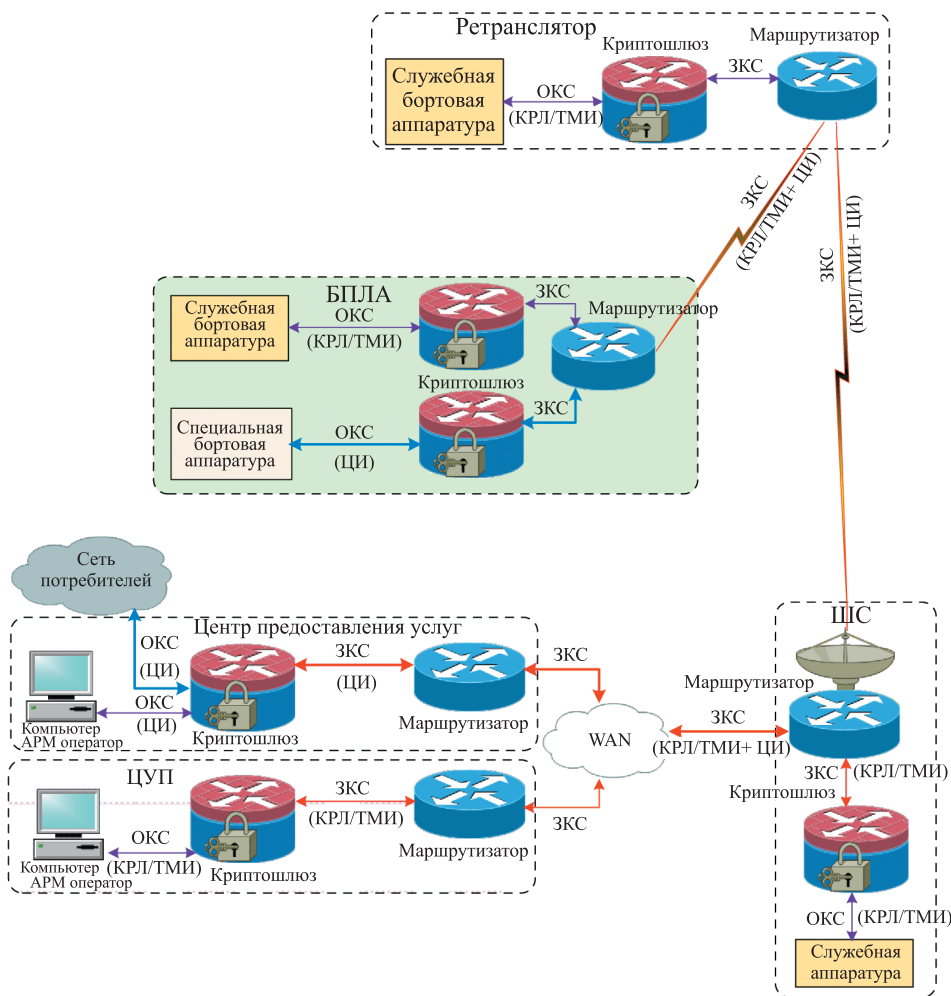


Рис. 2. Схема организации защиты информации в каналах связи: ОКС и ЗКС — открытый и закрытый каналы связи; КРЛ — командная радиолиния; ТМИ — телеметрическая информация; АРМ — автоматизированное рабочее место; ШС — шлюзовая станция

Основные направления создания ССУ БПЛА. Линии связи и функциональная схема бортового ретрансляционного комплекса БПЛА.

Для передачи информации в спутниковых и наземных линиях связи (ЛС) применяют стек протоколов TCP/IP, который дает возможность передавать ЦИ и ИУ в спутниковых, воздушных и наземных ЛС в едином цифровом потоке, но в разных виртуальных локальных вычислительных сетях (VLAN).

Для резервирования и функционального дополнения оптических ЛС с целью повышения надежности, живучести и оперативности ССУ могут быть использованы следующие радиолинии связи.

Низкоскоростная абонентская ЛС (НАЛС), обеспечивающая скорость передачи информации до 32...64 кбит/с, предназначена для передачи служебной информации при установлении связи, для передачи ИУ и низкоскоростной ЦИ в таких каналах связи, как ведомый БПЛА — ведущий БПЛА (см. рис. 1), ведущий БПЛА — ВР или ведущий БПЛА — СР, СР — СР, ВР — ВР, СР или ВР — ШС и ведущий БПЛА — ШС, а также для передачи высокоскоростной ЦИ от ведомого БПЛА к ведущему. В качестве АС эффективно применять четыре малонаправленные антенны (МНА) с диаграммой направленности 90° , расположенные по осям симметрии БПЛА $+Y$, $-Y$, $+X$, $-X$.

Самые распространенные частоты для передачи видеoinформации БПЛА — 900 МГц; 1,2...1,3; 2,4 и 5,8 ГГц [4]. Для организации НАЛС можно рассмотреть возможность использования полос частот в R-, L-, S-, C- или X-диапазоне. В качестве МНА могут быть задействованы полосковая, щелевая, спиральная АС или системы спиральных АС, имеющих коэффициент усиления 4...8 дБ.

Высокоскоростная абонентская ЛС (ВАЛС) предназначена для обмена ЦИ и ИУ между ведущим БПЛА и ретранслятором (см. рис. 1), в качестве которого может выступать воздушный, спутниковый или наземный ретрансляторы (ШС). Для ВАЛС целесообразно применять оптическую линию связи (ОЛС), дублируя ее резервной радиолинией связи (РЛС). Скорость передачи информации между ведомыми и ведущим БПЛА в оптической ВАЛС достигает 100 Мбит/с, а в радио-ВАЛС — 25 Мбит/с. Скорость передачи информации между ведущим БПЛА и ретранслятором (ВР,

СР или ШС) в оптической ВАЛС доходит до 1 Гбит/с, а в радио-ВАЛС — до 250 Мбит/с.

В качестве антенной системы следует использовать одну–две остронаправленные АС (ОНА) с возможностью наведения по осям $+Y$, $-Y$, $+Z$, $-Z$, $+X$, $-X$.

Фидерная ЛС (ФЛС) предназначена для обмена ЦИ и ИУ воздушного или спутникового ретранслятора с ШС (см. рис. 1). Для организации ФЛС целесообразно применять ОЛС со скоростью передачи информации до 4 Гбит/с, дублируя ее резервной РЛС со скоростью передачи информации до 1 Гбит/с. В качестве бортовой АС СР или ВР в радиолинии эффективно использовать одну–две зеркальные АС или две АФАР (приемную и передающую), расположенные по осям $-Y$.

В целях экономии частотного ресурса и оптимизации бортового и наземного высокочастотного оборудования предлагается применять один и тот же диапазон частот для организации высокоскоростной ФЛС и ВАЛС.

Высокоскоростная межретрансляторная ЛС (МЛС) предназначена для передачи ЦИ и ИУ между соседними СР или ВР (см. рис. 1) и в перспективе между СР и ВР. Для организации МЛС между СР целесообразно использовать ОЛС со скоростью передачи информации до 4 Гбит/с без применения РЛС для резервирования. Для организации МЛС между ВР, а в перспективе между СР и ВР, целесообразно организовать ОЛС со скоростью передачи информации до 4 Гбит/с, дублируя ее резервным РЛС со скоростью передачи информации до 1 Гбит/с. В качестве АС должны быть задействованы две или четыре ОНА, расположенные по осям $+Z$, $-Z$, $+X$, $-X$.

Следует отметить, что вопросы предоставления полос частот необходимо решить на этапе НИР и эскизного проектирования.

Функциональная схема бортового ретрансляционного комплекса (БРК) БПЛА изображена на рис. 3.

Способы сбора, обработки и отображения информации, выработки и передачи управляющих воздействий. Применение сетки протоколов TCP/IP дает возможность использовать известные протоколы удаленного доступа VNC, а также удаленной настройки Telnet и HTTP в текстовом и графическом режимах соответственно. В результате качество управления повышается и переходит на новый уровень.

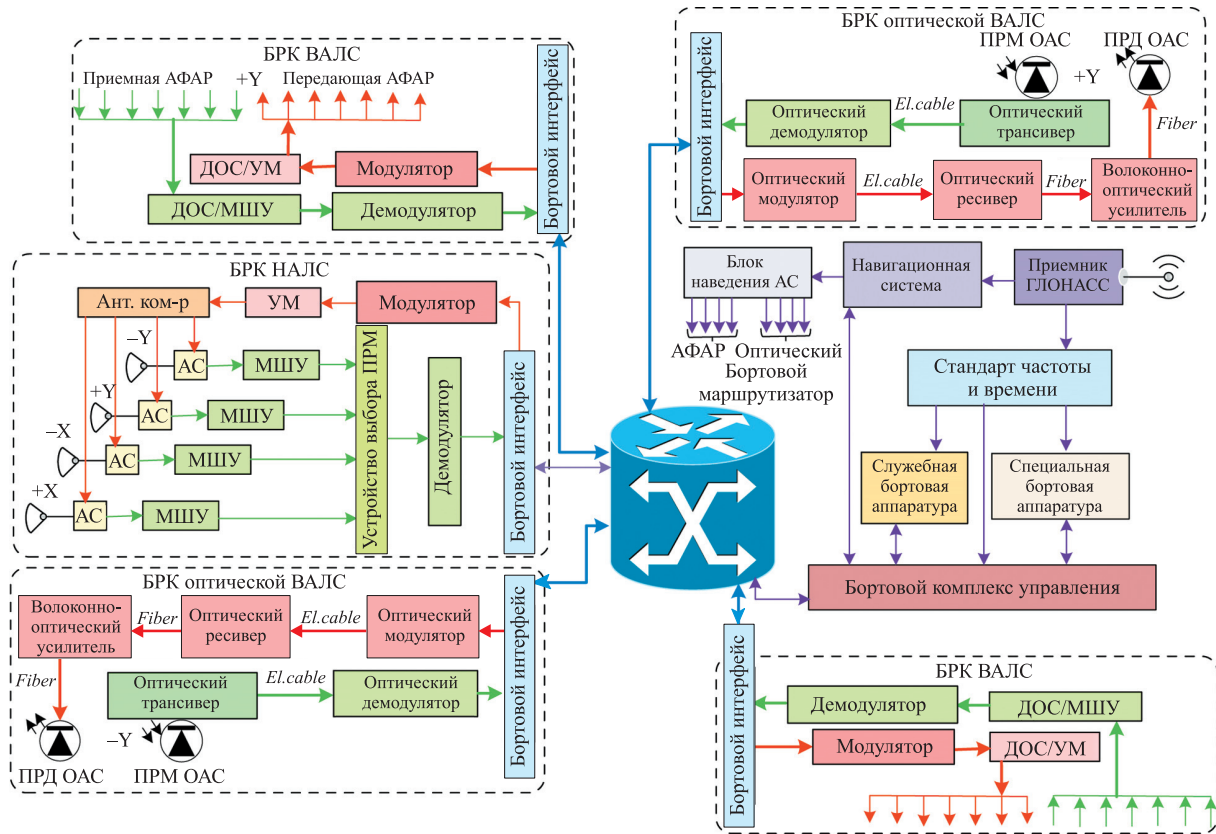


Рис. 3. Функциональная схема перспективного БРК БПЛА с применением аппаратуры ОД и РД:
 ДОС — диаграммообразующая схема; МШУ — маломощный усилитель; УМ — усилитель мощности;
 ПРМ — приемное устройство; ПРД — передающее устройство; ОАС — оптическая антенная система;
 Fiber — волоконно-оптический кабель; El.cable — электрический кабель

Для сбора ТМИ о состоянии бортового оборудования БПЛА и ретрансляторов, передачи ТМИ на компьютер оператора ЦУП, отображения информации ТМИ в графическом виде на мониторе оператора ЦУП, а также для передачи управляющих воздействий (сформированных автоматически компьютером ЦУП или заданных в ручном режиме оператором ЦУП) предлагается применять систему SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных).

Использование SCADA-системы в (наземном и бортовом) комплексе управления полетом КА открывает возможности применения всех современных отработанных в наземных особо критичных объектах технологий мониторинга и управления в режиме реального времени.

Автоматизированная система управления (АСУ) SCADA имеет три уровня иерархии:

- нижний — датчики и исполнительные устройства систем БПЛА;
- средний — контроллеры систем БПЛА и бортовой центральной вычислительной машины;

- верхний — АРМ оператора ЦУП.

Для удобства восприятия информации оперативно-техническим персоналом ЦУП предлагаются следующие уровни иерархии АСУ SCADA:

- отображение состояния:
 - всей группировки БПЛА, а также ССУ на СР, ВР и ШС;
 - отдельного БПЛА;
 - отдельной системы БПЛА;
 - отдельного блока (модуля) системы БПЛА;
- режим командной строки.

Необходимо отметить, что при работе с применением протоколов удаленного доступа компьютер сотрудника ЦУП выполняет функции клиента, а центральная управляющая машина или другое оборудование бортовой аппаратуры БПЛА, имеющее контроллеры управления, — функцию сервера.

ССУ БПЛА с применением АСУ SCADA обладает следующими полезными особенностями:

- высокой надежностью системы управления, благодаря тому, что в бортовой центральной

ной вычислительной машине БПЛА установлена операционная система жесткого реального времени, которой управляет SCADA-приложение, отработанное для задач управления наземными особо критическими объектами;

- высокой эргономичностью системы управления за счет графического отображения состояния группировки БПЛА и отдельного БПЛА.

Логическое значение объектов ССУ БПЛА.

Органом управления полетом и решением целевой задачи кластера БПЛА является ЦУП. В качестве объектов управления выступают ретрансляторы наземной, воздушной и спутниковой сетей, ведущий БПЛА и ведомые БПЛА.

Логическое значение объектов ССУ БПЛА на физическом и канальном уровнях образцовой модели OSI (по аналогии с наземными сетями подвижной связи):

- ретрансляторы наземной, воздушной и спутниковой сетей выполняют роль базовой станции и локального коммутатора по отношению к ведущему БПЛА;

- ведущий БПЛА является абонентом наземной, воздушной и спутниковой сетей связи;

- ведущий БПЛА по отношению к ведомым БПЛА выполняет роль базовой станции пикосоты;

- ведомые БПЛА служат абонентами пикосоты.

Логическое значение объектов ССУ БПЛА на сетевом уровне образцовой модели OSI:

- ретранслятор выполняет роль граничного маршрутизатора (Border Router) для ведущего БПЛА;

- ведущий БПЛА является шлюзом по умолчанию (Default Gateway) для ведомых БПЛА;

- ведомый БПЛА служит узлом (Host) — получателем или отправителем информации.

Логическое значение сетей:

- ретрансляторов (ВР, СР и ШС) — различные домены РВС (WAN);

- кластеры БПЛА — локальная сеть (LAN).

Сетевое взаимодействие осуществляется на уровне приложений образцовой модели OSI:

- между компьютером АРМ оператора и компьютером ретранслятора (СР, ВР и ШС) для мониторинга состояния и управления работой его аппаратуры;

- между компьютером АРМ оператора и бортовым компьютером БПЛА для мониторин-

га состояния и управления работой бортовой аппаратурой БПЛА.

Алгоритмы работы сети связи с БПЛА. Рассмотрим алгоритмы установления связи между ретранслятором и БПЛА, а также алгоритм эстафетной передачи от одного ретранслятора к другому.

Алгоритм установления связи с БПЛА по инициативе БПЛА, блок-схема которого приведена на рис. 4, заключается в следующем.

Шаг 1. БПЛА, находясь в полете, постоянно принимает пилот-сигналы и сигналы вызова.

Шаг 2. БПЛА оценивает отношение мощности сигнала к мощности помехи на входе приемного тракта, которое должно превышать заданное пороговое значение. Затем выбранному ретранслятору посылается запрос на регистрацию. Далее выполняется процедура аутентификации и регистрации БПЛА в НАЛС.

Шаг 3. Следующий этап установления связи осуществляется при необходимости передачи высокоскоростной информации. В НАЛС БПЛА делает запрос на предоставление канального ресурса в ВАЛС. Затем БПЛА и ретрансля-

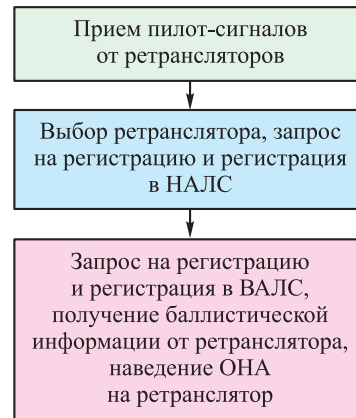


Рис. 4. Блок-схема алгоритма установления связи с БПЛА по инициативе БПЛА

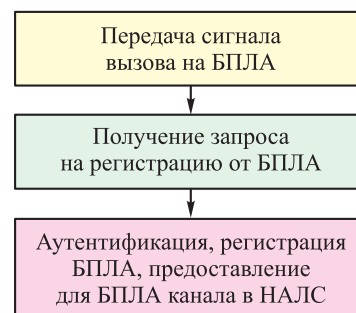


Рис. 5. Блок-схема алгоритма установления связи с БПЛА по инициативе ретранслятора

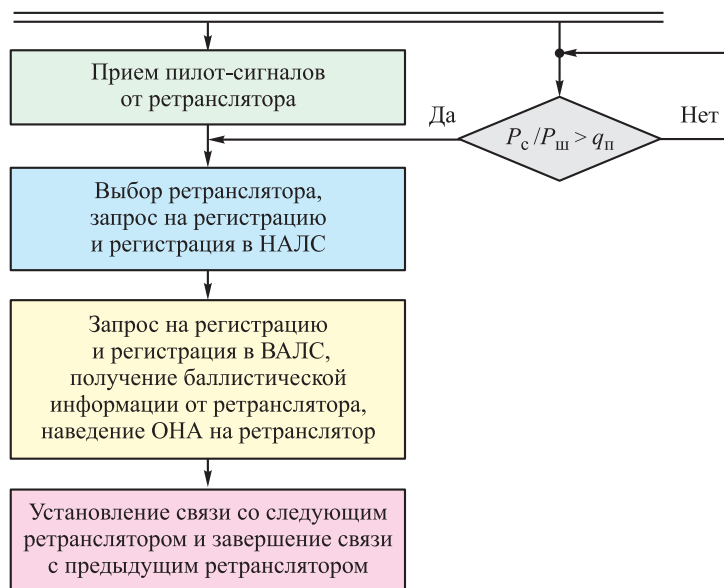


Рис. 6. Блок-схема алгоритма эстафетной передачи БПЛА между ретрансляторами

тор обмениваются баллистической информацией и наводят друг на друга ОНА с целью передачи информации в ВАЛС.

Алгоритм установления связи с БПЛА по инициативе ретранслятора, блок-схема которого приведена на рис. 5, состоит в следующем.

Шаг 1. Ретранслятор в канале вызова передает сигналы вызова, а БПЛА, находясь в полете, постоянно принимает пилот-сигналы и сигналы вызова от ретрансляторов. После приема сигналов вызова БПЛА по установленному идентификатору (ID) определяет, что сигнал вызова предназначен ему. Затем последовательно осуществляются процедуры выбора ретранслятора. Далее выбранному ретранслятору посылается запрос на регистрацию.

Шаг 2. Ретранслятор получает запрос на регистрацию.

Шаг 3. Выполняется процедура аутентификации и регистрации БПЛА в НАЛС.

Шаг 4. Следующий этап установления связи проводится при необходимости передачи высокоскоростной информации (на рис. 5 не показан). Ретранслятор в НАЛС получает от БПЛА запрос на предоставление канального ресурса в ВАЛС. Затем БПЛА и ретранслятор обмениваются баллистической информацией и наводят друг на друга ОНА с целью выполнения передачи информации в ВАЛС.

Алгоритм эстафетной передачи БПЛА между ретрансляторами, блок-схема которого приведена на рис. 6, заключается в следующем.

Шаг 1. БПЛА, установив связь с одним из ретрансляторов, продолжает принимать пилот-сигналы от других ретрансляторов.

Шаг 2. Если отношение мощности сигнала P_c к мощности помехи $P_{ш}$ на входе приемного тракта начинает резко или постоянно уменьшаться, то БПЛА осуществляет процедуры выбора ретранслятора и отправку запроса на регистрацию до того момента, пока это отношение уменьшится ниже заданного порогового значения $q_п$. Затем последовательно выполняются процедуры аутентификации и регистрации БПЛА в НАЛС.

Шаг 3. Следующий этап установления связи проводится при необходимости передачи высокоскоростной информации. В НАЛС БПЛА делает запрос на предоставление канального ресурса в ВАЛС. Затем БПЛА и выбранный ретранслятор обмениваются баллистической информацией и после этого БПЛА перенацеливает ОНА на вновь выбранный ретранслятор.

Выводы

1. Приведены архитектурные, организационные и конструктивные решения, позволяющие создать надежную, живучую, динамичную, эффективную ССУ БПЛА различного назначения, обеспечивающую постоянную доступность к любому БПЛА в режиме реального времени.

2. Высокая надежность и живучесть достигается благодаря многовариантности установления и поддержания связи, а высокая произво-

дительность — автоматизацией процессов вхождения в связь и обеспечения ее бесперебойности.

3. Предложенные направления создания высоконадежной ССУ могут быть применены при

разработке системы связи и управления любыми автономными (беспилотными) роботизированными самоходными аппаратами наземного и водного базирования.

Литература

- [1] Васильев В.В., Потюпкин А.Ю. *Особенности оценивания состояния сложных систем*. Москва, ВА РВСН, 2005. 255 с.
- [2] Васильев В.В., Жданов С.Г., Потюпкин А.Ю. *Особенности управления бортовыми системами летательных аппаратов*. Москва, ВА РВСН, 1998. 72 с.
- [3] Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2016, т. 4, № 4, с. 13–23.
- [4] Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. Летающие сенсорные сети — новое приложение Интернета вещей. *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.*, Санкт-Петербург, 3–4 марта 2015, Санкт-Петербург, СПбГУТ, 2015, т. 1, с. 17–22.
- [5] Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В., Парамонов А.И., Прокопьев А.В., Богданов И.А., Дорт-Гольц А.А. Летающие сенсорные сети. *Электросвязь*, 2014, № 9, с. 2–5.
- [6] Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей. *Электросвязь*, 2015, № 7, с. 9–11.
- [7] Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Пирмагомедов Р.Я. Перспективы научных исследований в области сетей связи 2017–2020 годы. *Информационные технологии и телекоммуникации*, 2016, т. 4, № 3, с. 1–14.
- [8] Kirichek R., Kulik V. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using LPWAN Protocols. *Communications in Computer and Information Science*, 2016, vol. 678, pp. 442–453, doi: 10.1007/978-3-319-51917-3_39
- [9] Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A. Flying Ubiquitous Sensor Networks as a Queuing System. *17th International Conference on Advanced Communication Technology*, 2015, pp. 127–132, doi: 10.1109/ICACT.2015.7224771
- [10] Kirichek R., Paramonov A., Vareldzhyan K. Optimization of the UAV-P's Motion Trajectory in Public Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN-P). *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9247, pp. 352–366, doi: 10.1007/978-3-319-23126-6_32
- [11] Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18(2), pp. 1123–1152, doi: 10.1109/COMST.2015.2495297
- [12] Пантелеймонов И.Н., Пантелеймонова А.В. *Способ зональной регистрации абонентского терминала сети персональной спутниковой связи*. Патент РФ № 2658879, бюл. № 18, 2018.
- [13] Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О. *Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов*. URL: <https://math.spbu.ru/user/gran/soi5/Amelin5.pdf> (дата обращения 15 сентября 2019).
- [14] Амелин К.С., Граничин О.Н. Мультиагентное сетевое управление группой легких БПЛА. *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*, 2011, № 6. URL: http://www.radiotec.ru/journal_section/7 (дата обращения 15 сентября 2019).
- [15] Будаев Д.С., Вощук Г.Ю., Гусев Н.А., Мочалкин А.Н. Мультиагентная система согласованного управления группой беспилотных летательных аппаратов. *Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XVIII Междунар. конф.*, Самара, 20–25 сентября 2016, Самара, ОФОРТ, 2016, с. 180–190.

References

- [1] Vasil'yev V.V., Potyupkin A.Yu. *Osobennosti otsenivaniya sostoyaniya slozhnykh system* [Features of assessing the status of complex systems]. Moscow, VA RVSN publ., 2005. 255 p.
- [2] Vasil'yev V.V., Zhdanov S.G., Potyupkin A.Yu. *Osobennosti upravleniya bortovymi sistemami letatel'nykh apparatov* [Features of control of aircraft onboard systems]. Moscow, VA RVSN publ., 1998. 72 p.
- [3] Bondarev A.N., Kirichek R.V. Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries. *Telecom it*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 13–23 (in Russ.).
- [4] Kucheryavyy A.E., Vladyko A.G., Kirichek R.V. Flying Touch Networks — New Internet of Things App. *Aktual'nyye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii. IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. i nauch.-metod. konf.* [Actual problems of information and telecommunications in science and education. IV International Scientific-Technical and Scientific-Methodological Conference]. St. Petersburg, 2015, vol. 1, pp. 17–22.
- [5] Kucheryavyy A.E., Vladyko A.G., Kirichek R.V., Paramonov A.I., Prokop'yev A.V., Bogdanov I.A., Dort-Gol'ts A.A. Flying sensor networks. *Elektrosvyaz*, 2014, no. 9, pp. 2–5 (in Russ.).
- [6] Kucheryavyy A.E., Vladyko A.G., Kirichek R.V. Theoretical and practical research trends in the field of flying ubiquitous sensor networks. *Elektrosvyaz*, 2015, no. 7, pp. 9–11 (in Russ.).
- [7] Kucheryavyy A.E., Vladyko A.G., Kirichek R.V., Makolkina M.A., Paramonov A.I., Vybornova A.I., Pirmagomedov R.Ya. Perspektivy nauchnykh issledovaniy v oblasti setey svyazi 2017–2020 gody. *Telecom it*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 1–14 (in Russ.).
- [8] Kirichek R., Kulik V. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using LPWAN Protocols. *Communications in Computer and Information Science*, 2016, vol. 678, pp. 442–453, doi: 10.1007/978-3-319-51917-3_39
- [9] Kirichek R., Paramonov A., Koucheryavy A. Flying Ubiquitous Sensor Networks as a Queuing System. *17th International Conference on Advanced Communication Technology*, 2015, pp. 127–132, doi: 10.1109/ICACT.2015.7224771
- [10] Kirichek R., Paramonov A., Vareldzhyan K. Optimization of the UAV-P's Motion Trajectory in Public Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN-P). *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9247, pp. 352–366, doi: 10.1007/978-3-319-23126-6_32
- [11] Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18(2), pp. 1123–1152, doi: 10.1109/COMST.2015.2495297
- [12] Panteleymonov I.N., Panteleymonova A.V. *Sposob zonal'noy registratsii abonentskogo terminala seti personal'noy sputnikovoy svyazi* [The method of zonal registration of the subscriber terminal of a personal satellite communication network]. Patent no. 2658879 RF, 2018.
- [13] Amelin K.S., Antal E.I., Vasil'yev V.I., Granichina N.O. *Adaptivnoye upravleniye avtonomnoy gruppyo bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Adaptive control of an autonomous group of unmanned aerial vehicles]. Available at: <https://math.spbu.ru/user/gran/soi5/Amelin5.pdf> (accessed 15 September 2019).
- [14] Amelin K.S., Granichin O.N. Multi-agent network control of the group of unmanned aerial vehicle. *Journal Neurocomputers*, 2011, no. 6. Available at: http://www.radiotec.ru/journal_section/7 (accessed 15 September 2019).
- [15] Budaev D.S., Voshchuk G.Yu., Gusev N.A., Mochalkin A.N. Multi-agent system for coordinated control of a group of unmanned aerial vehicles. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh. Tr. XVIII Mezhdunar. konf.* [Problems of management and modeling in complex systems. XVIII international conference]. Samara, 2016, pp. 180–190.

Статья поступила в редакцию 09.01.2020

Информация об авторах

ПАНТЕЛЕЙМОНОВ Игорь Николаевич — главный специалист центра спутниковых систем связи. АО «Российские космические системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная д. 53, e-mail: panteleymonov_in@spacecorp.ru).

БЕЛОЗЕРЦЕВ Александр Васильевич — инженер первой категории отдела командно-измерительных систем пилотируемых, автоматических КА и специальных комплексов. АО «Российские Космические Системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная д. 53, e-mail: belozertsev_av@spacecorp.ru).

МОНАСТЫРЕНКО Андрей Александрович — заместитель начальника отдела создания перспективных ЦУП и НКУ КА гражданского назначения. АО «Российские Космические Системы» (111024, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная д. 53, e-mail: monastyrenko_aa@spacecorp.ru).

БОЦВА Виктор Викторович — ведущий инженер отдела 1112 центра исследований космической деятельности. АО «ЦНИИМаш» (141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, ул. Пионерская д. 4, e-mail: bakirovamsh@tsniimash.ru).

НАУМКИН Александр Вячеславович — ведущий специалист. Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение города Москвы «Колледж связи № 54» имени П.М. Вострухина (109544, Российская Федерация, Москва, Российская Федерация, ул. Рабочая, д. 12, e-mail: alexander.naumkin@ks54.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пантелеймонов И.Н., Белозерцев А.В., Монастыренко А.А., Ботсва В.В., Наумкин А.В. Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 6, с. 78–88, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-78-88

Please cite this article in English as:

Panteleimonov I.N., Belozertsev A.V., Monastyrenko A.A., Botsva V.V., Naumkin A.V. The Main Trends in Developing Highly Reliable Communication and Control Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 6, pp. 78–88, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-78-88

Information about the authors

PANTELEIMONOV Igor Nikolaevich — Chief Specialist, Center of Satellite Communication Systems. AO Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: panteleymonov@yandex.ru).

BELOZERTSEV Alexander Vasilievich — Engineer of the 1st Category, Department of Control and Measurement Systems of Manned, Automatic Spacecraft and Special Complex Facilities. AO Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: belozertsev_av@spacecorp.ru).

MONASTYRENKO Andrey Alexandrovich — Deputy Head, Department for Development of Advanced Flight Control Centers and Ground Control Systems of Non-Military Spacecraft. AO Russian Space Systems (111024, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 53, e-mail: monastyrenko_aa@spacecorp.ru).

BOTSVVA Victor Viktorovich — Lead Engineer, Department 1112. System Engineering Center for Space Activities AO TSNIIMASH (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4, e-mail: bakirovamsh@tsniimash.ru).

NAUMKIN Aleksandr Vyacheslavovich — Lead Specialist. State Budgetary Vocational Educational Institution of the City of Moscow — Communications College No. 54 named after P.M. Vosttrukhin (109544, Moscow, Russian Federation, Rabochaya St., Bldg. 12, e-mail: alexander.naumkin@ks54.ru).