

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.391.27

Е.Л. Белоусов, В.Ф. Брянцев, К.Л. Войткевич, А.В. Кейстович, Х.И. Сайфетдинов

ПЕРСПЕКТИВНОЕ БОРТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СЕТИ АВИАЦИОННОЙ РАДИОСВЯЗИ

ОАО «Научно-производственное предприятие «Полет»

Рассмотрены вопросы построения бортового оборудования авиационной радиосвязи по технологии SDR - «программируемое радио». Приведены структурные схемы бортового и наземного комплексов, используемых для обмена данными между наземными службами и воздушными судами гражданской авиации.

Ключевые слова: радиостанция, авиационная радиосвязь, программируемое радио, технология SDR, комплексы связи.

Средства сетевого взаимодействия в системе авиационной электросвязи могут быть представлены на основе многоуровневого подхода [1, 2]. При этом все множество модулей разбивается на уровни, образующие иерархию. Преимуществом многоуровневого подхода является возможность модификации отдельных модулей без изменения остальной части системы. Модули нижнего уровня могут, например, обеспечивать надежную передачу сигналов между двумя соседними узлами. Модули более высокого уровня организуют транспортировку сообщений в пределах всей сети, используя средства нижележащих уровней. На верхнем уровне функционируют модули, обеспечивающие пользователям доступ к различным службам.

В процессе обмена сообщениями между двумя участниками необходимо организовать согласованную работу соответствующих уровней иерархии и принять различные соглашения. Например, оба участника должны согласовать уровни и форму электрических сигналов, установить методы контроля достоверности и т. д. Соглашения должны быть приняты для всех уровней: от самого низкого - уровня передачи единичных элементов – до самого высокого, реализующего сервис для пользователей сети. Процедуру взаимодействия этих двух узлов можно описать в виде набора правил взаимодействия соответствующих уровней обеих участвующих сторон. Формализованные правила, определяющие последовательность и формат сообщений, которыми обмениваются сетевые компоненты одноименных уровней разных узлов (систем), называются *протоколами* [3]. Иерархически организованный набор протоколов, достаточный для организации взаимодействия узлов в сети, называется *стеком коммуникационных протоколов*. Коммуникационные протоколы могут быть реализованы аппаратно и программно. Протоколы нижних уровней реализуются комбинацией программных и аппаратных средств, а протоколы верхних уровней, как правило, чисто программными средствами.

В начале 80-х годов прошлого столетия ряд международных организаций по стандартизации ISO, ITU-T и другие разработали модель взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection, OSI). Эта модель определяет различные уровни взаимодействия систем, присваивает им стандартные имена и определяет функции каждого уровня. В рамках данной модели под открытостью понимается готовность сетевых устройств взаимодейство-

вать между собой с использованием стандартных правил. Примером открытой системы является международная сеть Internet. Архитектура, протоколы обмена и форматы сообщений должны быть основаны на концепции Международной организации по стандартизации (ISO), известной как эталонная модель взаимодействия открытых систем (OSI), принятой для обеспечения услуг по телекоммуникации и обработке данных. Модель OSI была разработана непосредственно для организации передачи данных между конечными системами, которым ничего не известно о характеристиках системы передачи или о характеристиках каналов, связывающих их.

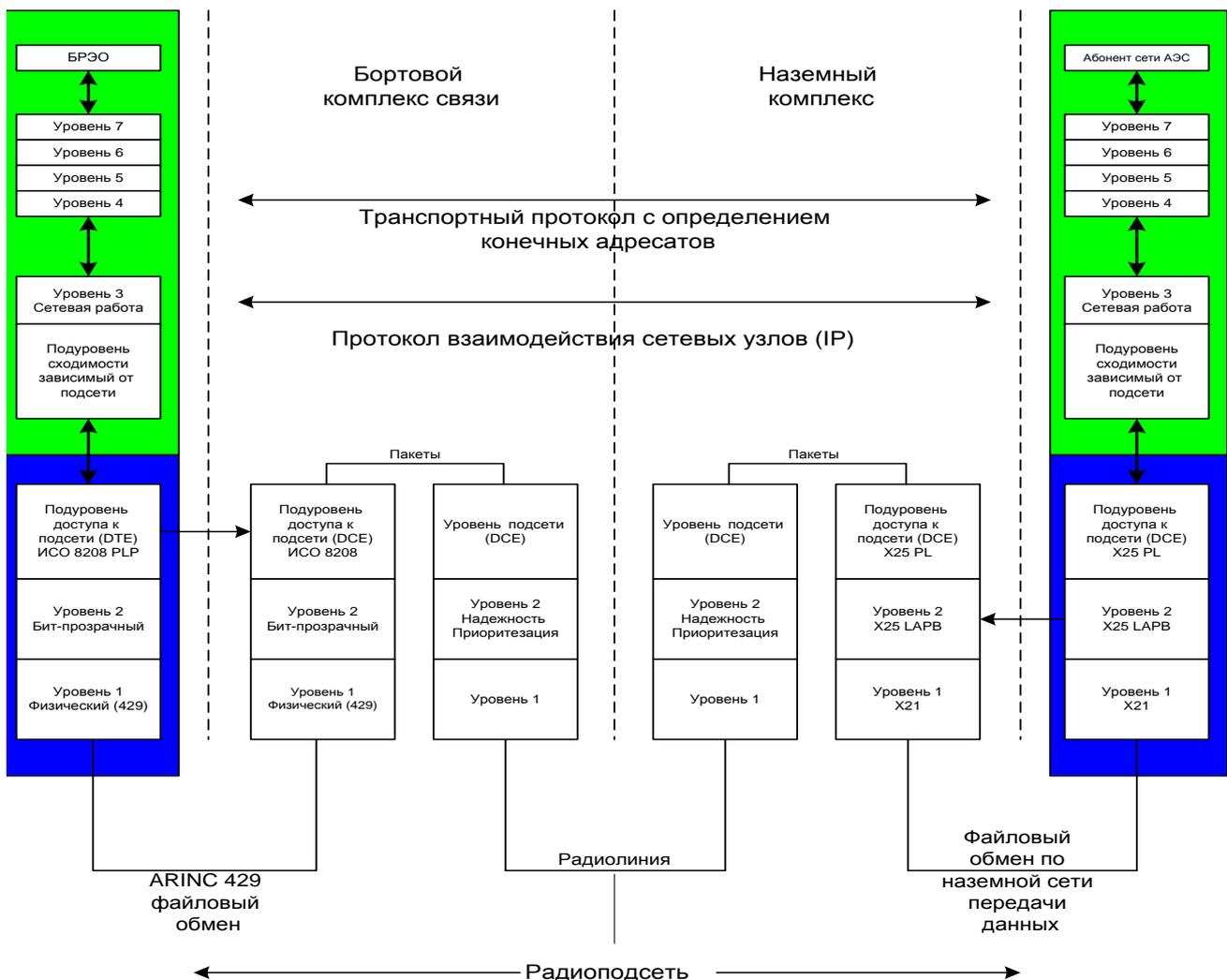


Рис. 1. Модель одной ветви радиосети передачи данных в системе ОрВД

Модель OSI использует метод разделения на уровни, который позволяет обеспечить логическую сбалансированность между структурой системы и протоколами. В модели OSI используются семь уровней, обеспечивающих выполнение функций, необходимых для перехода от прикладного процесса пользователя к передающей среде, например, к МВ-радиосреде. В результате проведенных исследований появляется семиуровневая архитектура эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Уровни модели OSI: 1 - физический уровень; 2 - канальный; 3 - сетевой; 4 - транспортный; 5 - сеансовый; 6 - представительный; 7 – прикладной. Рассмотрим назначение указанных уровней на примере системы радиосвязи с воздушными судами (ВС). Модель одной ветви радиосети передачи данных между объектами системы управления воздушным движением приведена на рис. 1.

Структурная схема системы радиосвязи с воздушными судами, в которой программируемая радиостанция, реализованная в соответствии с требованиями эталонной модели взаимодействия открытых систем, входит в состав бортового комплекса связи, представлена на рис. 2 введены обозначения [4, 5].

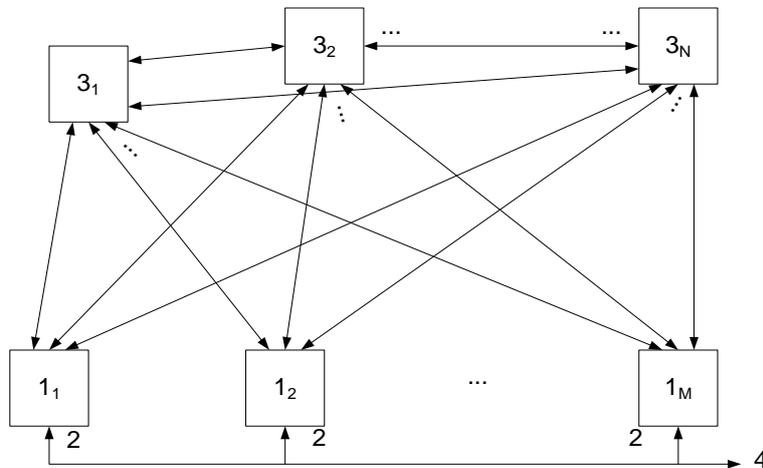


Рис. 2. Структурная схема системы радиосвязи с воздушными судами:

1 - наземный комплекс связи (НК); 2 - вход/выход НК для наземной сети передачи данных; 3 - воздушное судно, оснащенное новым бортовым комплексом связи; 4 - вход/выход наземной сети передачи данных (условно показана в виде линии)

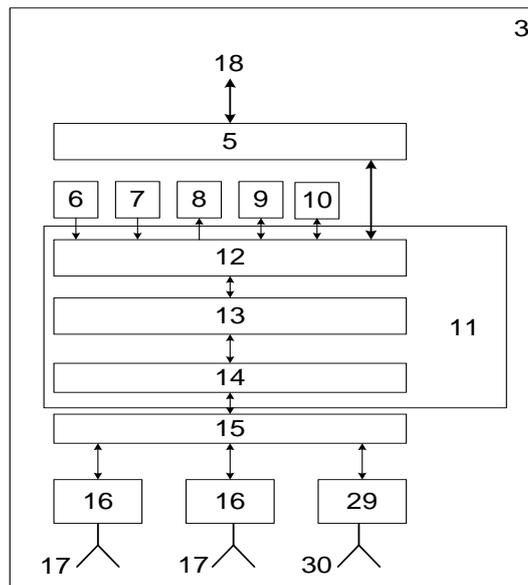


Рис. 3. Структурная схема бортового комплекса связи системы радиосвязи с ВС:

5 – бортовой вычислитель; 6 – бортовые датчики; 7 – бортовой приемник сигналов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS с антенной; 8 – блок регистрации данных; 9 – бортовой анализатор типа принимаемых сообщений; 10 – бортовой формирователь типа ретранслируемых сообщений; 11 – вычислительный модуль связи (ВМС); 12 – модуль интерфейсов с бортовым оборудованием (МИ); 13 – модуль маршрутизации (ММ); 14 – модуль канального уровня (МКУ); 15 – модуль физического уровня (МФУ) (цифровой обработки сигналов); 16 – бортовой широкодиапазонный радиочастотный модуль МВ-ДМВ диапазона (ШДМ РМ); 17 – бортовое широкодиапазонное антенно-фидерное устройство МВ-ДМВ диапазона (ШДМ АФУ); 18 – двунаправленная шина системы управления ВС; 29 – бортовой широкодиапазонный радиочастотный модуль ДМКВ диапазона (ШДК РМ); 30 – бортовое широкодиапазонное антенно-фидерное устройство ДМКВ диапазона (ШДК АФУ)

Структурная схема бортового оборудования воздушного судна, соответствующая эталонной модели взаимодействия открытых систем (OSI), принятой для обеспечения услуг по телекоммуникации и обработке данных, приведена на рис. 3.

Устройства 16 и 17 образуют модуль ближней связи, а устройства 29 и 30 - модуль дальней связи. Цифровая обработка сигналов обеспечивается с помощью аппаратно-программных модулей и узлов 9-15.

Структурная схема наземного комплекса связи системы радиосвязи с ВС представлена на рис. 4.

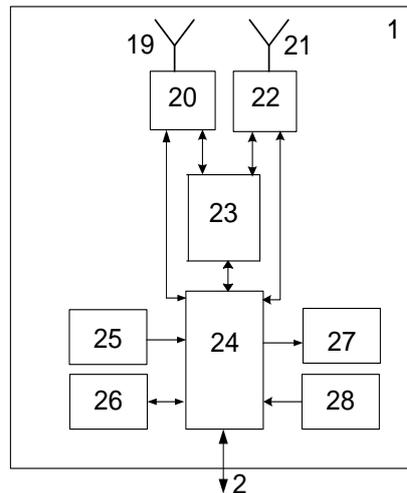


Рис. 4. Структурная схема наземного комплекса связи системы радиосвязи с ВС:

2 - вход/выход НК для наземной сети передачи данных; 19 – наземная антенна МВ диапазона; 20 – наземная радиостанция МВ диапазона; 21 – наземная антенна ДКМВ диапазона; 22 – наземная радиостанция ДКМВ диапазона; 23 – наземная аппаратура передачи данных; 24 – вычислитель автоматизированного рабочего места (АРМ); 25 – наземный приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем с антенной; 26 – формирователь типа ретранслируемых сообщений; 27 – монитор АРМ; 28 – пульт управления АРМ

При передаче пакета сообщения в диапазоне ВЧ от конечных бортовых систем ВС к наземным потребителям пакетное сообщение, содержащее адрес получателя и адрес отправителя (адрес борта), формируют в бортовых конечных системах ВС (узлы 5, 18) и передают через модуль интерфейса в бортовой модуль маршрутизатора, где его упаковывают в виде пакета ISO 8208 и затем передают в модуль канального уровня, где его преобразуют в пакет канального уровня сети передачи данных, содержащий проверочные последовательности, вычисленные с помощью избыточного циклического кода (CRC).

Полученные сообщения передаются в модуль физического уровня, где осуществляют операции:

- сверточное кодирование данных для прямой коррекции ошибок;
- перемежение данных для борьбы с пакетированием ошибок из-за замираний и импульсных помех;
- преобразование последовательности из трёх, двух или одного бита в значения фазы сигнала поднесущей или ее частоты;
- скремблирование данных для выравнивания спектра передаваемого сигнала;
- формирование ключевой синхронизирующей последовательности и преамбулы, содержащей известную последовательность для обучения адаптивного демодулятора, и информацию о скорости передачи данных и глубине перемежителя;
- формирование коротких обучающих последовательностей, которые вставляют в поток передаваемых данных пользователя для реализации адаптивных методов приёма сообщения;

- формирование заданной формы огибающей каждого символа для обеспечения заданной спектральной маски излучаемого сигнала;
- формирование радиосигнала с верхней боковой полосой с подавленной несущей с соответствующим классом излучения.

Сформированный для передачи сигнал с выхода модуля физического уровня подают на вход широкодиапазонного радиочастотного модуля, где его усиливают до требуемого уровня мощности, подают на ШДК АФУ и по радиоканалу передают на наземный комплекс, на котором зарегистрировано воздушное судно. На НК радиосигнал с антенны подают на наземную радиостанцию, работающую в симплексном режиме, а с ее выхода - на вход аппаратуры передачи данных, где его демодулируют, дескремблируют, деперемежают, декодируют с прямой коррекцией ошибок, проверяют на наличие не исправленных декодером ошибок. В случае отсутствия ошибок сообщение упаковывают в пакет ISO 8208 и выдают на вход вычислителя АРМ, где формируется сообщение, предназначенное для передачи по протоколу X.25 по наземной сети передачи данных потребителям информации. При передаче данных от потребителя информации по протоколу X.25 по наземной сети передачи данных в обратном направлении через НК к ВС в начале сообщение обрабатывают в вычислителе АРМ наземного комплекса, где из него формируют пакет ISO 8208, необходимый для передачи по линии передачи данных «воздух-земля». С выхода вычислителя АРМ сообщение передается в аппаратуру передачи данных, где оно проходит обработку в соответствии с процедурами, рассмотренными выше в бортовом комплексе связи.

На ВС радиосигнал через соответствующее антенно-фидерное устройство поступает на ШДК РМ. Затем сообщение подают на вход МФУ, где его демодулируют, дескремблируют, деперемежают, декодируют и выдают в МКУ, в котором его проверяют на наличие не исправленных декодером ошибок, и в случае отсутствия ошибок упаковывают в пакет ISO 8208 и выдают на вход ММ для преобразования в пакет, предназначенный для передачи через МИ к бортовым пользователям (блокам 5, 8, 9 или 18).

Каждое из воздушных судов может выходить на связь на нескольких рабочих частотах, известных всем участникам движения. Транспортным системам, связанным с перевозкой пассажиров и стратегических грузов, международным регламентом связи отводится определённый набор рабочих частот, которые распределяются между НК. Списки выделенных частот меняются в зависимости от времени года, а рабочая частота для каждого НК из списка выделенных частот активизируется на каждый час или два часа времени суток. При движении ВС выходит на связь, выбирая для связи тот НК, условия распространения радиоволн для связи с которым в данный момент времени являются оптимальными. Составленный таким образом канал связи между ВС и наземным потребителем (источником) информации, как правило, будет включать бортовую и наземную сети передачи данных, связанные между собой радиолинией диапазона ВЧ. Как только качество канала связи деградирует ниже допустимого уровня, на борту с помощью модулей 14 и 15 ВС выбирают новую оптимальную рабочую частоту на основании анализа условий распространения радиоволн и новый НК, соответствующий ей. Таким образом, обеспечивают высокую (порядка 0,999) надежность связи при обмене данными с ВС, находящимися от НК на расстояниях от нескольких сотен до 4-6 тыс. км и более.

Система радиосвязи с ВС работает в автоматическом режиме без вмешательства оператора на выбранных частотах из списка частот, назначенного при планировании связи. Высший уровень конфигурируемости, реализуемый в оборудовании воздушного судна - это полностью гибкие виды модуляции, протоколы уровня линии, сети и пользовательские функции, возможность изменения ширины полосы сигнала и центральной частоты по программе в широких пределах [4, 5]. Благодаря такой системе, появляется возможность создания (с помощью бортового вычислителя и соответствующих модулей 15, 14 с широкодиапазонным радиочастотным модулем) широкодиапазонной программируемой радиостанции нового типа, работающей совместно с широкодиапазонным АФУ в диапазонах ВЧ и ОВЧ.

Модуль физического уровня ВС содержит высокоскоростные с большим динамическим диапазоном аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП) и базируется на высокопроизводительных сигнальных процессорах, которые в цифровом виде реализуют большинство функций физического уровня, например, операции частотного преобразования, фильтрации, синтеза частот. Он предназначен для формирования и обработки радиосигналов на физическом уровне (кодирования/декодирования, перемежения/деперемежения, скремблирования/дескремблирования данных, модуляции/демодуляции, реализации адаптивных методов передачи и приема сигналов, полосовой фильтрации, преобразования частоты и т.п.). Модуль канального уровня обеспечивает протоколы выбора частот связи, составления линии связи, обмена данными уровня линии и доступа к подсети «воздух-земля», обмена с модулем маршрутизации ВС, обеспечения отказоустойчивого режима работы и другие процедуры. Модуль маршрутизации осуществляет распределение сообщений «воздух-земля», принятых по МВ и ДКМВ каналам в виде пакетов ISO 8208 конечным потребителям на борту и в обратном направлении. Модуль интерфейсов обеспечивает все необходимые интерфейсы с бортовым оборудованием, например, по протоколам ARINC 429, ARINC 664, ARINC 646 и др.

ШДМ АФУ, ШДК АФУ и модули 16, 15, 14 интегрируют функции радиостанций диапазонов ОБЧ и ВЧ, аппаратуры передачи данных (кодека, модема) с программной реализацией режимов работы аппаратуры (видов модуляции, кодирования) с возможностью введения новых режимов работы модулей программным способом через шину 18, бортовой вычислитель и соответствующие последовательно соединенные модули 12 и 13, входящие в вычислительный модуль 11 связи. Широкодиапазонные радиочастотные модули содержат радиочастотное аналоговое оборудование. Вычислительный модуль связи, входящий в состав ВС, обеспечивает функциональное взаимодействие с бортовыми устройствами 5, 7, 8, 9, 10 и 15 и датчиками событий.

Модуль канального уровня предназначен для управления выбором частотных каналов, установлением линий связи и регистрацией на НК, для упаковки, распаковки сообщений, управления доступом к каналу, дополнительного кодирования/декодирования избыточным циклическим кодом CRC для обнаружения ошибок, не исправленных на физическом уровне, автоматического запроса повторения, криптозащиты на канальном уровне, управления изоляцией неисправностей и восстановлением работоспособности за счет реконфигурации бортовой системы и т.п.

Модуль маршрутизатора взаимодействует с модулем канального уровня на уровне доступа к подсети по протоколу ISO 8208 (в среде ATN) в соответствии с заданными режимами передачи данных.

Модуль интерфейсов обеспечивает взаимодействие вычислительного модуля связи с бортовой авионикой (устройствами 5, 6, 7, 8, 9, 10) по разным протоколам и стыкам, например, с помощью дискретного сигнала в соответствии с ARINC 429, ARINC 664, ARINC 646 или с помощью разовых команд и через бортовой вычислитель, двунаправленную шину 18 с системой управления ВС.

Модуль физического уровня обеспечивает параллельную обработку в реальном масштабе времени сигналов всех b широкодиапазонных радиочастотных модулей, необходимых совместно с модулями 17 для организации линий передачи данных в диапазонах ОБЧ и ВЧ. Причем при неисправности одного из модулей 16, соединенного с бортовым широкодиапазонным антенно-фидерным устройством, программно подключается взамен вышедшего из строя модуля другой исправный модуль 16 с помощью модуля канального уровня, выполненного, например, на универсальном вычислителе. В этом случае все функции обработки и формирования сигнала соответствующего радиоканала связи, обработки данных и закрытия информации (при необходимости) будут выполнены программным способом в виде законченных программных модулей. Взаимодействие программных модулей будет осуществляться по заранее определенным правилам взаимодействия (протоколам и процедурам взаимо-

действия, входным и выходным данным), что обеспечит их оперативное изменение (заменой программного кода) в процессе полета. Это дает возможность формирования и обработки любого сигнала и данных, закрытия информации, интерфейс с внешним оборудованием по различным алгоритмам и стандартам, даже в том случае, когда ВС находится на границах двух зон ответственности автоматизированных систем управления воздушным движением, в которых для обмена данными между НК и ВС используются различные режимы линии передачи данных, например, VDL-2 и VDL-4. Таким образом, на уровне каналов связи (физический, канальный уровни, включая криптозащиту канала доступа к сети) модуль 16, соединенный с бортовым ШДМ АФУ или ШДК АФУ, совместно с модулем физического уровня и модулем канального уровня обеспечивают совместимость с различными типами линий передачи данных «воздух-земля». Кроме этого, модуль 15 осуществляет установку частоты передачи, ширину полосы, и т.д.

Таким образом, перспективное бортовое оборудование ВС выполняет функции каналообразования (комплекта радиостанций), аппаратуры передачи данных (кодека, модема, контроллера протоколов канального уровня) с программной реализацией режимов работы аппаратуры (видов модуляции, кодирования, протоколов обмена) с возможностью введения новых режимов работы программным способом через внешний интерфейс (шину 18). Бортовое оборудование ВС представляет собой конструктивное и функциональное техническое решение с максимальным использованием цифровой обработки сигналов в отдельных устройствах, выполняющих функции фильтрации, частотного преобразования, усиления, формирования и обработки сигналов (кодирования, декодирования, модуляции, демодуляции, выбора частоты и т.д.), управления протоколами обмена данными «воздух-земля», менеджмента связью (маршрутизации сообщений), обмена с авионикой борта, слежения за технической исправностью не только для обнаружения отказов, но и для изоляции отказов и реконфигурации аппаратуры для обеспечения высокой аппаратурной надежности. Эта способность позволяет обеспечить близкую к единице вероятность работы оборудования без отказов во время полета, даже при наличии неисправностей некоторых модулей, без внеурочного обслуживания (только регламентное обслуживание по расписанию), упростить замену и ремонт отказавших модулей. Резервирование ресурсов обеспечивается как на уровне электронных компонентов, так и на уровне модулей.

Система радиосвязи, в которой бортовая аппаратура создана по принципу «программируемое радио», имеет следующие преимущества:

- повышается аппаратурная надежность бортового оборудования за счет автоматического резервирования и реконфигурации, что особенно важно во время полета;
- упрощается эксплуатация бортового комплекса связи ВС - остается только регламентное обслуживание по событию с заменой и ремонтом отказавших модулей;
- повышается надежность связи между НК и ВС, находящимся на границах двух зон ответственности автоматизированных систем управления воздушным движением, в которых для обмена данными между НК и ВС используются различные режимы линии передачи данных, и разные приложения CNS/ATM. Это обеспечивается за счет автоматического выполнения процедур поддержки связи, идентификации наземной станции, начальной установки линии, модификации параметров линии, процедур «хэндофф», автонастройки и программного выбора требуемого режима работы бортового комплекса. Например, в одной зоне приложение CPDLC реализуется наземным комплексом в режиме передачи данных ACARS сигналами AM-MSK со скоростью 2400 бит/с, в другой зоне это же приложение реализуется в режиме передачи данных VDL-2 сигналами D8PSK со скоростью 31500 бит/с, а в третьей зоне - в режиме передачи данных VDL-4 сигналами GFSK со скоростью 19200 бит/с и т.п.;
- повышаются дальность, надежность, оперативность, достоверность ДКМВ связи, эффективность использования частотного спектра за счет использования адаптивных методов приема, адаптации по частоте, скорости передачи данных, видам модуляции и кодирования, протокола множественного доступа к каналу с частотным и временным разделением;

- алгоритмы обработки сигналов с датчиков и других периферийных устройств остаются прежними, что снижает вероятность ошибок при программировании вычислительного модуля связи;
- предложенной структурой могут быть решены задачи перехода от разработок бортовых комплексов связи, изменение характеристик которых определяется изменением аппаратной части, к устройствам, легко модернизируемым на базе программного обеспечения при неизменной аппаратной части. Достоинства такой структуры очевидны:
 - увеличивается срок службы - жизненный цикл оборудования в условиях непрерывного совершенствования протоколов обмена данными «воздух-земля»;
 - сокращается число и номенклатура запасного имущества и принадлежностей из-за использования однотипных узлов в бортовом оборудовании;
 - упрощается процесс эксплуатации - замена неисправного радиочастотного модуля в полёте осуществляется автоматически однотипным модулем для всех диапазонов с соответствующим введенным программным обеспечением;
 - уменьшается стоимость модернизации оборудования за счет коррекции только программного обеспечения.

Библиографический список

1. Кузьмин, Б.И. Авиационная цифровая электросвязь в условиях реализации "Концепции ИКАО-ИАТА CNS/АТМ" в Российской Федерации: монография / Б.И. Кузьмин; под ред. Е.Л. Белоусова. – СПб. – Н. Новгород: Агентство ВиТ-принт, 2007. – 496 с.
2. Кузьмин, Б.И. Сети и системы авиационной цифровой электросвязи: учеб. пособие / Б.И. Кузьмин; под ред. В.А. Сарычева. Ч. 111. Авиационная электросвязь в условиях реализации концепция ИКАО – ИАТА CNS/АТМ в Российской Федерации. – СПб.: Агентство ВиТ-принт, 2003. – 480 с.
3. Цифровые системы передачи / В.В. Крухмалев [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 350 с.
4. Авиационная радиосвязь: справочник / П.В. Олянюк [и др.]; под ред. П.В. Олянюка. – М.: Транспорт, 1990. – 208 с.
5. Пат. 68 211 U1 РФ (полезная модель), МПК² Н 04В 7/26. Система радиосвязи с подвижными объектами / А.В. Кейстович, Т.И. Горячева. №2007118071/22; заявл. 14.05.2007; опубл. 10.11.2007, Бюл. № 31. – 1 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.06.2012*

Ye.L. Belousov, V.Ph. Bryantsev, K.L. Voytkovich, A.V. Keystovich, Kh.I. Sayphetdinov

ADVANCED AIRBORNE EQUIPMENT FOR THE AVIATION RADIO COMMUNICATION NETWORK

Joint Stock Company “POLYOT Research & Production Company”

Purpose: Assessing the possibility of aviation radio communication equipment development on the basis of SDR technology.

Design/methodology/approach: The article deals with network interaction in the airborne system of aviation telecommunications on the basis of multilevel OSI approach.

Findings: Operation of multichannel radio communication equipment on the basis of SDR technology is presented in detail.

Research limitations/implications: Aviation radio communication networks.

Originality/value: Use of new technology improves communication reliability between ground complexes and aircraft, which are located at the boundary of two areas of responsibility of ATC receive-transmit centers using different data link modes.

Key words: radio, aircraft radio communication, software-defined radio, SDR technology, communication complexes.