

УДК 621.391.27

В.В. Хоптар

**ОДИН ИЗ ВАРИАНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ АВИАЦИОННОЙ АДАПТИВНОЙ
ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ**

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Полет», г. Н. Новгород

Рассмотрены процедуры организации системы авиационной адаптивной автоматической декаметровой радиосвязи на незакрепленных частотах. Приведены структурная схема, состав и алгоритм работы системы.

Ключевые слова: ДКМ радиосвязь, ионосферный мониторинг, ЛЧМ-сигналы.

Вопросы организации дальней ДКМ радиосвязи являются особенно актуальными для дальних магистральных летательных аппаратов (ЛА), движущихся со скоростями более 800 км/ч. За короткое время они проходят много временных поясов с различной геофизической и помеховой обстановками и соответственно с различными условиями ионосферного распространения ДКМ радиоволн. Это не позволяет составить точный план связи на все время полета, а использование прогнозных моделей ионосферного канала не обеспечивает необходимого качества радиосвязи, особенно в высоких широтах. Поэтому для управления частотным ресурсом и другими параметрами радиолинии в условиях нестационарности канала необходимо постоянно осуществлять в реальном времени мониторинг текущей ионосферной обстановки и контроль загруженности канала помехами. Кроме того, установление и поддержание ДКМ радиосвязи в авиационных каналах должно происходить автоматически, без участия экипажа воздушного судна. В настоящее время организация ДКМ радиосвязи в РФ имеет следующие особенности:

- отсутствуют единые стандарты по организации ДКМ радиосвязи и стандарты на характеристики модемов и сигнально-кодовых конструкций, что приводит к несовместимости каналобразующих средств, используемых разными ведомствами в едином сетевом пространстве;
- наземным опорным радиоцентрам (ОпРЦ), как правило, назначают не более четырех частот (дневная, ночная и две запасных), а протяженность зоны ответственности ОпРЦ может достигать от 100 до 3000 км. И, несмотря на то, что у ведомства имеется достаточно большой массив разрешенных частот, в одну зону попадают как ближние связи, для которых частоты выше 8-10 МГц практически бесполезны, так и дальние связи, для которых используются частоты выше 10 МГц. В результате получается ситуация, при которой на каждый сеанс связи из разрешенных частот доступны единицы, в лучшем случае десятки, из которых больше половины не подходят по условиям распространения, а из оставшихся подходящих большая часть забита помехами;
- использующийся в зоне ответственности радиально-узловой принцип организации связи требует передачи информационных сообщений от ЛА к центру управления (ЦУ), что снижает скорость и надежность передачи сообщений.

Все это, в совокупности, во флуктуирующем с переменными параметрами радиоканале «борт ЛА-наземный ОпРЦ» на фоне нестационарных помех обеспечивает надежность передачи сообщений, не превышающую (0,60-0,70).

Целью работы является рассмотрение варианта организации авиационной адаптивной автоматической ДКМ радиосвязи в радиоканалах «борт ЛА-наземный ОпРЦ» на незакрепленных частотах (без частотного планирования), обеспечивающий надежность передачи со-

общений (0,95-0,99), экономию частотного ресурса за счет применения технологии ионосферного мониторинга и одновременной адаптации по частоте и пространству [1].

Реализация варианта построения авиационной адаптивной автоматической ДКМ радиосвязи осуществляется с помощью использования технологии ионосферного мониторинга (ИМ) в наземной и воздушной компонентах. Для этого в состав наземного ОпРЦ вводится аппаратно-программный комплекс ионосферного мониторинга, состоящий из двух конструктивно и функционально независимых частей (постов ИМ) – приемного и передающего (рис. 1). Типовая структура наземного ОпРЦ предполагает разнесение за пределы прямой видимости передающего и приемного комплексов. При этом расстояние между ними может составлять от 5 до 40 км. В результате, как приемный, так и передающий посты ИМ из состава ОпРЦ имеют собственные антенно-фидерные системы и автоматизированные рабочие места (АРМ), с помощью которых осуществляется обработка радиопрогностической информации, формирование и прием/передача служебных пакетов в локальную информационную сеть, а также общее управление работой данного поста ИМ. В качестве зондирующего сигнала во всем ДКМ диапазоне (от 2 до 30 МГц) передающим постом ИМ используется ЛЧМ-сигнал со ступенчато изменяемой частотой.

Структурная схема комплекса ДКМ радиосвязи наземного ОпРЦ представлена на рис. 1, где введены следующие обозначения:

- 1 – приемник зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 2 – широкополосная антенна для приема зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 3 – передатчик зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 4 – широкополосная антенна для передачи зондирующего ЛЧМ-сигнала;
- 5 – приемник спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС;
- 6 – антенна для приема спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС;
- 7 – АРМ приемного комплекса ДКМ радиосвязи;
- 8 – АРМ передающего комплекса ДКМ радиосвязи;
- 9 – АРМ приемного поста ИМ;
- 10 – АРМ передающего поста ИМ;
- 11 – локальная сеть передачи данных Ethernet;
- 12 – штатная широкополосная антенна для приема связного ДКМ сигнала;
- 13 – штатный связной приемник ДКМ диапазона;
- 14 – формирователь пакета ретранслируемых служебных сообщений;
- 15 – контроллер;
- 16 – наземная магистральная сеть передачи данных;
- 17 – анализатор ретранслируемых служебных сообщений;
- 18 – штатный связной передатчик ДКМ диапазона;
- 19 – согласующее устройство;
- 20 – штатная всенаправленная передающая антенна ДКМ диапазона;
- 21 – блок хранения исходных данных;
- 22 – USB-вход для загрузки исходных данных.

Синхронизация работы передающих и приемных постов ИМ всех ОпРЦ достигается путем сверки и последующей корректировки шкал времени опорных генераторов приемников 1 зондирующего ЛЧМ-сигнала, оснащенных широкополосными приемными антеннами 2, и передатчиков 3 зондирующего ЛЧМ-сигнала, оснащенных широкополосными передающими антеннами 4, через приемники 5 спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС, оснащенные антеннами 6, с эталонной шкалой мирового времени (единого времени UTC). Точность синхронизации метками приемников GPS/ГЛОНАСС – (10-50) мкс, нестабильность частоты сигнала опорного генератора менее 2×10^{-8} с, что дает потенциальную разрешающую способность приемника из состава аппаратно-программного комплекса (АПК) ИМ порядка 1 Гц.

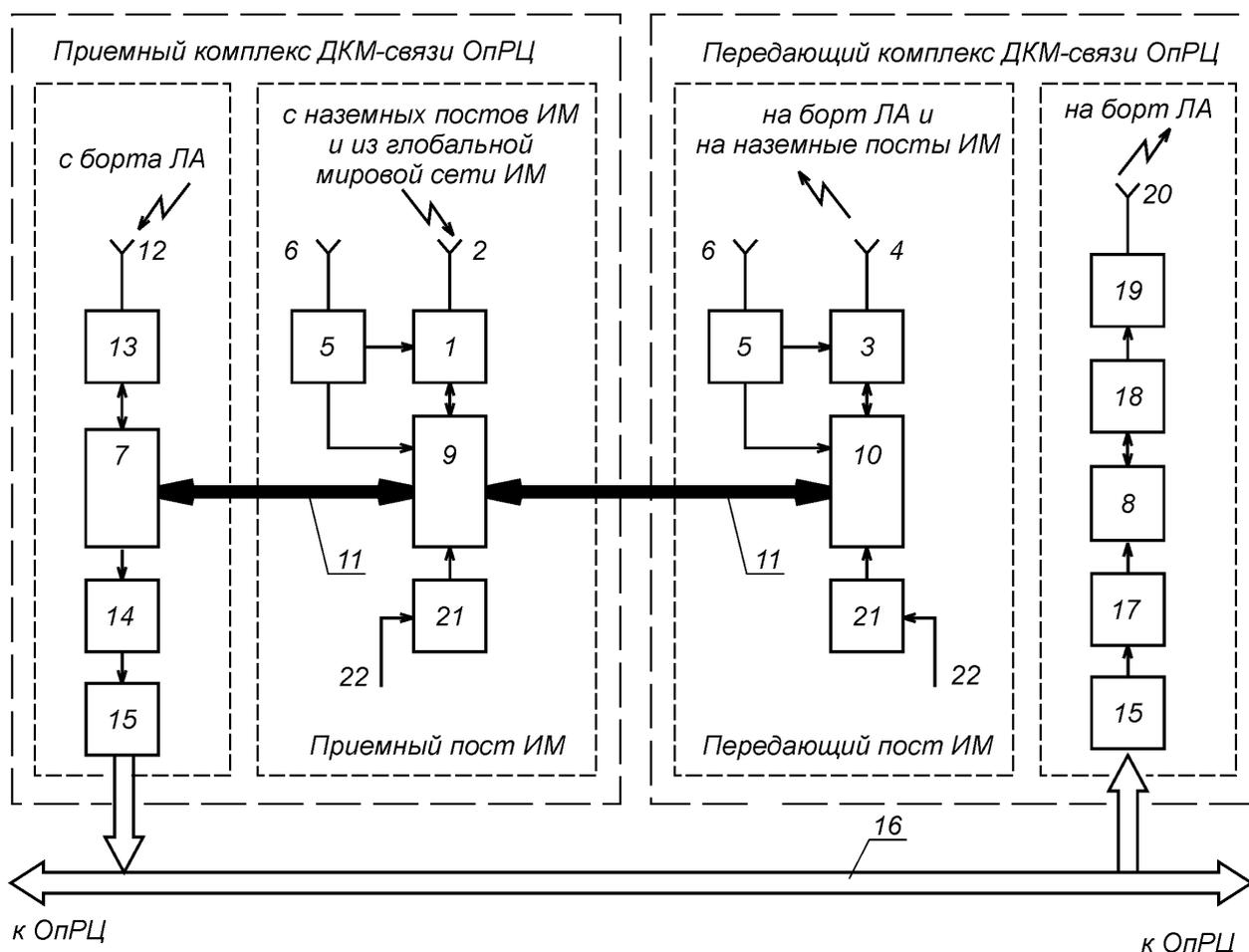


Рис. 1. Структурная схема комплекса ДКМ радиосвязи наземного ОпРЦ

При невозможности проведения первоначальной привязки шкал времени к спутниковым сигналам предусмотрены:

- режим автоматической синхронизации указанных шкал по сигналам станций единого времени, работающих в ДКМ диапазоне;
- режим вхождения в синхронизм приемников из состава приемных постов ИМ по специальному периодическому ЛЧМ-сигналу от находящихся в одной зоне ответственности передатчиков из состава передающих постов ИМ.

Общее управление и контроль функционирования комплекса ДКМ радиосвязи наземного ОпРЦ осуществляется через АРМ 7, 8 приемного и передающего комплексов ДКМ радиосвязи и АРМ 9, 10 приемного и передающего постов ИМ, объединенных локальной сетью 11 передачи данных Ethernet, в которой для соединения абонентов используют физические, так называемые MAC-адреса конечных устройств, что значительно увеличивает трафик.

Принятые с борта ЛА штатной широкополосной антенной 12 ДКМ приемника 13 служебные сообщения через АРМ 7 поступают в формирователь пакета ретранслируемых служебных сообщений 14 и через контроллер 15, обеспечивающий работу по протоколу X.25, по наземной магистральной сети 16 передачи данных, охватывающей все ОпРЦ, доставляются адресату. Поступающее из магистральной сети 16 передачи данных через контроллер 15 служебное сообщение анализируется в анализаторе 17 ретранслируемых служебных сообщений, и через АРМ 8, штатный связной передатчик ДКМ диапазона 18, согласующее устройство 19 и штатную всенаправленную передающую антенну 20 отсылается на борт ЛА.

Передающий пост ИМ осуществляет передачу ЛЧМ-сигналов на борт ЛА и наземные

посты ИМ, согласно хранящемуся в блоке 21 хранения исходных данных частотно-временному расписанию (ЧВР). ЧВР загружается (изменяется) через USB-вход 22 для загрузки исходных данных при предполетной подготовке.

Приемный пост ИМ принимает и анализирует ЛЧМ-сигналы от ЛЧМ-передатчиков в зоне своей ответственности, а также возможные сигналы от мировой сети ИМ. После проведения зондирования ионосферы и получения экспериментальных амплитудно-частотных характеристик и ионограмм проводится их обработка на основе структурно-физической модели радиосвязного ДКМ канала аналогично [2] и вычисляются следующие характеристики ионосферного канала: наименьшие наблюдаемые частоты, максимальные наблюдаемые частоты, интервалы многолучевости, количество лучей на контролируемых частотах, интервалы временного рассеяния (для определения максимально возможной скорости передачи данных при заданном типе используемого в модеме бортового комплекса связи (БКС), полоса когерентности, коэффициент мутности ионосферы (отношение энергии зеркальной компоненты сигнала к энергии рассеянной компоненты сигнала), отношение сигнал/помеха на всех контролируемых частотах, выбор интервалов частот с наибольшей надежностью передачи сообщений для различных видов связных сигналов при заданной допустимой вероятности ошибки на бит. В качестве базового комплекса ИМ для оснащения ОпРЦ можно использовать разработанный АО «НПП «Полет» и прошедший испытания АПК ИМ «Мицар-К» [3].

Каждый приемный пост ИМ имеет полную, многокритериальную картину параметров ионосферного канала для анализа распространения ДКМ радиоволн и обеспечения безопасности полетов ЛА как в одной, так и в соседних зонах ответственности общей протяженностью до 6000 км. Параметры сохраняются в базе данных и по запросу могут быть направлены в центр управления ДКМ радиосвязью.

Для реализации предлагаемого способа ДКМ радиосвязи на территории РФ необходимо использовать сеть стационарных ОпРЦ, соединенных между собой магистральными линиями (физически это могут быть проводные, оптоволоконные или радиорелейные линии), функционирующими на базе сетевых протоколов X.25 (или TCP/IP). При организации воздушной ДКМ радиосвязи «борт ЛА – наземный ОпРЦ» эти магистральные линии фактически играют роль так называемого «обратного канала».

При выборе места расположения ОпРЦ необходимо:

- учитывать особенности географического положения РФ (ее протяженность с востока на запад);
- учитывать влияние геофизических факторов (наличие высокоширотных областей, подверженных влиянию главного ионосферного провала (ГИП), сужающего частотный ДКМ диапазон прохождения радиоволн на (30-60%), смещая его в низкочастотную область с высоким уровнем помех);
- создавать условия для наилучшего распространения радиоволн (организовывать односторонние трассы).

Всю территорию РФ оптимально предлагается разделить на шесть зон ответственности с наличием в каждой зоне от 2 до 4 ОпРЦ, что составит в целом от 25 до 30 ОпРЦ. Расстояние между ОпРЦ должно составлять от 1500 до 3000 км, а крайние («северные» и «южные») ОпРЦ в зоне должны располагаться с учетом выноса из области ГИП точки отражения от ионосферы.

Каждому ОпРЦ присваивается свой идентификационный номер, а передающему посту ИМ задается ЧВР со следующими параметрами:

- время развертки ЛЧМ-сигнала t_p – период времени с N-минутными интервалами, в которое каждый пост начинает работу относительно реального времени;
- стартовое время t_c – период времени, на который синхросигналы передатчика поста ИМ запаздывают относительно времени развертки;

- время начала передачи $t_n = t_p + t_c$ – реальное время, когда передатчик начинает работу в период времени, оговоренный в ЧВР;
- частотный диапазон работы (разность между конечной и начальной частотами);
- скорость развертки df/dt ЛЧМ-сигнала.

Для введения технологии ИМ в воздушную компоненту авиационной адаптивной автоматической ДКМ радиосвязи необходимо дооснастить бортовой комплекс связи четырехканальным приемником-анализатором ЛЧМ-сигналов. Надежность авиационного радиоканала при приеме сигналов от четырех пространственно-разнесенных наземных ОпРЦ с некоррелированными радиосигналами (системная надежность) $P_{\text{сист}}$ может быть записана в виде:

$$P_{\text{сист}} = 1 - \prod_{i=1}^{i=4} \left[\left(1 - P_{\text{ап}}^{\text{Б}} \times P_i^{\text{HF}} \right) \times \left(1 - P_{\text{ап}}^{\text{З}} \times P_i^{\text{HF}} \right) \right],$$

где P_i^{HF} – усредненная надежность радиоканала ДКМ радиосвязи для i -го радионаправления; $P_{\text{ап}}^{\text{Б}}$ – аппаратная надежность для борта ЛА; $P_{\text{ап}}^{\text{З}}$ – аппаратная надежность для наземного ОпРЦ.

Аппаратная надежность для борта ЛА $P_{\text{ап}}^{\text{Б}}$ может быть выражена формулой:

$$P_{\text{ап}}^{\text{Б}} = \frac{A_{\text{от}}^{\text{Б}}}{A_{\text{от}}^{\text{Б}} + A_{\text{в}}^{\text{Б}}},$$

где $A_{\text{от}}^{\text{Б}}$ – среднее время наработки на отказ в часах; $A_{\text{в}}^{\text{Б}}$ – среднее время восстановления аппаратуры после отказа в часах.

Аппаратная надежность для наземного ОпРЦ рассчитывается по такой же формуле:

$$P_{\text{ап}}^{\text{З}} = \frac{A_{\text{от}}^{\text{З}}}{A_{\text{от}}^{\text{З}} + A_{\text{в}}^{\text{З}}}.$$

Для среднестатистических параметров расчет показывает, что при $A_{\text{от}}^{\text{Б}} = 2500$ ч, $A_{\text{в}}^{\text{Б}} = 30$ ч, $P_{\text{ап}}^{\text{Б}} = 0,998$, $A_{\text{от}}^{\text{З}} = 5000$ ч, $A_{\text{в}}^{\text{З}} = 20$ ч, $P_{\text{ап}}^{\text{З}} = 0,996$ даже для $P_1^{\text{HF}} = 0,6$, $P_2^{\text{HF}} = 0,3$, $P_3^{\text{HF}} = 0,7$, $P_4^{\text{HF}} = 0,92$ системная надежность $P_{\text{сист}} = 0,999$.

Таким образом, при одновременном приеме на борту ЛА сигналов от четырех наземных станций даже при недостаточной надежности отдельных каналов системная надежность более чем удовлетворительная.

Бортовой четырехканальный приемник-анализатор – это многофункциональное устройство, которое обеспечивает прием и обработку зондирующих ЛЧМ-сигналов от четырех пространственно-разнесенных ЛЧМ-передатчиков наземных ОпРЦ, вычисление основных параметров ионосферного радиоканала, анализ условий распространения ДКМ радиоволн по всем четырем радиоканалам «борт ЛА-наземный ОпРЦ», выделение оптимального канала, запись и хранение предполетного плана связи (координат и идентификаторов наземных ОпРЦ, ЧВР ЛЧМ-передатчиков ИМ из состава ОпРЦ и алгоритмов его изменения по псевдослучайному закону), формирование пакета данных служебной информации для передачи его через штатный БКС ДКМ диапазона и наземную магистральную сеть оптимальному на данный момент по условиям распространения опорному радиоцентру.

Прием зондирующих ЛЧМ-сигналов осуществляется с помощью бортовой активной всенаправленной широкополосной антенны ДКМ диапазона. При этом синхронизация рабо-

ты бортового четырехканального приемника-анализатора ЛЧМ-сигналов и АПК ИМ всех ОпРЦ достигается путем сверки и корректировки шкал времени их опорных генераторов с эталонной шкалой мирового времени через приемники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС.

Выбор наилучшей (оптимальной) в данный момент рабочей частоты приема ДКМ радиосигналов (ОРЧ) производится на основе анализа постами ИМ нескольких ОпРЦ условий распространения в точке приема по критериям наибольшей надежности передачи сообщений при заданной вероятности ошибки на бит. Также пост ИМ ОпРЦ вычисляет максимально возможную скорость передачи данных в канале «борт ЛА–наземный ОпРЦ», исходя из величины отношения «сигнал/шум» на выбранной частоте и с учетом типа модемов на борту ЛА и в ОпРЦ.

Алгоритм поддержания ДКМ радиосвязи с бортом ЛА в процессе полета реализуется следующим образом. Если в работающем ДКМ радиоканале «борт ЛА-наземный ОпРЦ» надежность передачи сообщений в процессе полета не меньше допустимой при заданной вероятности ошибки на бит, ДКМ радиосвязь поддерживается на данном радиоканале, даже если на других радионаправлениях надежность передачи сообщений выше. Если надежность передачи сообщений становится меньше допустимой, спецвычислитель из состава бортового четырехканального приемника-анализатора обрабатывает информацию о прохождении ЛЧМ-сигналов от всех четырех постов ИМ во всем ДКМ диапазоне и по критерию наибольшей надежности передачи сообщений при заданной вероятности ошибки на бит определяет оптимальный ОпРЦ для ведения ДКМ радиосвязи в канале «борт ЛА–наземный ОпРЦ». Затем определенные в спецвычислителе идентификационный номер, ОРЧ ДКМ радиосвязи, надежность передачи сообщений, максимально возможная скорость передачи данных выбранного для ведения ДКМ радиосвязи ОпРЦ передаются в контроллер из состава бортового четырехканального приемника-анализатора, который формирует пакет служебного сообщения в соответствии с форматом протокола АХ.25 с новыми радиопрогностическими данными и добавляет еще один параметр – время начала вхождения в связь t_n . Далее контроллер по локальной бортовой сети передает в приемник штатного БКС ДКМ диапазона команду на его перестройку на обновленные данные для осуществления связи с выбранным ОпРЦ, а в передатчик штатного БКС – обновленные данные для передачи их в предыдущий ОпРЦ по радиоканалу на выбранной частоте в соответствии с протоколом АХ.25.

В случае, когда надежность передачи сообщений в процессе полета становится меньше допустимой при заданной вероятности ошибки на бит для всех ОпРЦ, находящихся в данной зоне ответственности по изложенному ранее алгоритму поддержания ДКМ радиосвязи БКС ЛА начинает работать с любым ОпРЦ другой зоны ответственности, оснащенным постом ИМ с учетом заранее известного ЧВР его работы.

Использование предложенного варианта построения авиационной адаптивной автоматической декаметровый радиосвязи на незакрепленных частотах позволит организовать высоконадежную отечественную систему дальней связи.

Библиографический список

1. Пат. RU № 2622767. М. кл. H04B 7/00. Способ авиационной адаптивной автоматической декаметровой радиосвязи на незакрепленных частотах / Валов В.А., Бредихин Д.В., Хоптар В.В. 2017. БИ № 17.
2. **Вертоградов, Г.Г.** Автоматизированный аппаратно-программный комплекс для определения оптимальных рабочих частот связной радиолинии по данным наклонного зондирования ионосферы / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, Е.Г. Вертоградова // Труды XIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»: сб. ст.; Воронеж, 2007. – Т. 2. – С. 1203-1214.

3. **Белоусов, Е.Л.** Многофункциональный аппаратно-программный комплекс ДКМВ радиосвязи с системой прогнозирования ионосферных каналов / Е.Л. Белоусов [и др.] // Новые информационные технологии в системах связи и управления: докл. на научно-технической конференции. – Калуга: КНИИТМУ, 2008.

*Дата поступления
в редакцию 10.01.2018*

V.V. Khoptar

**ONE OF THE VARIANTS OF ORGANIZING
THE AIRCRAFT RADIO ADAPTIVE COMMUNICATION IN HF BAND**

«POLYOT Research & Production Company», JSC

Purpose: Investigation of the alternative method of organizing aviation adaptive automatic system of HF radio communication on unfixed frequencies ensuring message transfer reliability of 0.95-0.99, and frequency resources saving due to application of ionospheric monitoring technology (IM) and frequency and space adaptation.

Design/methodology/approach: This method of system integration is realized with the use of IM hardware and software transmit and receive complexes in ground and air components correspondingly.

Research limitations/implications: The scope of application covers HF radio communication systems.

Findings: The usage of the proposed alternative method of developing the aviation adaptive automatic system of HF radio communication on unfixed frequencies enables to arrange a highly-reliable long-range communication system.

Key words: HF radio communication, ionospheric monitoring, linear frequency modulation signals.