

УДК 656.7.052

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОЙ ВЧ СВЯЗИ РОССИИ

Т.И. Горячева, руководитель группы ФГУП "НПП "Полет", к.т.н.,
Д.С. Кулаков, ведущий инженер ФГУП "НПП "Полет"

Отсутствие в России стандартов на технологию адаптивной ВЧ (3...30 МГц) радиосвязи тормозит развитие отечественных систем связи этого диапазона частот. Поэтому актуальной задачей является проведение сравнительного анализа перспективных зарубежных технологий ВЧ связи. Представленные в статье результаты системного анализа стандартных зарубежных технологий могут использоваться при построении интегрированной системы воздушной ВЧ связи России.

Существующие стандартные технологии автоматической ВЧ радиосвязи. Процедура автоматического составления канала связи (ALE) предполагает передачу сигнала адресного (селективного) вызова. Если для вызова и связи используют общий набор частот, то такая система называется системой с общими каналами, а если разные наборы частот, то это система с отдельными каналами. Различают четыре типа систем автоматической ВЧ радиосвязи [1]: асинхронные (ACC — Asynchronous Common Channels) и синхронные (SCC — Synchronous Common Channels) с общими каналами, асинхронные (ASC — Asynchronous Separable Channels) и синхронные (SSC — Synchronous Separable Channels) с отдельными каналами.

Существуют три широко распространенные в мире стандартные технологии автоматического ведения ВЧ радиосвязи:

- второе поколение автоматического составления канала связи (2G-ALE — Second Generation of Automatic Link Establishment), описанное в Приложении А к стандарту США MIL-STD-188-141B [2] (гражданская версия FED-STD-1045), достаточно универсальная система, которая может функционировать в режимах ACC, SCC, ASC и SSC;

- третье поколение технологии ALE (3G-ALE), представленное в Приложении С к стандарту MIL-STD-188-141B как система SSC;

- система ВЧ передачи данных "воздух—Земля" HFDFL (High Frequency Data Link), которая построена на основе международных стандартов ICAO, ARINC и RTCA [3–7] и реализует технологию SCC, оптимизированную для обмена пакетами фиксированной длины (2,461538 с).

Технология 2G-ALE, стандартизованная в 1988 г. и получившая широкое распространение в мире, является обязательным режимом взаимодействия для всех гражданских и военных ВЧ систем США и НАТО. Режим 3G-ALE, введенный в 1999 г., является необязательным (опциональным). Если система реализует режим 3G-ALE, то параллельно она должна работать и в режиме 2G-ALE, что приводит к неэффективному использованию частотного спектра и большой вычислительной и аппаратурной сложности оборудования.

Анализ характеристик технологии 2G-ALE. Асинхронный режим с общими частотами (ACC) технологии 2G-ALE не требует знания точного системного времени. Каждому корреспонденту 2G-ALE назначают список адресов (индивидуальных, групповых и сетевых), общий набор из C частот вызова и связи, интервал сканирования T_c в ожидании вызова. Для составления канала (ALE) используют сигналы с 8-позиционной частотной манипуляцией 8-FSK (8-ЧМн) с символьной ско-

ростью 125 Бод, битовой скоростью 375 бит/с, шириной полосы 3 кГц. Для прямой коррекции ошибок реализуют кодирование Голея, перемежение и трехкратное повторение, что снижает скорость передачи данных пользователя до 53,57 бит/с. Для связи используют или указанный модем ALE или модемы, заданные в стандартах MIL-STD-188-110B, STANAG 4285, STANAG 4529.

Каждый корреспондент ACC режима 2G-ALE реализует асинхронный режим сканирующего приема в ожидании команд селективного вызова, перестраиваясь по заданному общему набору из C частот с интервалом сканирования T_c , задаваемым программно 0,5 с, 0,2 с или 0,1 с.

Одно слово адреса вызываемого корреспондента 2G-ALE имеет длительность $T_w = 0,13066$ с. Оно передается не менее трех раз, образуя избыточное слово адреса (rw — redundant word) длительностью $T_{rw} = 0,392$ с. В асинхронном режиме 2G-ALE перед посылкой вызова осуществляется прослушивание канала на занятость в течение $T_L = 2$ с. В случае незанятости частотного канала передается избыточное слово адреса вызываемого корреспондента подряд несколько раз, чтобы сканирующий приемник успел настроиться на частоту вызова за время его передачи и обнаружить свой адрес. Например, если задано $C = 10$ и $T_c = 0,5$ с, то вызов должен передаваться на выбранной оптимальной частоте, по крайней мере, в течение времени перебора всех C частот сканирующим приемником ($T_n = C T_c = 5$ с). По окончании времени T_n должен быть передан полный вызов длительностью $3T_{rw} = 1,176$ с, содержащий адреса вызываемого и вызывающего корреспондентов и режим связи. Таким образом, минимальное время передачи вызова для $T_c = 0,5$ с равно $T_{ACC \text{ мин. выз } 0,5} = C T_c + 3T_{rw} = 6,176$ с, для $T_c = 0,2$ с — 3,176 с, для $T_c = 0,1$ с — 2,176 с. При округлении этих временных интервалов до кратности одному избыточному слову команды $T_w = 0,394$ с получаем следующие длительности вызывных сообщений:

$$T_{ACC \text{ выз } 0,5} = 16 T_w = 6,272 \text{ с,}$$

$$T_{ACC \text{ выз } 0,2} = 8 T_w = 3,186 \text{ с,}$$

$$T_{ACC \text{ выз } 0,1} = 6 T_w = 2,352 \text{ с.}$$

После обнаружения сигнала вызова вызываемый корреспондент прекращает сканирование и посылает ответ в адрес вызывающего, который, в свою очередь, завершает процедуру вызова передачей квитанции. Команды ответа и квитанции имеют равные длительности $T_{отв} = T_{кв} = 3 T_w = 1,176$ с. Далее в ACC системе начинается сеанс связи — передается связанное сообщение длительностью T_m и квитанция на него длительностью T_m . Таким образом, минимальное время составления канала $T_{ACC \text{ сост. мин}}$ с первой попытки равно времени предварительного прослушивания перед вызовом T_L плюс время передачи вызова $T_{ACC \text{ выз}}$, ответа $T_{отв}$, квитанции $T_{кв}$, плюс временной интервал $T_{обр} = 0,392$ с для учета времени на переходы от приема к передаче и наоборот, на формирование и обработку команд, время распространения радиоволн (70 мс)

$$T_{\text{ACC сост. мин}} = T_L + T_{\text{ACC выз}} + T_{\text{отв}} + T_{\text{кв}} + T_{\text{обр}} = T_L + T_{\text{ACC выз}} + 7T_{\text{rw}}$$

Минимальное время обслуживания заявки на связь равно времени составления канала плюс время передачи сообщения T_m и квитанции длительностью T_m

$$T_{\text{ACC обл. мин}} = T_{\text{ACC сост. мин}} + 2T_m$$

После сеанса связи оба корреспондента АСС системы связи переходят в режим сканирующего приема в ожидании очередного вызова. Если качество канала связи еще при "рукопожатии" оказалось неудовлетворительным для ожидаемого сеанса связи, то вызывающий корреспондент переходит к процедуре вызова на другой частоте. Алгоритм обслуживания заявки в режиме АСС сети 2G-ALE представлен на рис. 1.

Каждый корреспондент сети 2G-ALE должен анализировать качество сигналов (вызова, связи, зондирования) других станций и записывать свои оценки в матрицу качества связи. При поступлении пакета сообщения для передачи он обращается к матрице качества связи, чтобы выбрать оптимальный канал вызова и связи. Выбрав наилучшую частоту, вызывающий сначала прослушивает выбранный канал, проверяя его на занятость. Существует некоторая вероятность P_1 того, что этот канал свободен. Для пуассоновского распределения потока заявок на связь и времени T_L прослушивания канала перед вызовом в секундах

$$P_1 = \exp(-2\lambda \frac{T_L}{3600C}), \quad (1)$$

где λ — интенсивность потока заявок в час в сети, C — число общих каналов вызова и связи.

Если первый выбранный канал занят, станция выбирает второй канал и прослушивает его. Число попыток выбора канала и прослушивания его в среднем составляет $1/P_1$, а время прослушивания перед передачей первого вызова — T_L/P_1 . Если канал свободен, нет коллизии случайного дос-

тупа и вызываемая станция не занята, то в лучшем случае станция удачно передает вызов и составляет канал связи за время $T_{\text{ACC сост } P_1, P_1}$, равное времени передачи вызова, ответа, квитанции с учетом вероятности существования нормальных условий распространения радиоволн P_4 , плюс время прослушивания $T_L/(P_1 P_4)$. Радиокomiteeт Международного союза электросвязи (ITU-R) рекомендует для расчетов 2G-ALE брать $P_4 = 0,63$ [1].

$$T_{\text{ACC сост } P_1, P_1} = T_L/(P_1 P_4) + (T_{\text{ACC выз}} + 7T_{\text{rw}})/P_4. \quad (2)$$

Время обслуживания заявки

$$T_{\text{обсл } P_1, P_1} = T_{\text{ACC сост } P_1, P_1} + 2T_m. \quad (3)$$

Время занятия эфира (излучения) при составлении канала с учетом P_4

$$T_{\text{изл. } P_1} = (T_{\text{ACC выз}} + 7T_{\text{rw}})/P_4 + 2T_m. \quad (4)$$

Для вычисления вероятности того, что вызов будет успешным, следует учитывать вероятность P_2 того, что в этом же канале не начнет передачу другая станция (вероятность отсутствия коллизий во время вызова), и вероятность P_3 того, что станция-адресат не занята обслуживанием другой заявки. Число попыток вызова на разных каналах, обусловленное влиянием коллизий случайного доступа, занятости вызываемой станции, условий распространения радиоволн, в среднем составляет $1/(P_2 P_3 P_4)$. Вероятность отсутствия коллизий случайного доступа в выбранном канале во время составления канала и передачи связного сообщения для пуассоновского потока заявок

$$P_2 = \exp(-2\lambda \frac{T_{\text{изл. } P_1}}{3600C}). \quad (5)$$

С учетом P_2 время обслуживания заявки

$$T_{\text{ACC обл } P_1, P_2, P_1} = T_{\text{ACC сост } P_1, P_2, P_1} + 2T_m, \quad (6)$$

где

$$T_{\text{ACC сост } P_1, P_2, P_1} = T_L/(P_1 P_2 P_4) + (T_{\text{ACC выз}} + 7T_{\text{rw}})/(P_4 P_2). \quad (7)$$

Тогда вероятность того, что станция-адресат не занята обслуживанием другого сообщения

$$P_3 = \exp(-2\lambda \frac{T_{\text{ACC обл } P_1, P_2, P_1}}{3600C}). \quad (8)$$

С учетом вероятности P_3 среднее время обслуживания заявки

$$T_{\text{обсл}} = T_{\text{сост}} + 2T_m, \quad (9)$$

где $T_{\text{сост}} = T_L/(P_1 P_2 P_3 P_4) + (T_{\text{ACC выз}} + 7T_{\text{rw}})/(P_2 P_3 P_4)$.

Существует предел количества сообщений, которое может обработать отдельная станция АСС в час. С учетом времени, затрачиваемого станцией на обслуживание сообщения, λ и допустимого времени обслуживания сообщения $T_{\text{обсл. доп}}$ пропускная способность одной станции $M_{\text{АСС}}$, интенсивность трафика в системе E , интенсивность трафика на один канал A_k определяются выражениями:

$$M_{\text{АСС}} = \frac{3600 E}{S(T_{\text{обсл}})}, \quad E = \lambda T_{\text{обсл. доп}} / 3600 \text{ (Эрл.)}, \quad (10)$$

$$A_k = \lambda \frac{T_{\text{обсл. доп}}}{3600 C} \text{ (Эрл.)}.$$

Асинхронный режим с раздельными каналами (АСС) системы 2G-ALE реализует алгоритм составления канала связи, совпадающий с описанным выше алгоритмом АСС. Различие со-

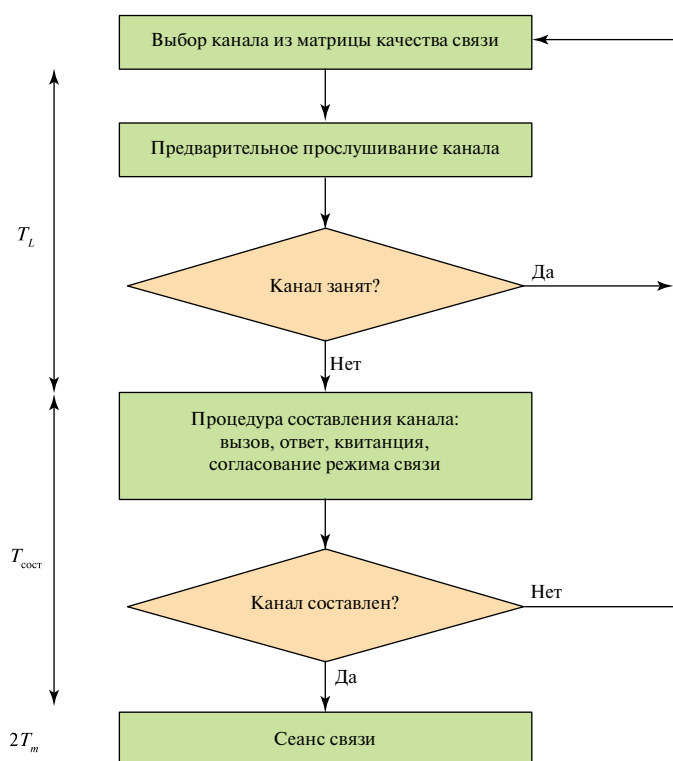


Рис. 1.

стоит в том, что контроллер составления канала связи (ALE) после успешного тройного обмена на частоте вызова пакетами “вызов”, “ответ”, “квитанция” (“рукопожатия вызова”), перестраивается на частоту связи и проводит “рукопожатие согласования” (обмен командами согласования режима связи), возвращается в режим сканирующего приема, а управление сеансом связи обеспечивает другой контроллер связи, который может использовать любой вид связи — телефон, телекод, телетайп, факс.

Синхронный режим вызова с общими каналами (SCC). Алгоритм этого режима представлен на рис. 2. Цикл сканирования $T_c = 1,3$ с равен времени передачи команды вызова $T_{SCC_{выз}} = 3T_{rw} = 1,176$ с плюс защитный интервал на рассинхронизм в линии (50 мс) и время распространения радиоволн (70 мс). Вызывающая станция предварительно выбирает оптимальный канал и затем ожидает некоторое время ($T_{ож}$) до тех пор, пока вызываемая станция в режиме сканирования не настроится на выбранную частоту.

До момента передачи вызова вызывающая станция должна прослушать выбранный канал для того, чтобы убедиться в том, что он свободен. Среднее время ожидания передачи вызова при $T_c = 1,3$ с и $C = 10$

$$T_{ож} = T_c C / 2 = 6,5 \text{ с.} \quad (11)$$

Максимальное число сообщений, обслуживаемых в час одной станцией SCC системы,

$$M_{SCC} = \frac{3600}{T_{ож} / (P_1 P_2 P_3 P_4) + 7T_{rw} / (P_2 P_3 P_4) + 2T_m}. \quad (12)$$

Сравнение характеристик режимов ACC и SCC технологии 2G-ALE. Результаты расчета системных характеристик режимов ACC и SCC технологии 2G-ALE по методике, указанной в (1)–(12), приведены в табл. 1 для $S = 10$, $T_L = 2$ с, $T_m = 2,46$ с (для адекватного сравнения с системой HFDL) и различных значений C и T_c . В табл. 1 $T_{сост}$ — среднее время составления канала.

Из табл. 1 видно, что среднее время составления канала связи в наиболее типичном режиме ACC равно 29 с ($T_c = 0,5$ с и $C = 10$). При $T_c = 0,2$ с минимальное среднее время составления канала равно 19 с для $C = 15$. Минимальное среднее время составления канала 15 с достигается при $T_c = 0,1$ с и $C = 15$. Этот режим является наиболее эффективным в смысле минимального времени составления канала. Поэтому в стандарте MIL-STD-188-141B рекомендуется для ACC 2G-ALE реализовать режим сканирования с циклом 0,1 с. Для синхронного режима с общими каналами (SCC) время составления канала минимально при $C = 5$ и равно 23 с.

Анализ характеристик технологии 3G-ALE. Технология третьего поколения ALE (3G-ALE) дополняет, но не заменяет базовый (обязательный) режим взаимодействия автоматических систем ВЧ связи 2G-ALE. Пользователи, решившие внедрить режим 3G-ALE, обязаны параллельно реализовать базовый режим 2G-ALE. Технология 3G-ALE использует отдельные наборы частот и функционирует как синхронная система (SSC) множественного доступа с временным разде-

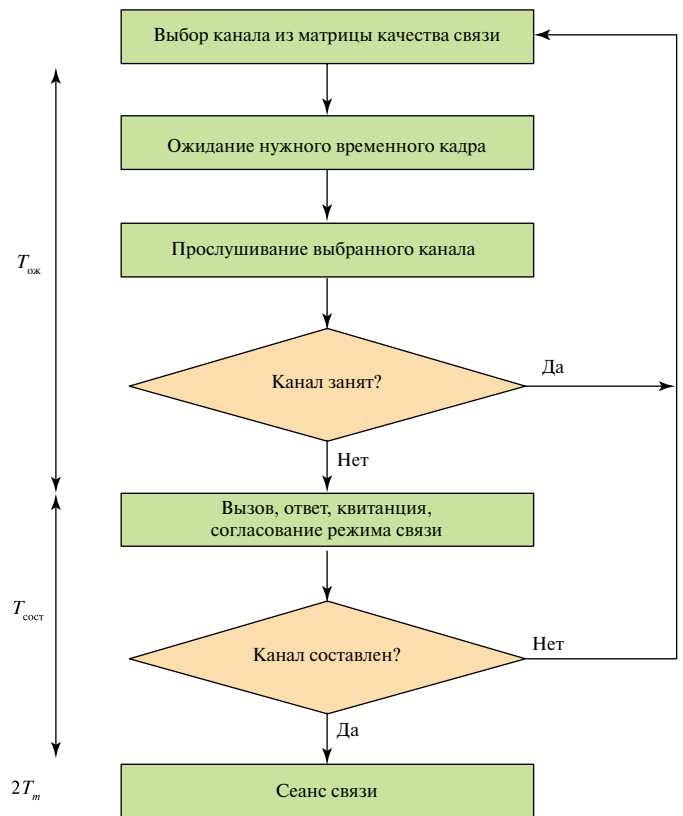


Рис. 2

лением (TDMA) в вызывной сети и как асинхронная система (ASC) в сети с любой длительностью связного сообщения. Это затрудняет прогнозирование системных характеристик для оптимизации сети.

В режиме 3G-ALE используется новый более помехоустойчивый (на 7–9 дБ) адаптивный модем 8-позиционного фазоманипулированного сигнала 8-PSK (8-ФМн) с символьной скоростью 2400 Бод (битовой скоростью без учета кодирования 7200 бит/с). Пакет вызова длительностью 613,333 мс содержит 26 бит пользователя, которые подвергаются сверхточному кодированию и дополнительному кодированию 16-разрядными ортогональными функциями Уолша. Эффективная скорость кодирования пакета вызова составляет 1/96.

Адаптивный прием в сочетании с кодированием и перемежением данных при работе в “плохих” каналах по терминологии, введенной в Рекомендации F.520–2 ITU-R, позволяет обнаружить сигнал вызова и составить канал с вероятностью не менее 0,95 при отношении сигнал/шум 3 дБ. При работе в “хороших” каналах (по терминологии F.520–2 ITU-R) требуемое отношение сигнал/шум равно 1 дБ. Аналогичные требования для вызова в 2G-ALE составляют соответственно 11 и 8,5 дБ, т. е. на 8 и 7,5 дБ больше. В каналах с аддитивным белым гауссовским шумом 2G-ALE составляет канал с вероятностью 0,95 при 0 дБ, а 3G-ALE — при –7 дБ. Таким образом, для хорошей работы средств связи 3G-ALE требуемая энерге-

Таблица 1

C	5				10				15				20			
	SCC		ACC		SCC		ACC		SCC		ACC		SCC		ACC	
T_c , с	1,3	0,5	0,2	0,1	1,3	0,5	0,2	0,1	1,3	0,5	0,2	0,1	1,3	0,5	0,2	0,1
$T_{сост}$, с	23	34	24	22	25	29	20	16	29	33	19	15	35	36	20	16
$T_{обс}$, с	28	39	29	27	29	34	24	21	34	38	24	20	40	41	25	21
M, сооб/ч	42	30	41	45	41	35	49	57	35	31	50	59	30	29	47	57

тика канала на 7 дБ ниже, чем для 2G-ALE. Это равноценно увеличению дальности связи на 3—4 тыс. км или увеличению надежности связи на 20—30% на одной и той же дальности. Поэтому при расчетах системных характеристик 3G-ALE используем вероятность $P_4 = 0,9$, а не 0,63 как для 2G-ALE.

Вызывная сеть 3G-ALE функционирует в режиме TDMA. Время использования каждого частотного канала вызова разбито на временные кадры длительностью $T_c = 5,4$ с. Каждый кадр содержит шесть временных слотов доступа к каналу по 900 мс. Первый слот кадра вызова предназначен для перестройки вызывающего корреспондента на частоту связи, соответствующую текущей вызывной частоте, прослушивания канала связи и обнаружения его занятости, последний (шестой) слот предназначен для приема ответов на вызов или передачи сигналов зондирования по заданному программно расписанию. Остальные слоты (со 2-го по 5-й) используются в режиме случайного доступа многими корреспондентами (группой, совместно использующей канал вызова) для послышки сигналов вызова, приема ответа, передачи квитанции. Причем более приоритетные вызовы посылаются с большей вероятностью во 2- и 3-м слотах, а менее приоритетные — в 4- и 5-м слотах. Это предусмотрено алгоритмом управления множественным доступом к каналу.

Станции, использующие один и тот же канал на длительности кадра (двэлла) 5,4 с, объединены в двэлл-группы. Каждая двэлл-группа слушает на своем канале в течение каждого кадра (двэлла). Номер канала вызова D вычисляется каждой двэлл-группой следующим образом: $D = ((T/5,4) + G) \bmod C$, где D — номер канала (от 0 до $C - 1$), T — количество секунд после полуночи (сетевое время), G — номер двэлл-группы, C — количество частот вызова с номерами от 0 до $C - 1$.

Среднее время составления канала вызова в системе 3G-ALE в режиме SSC с первой попытки равно среднему времени ожидания интервала выбранной частоты вызова, т. е. произведению числа каналов $(C + 1)$ на период кадра (двэлла) вызова (5,4 с), деленному пополам

$$T_{\text{сост. ср.}} = 5,4 (C + 1) / 2 = 29,7 \text{ с.}$$

Кадром доступа к каналу вызова может пользоваться группа до 60 корреспондентов при малой интенсивности потока сообщений ($\lambda = 2$ сооб./ч) от каждого корреспондента. При этом обслуживается 120 вызовов в час на одном канале с задержкой 7 с. При увеличении λ или/и числа корреспондентов в двэлл-группе растет задержка передачи вызова. С учетом вероятностей P_1, P_2, P_3, P_4 среднее время составления канала может возрасти в десятки раз.

Согласно MIL-STD-188-141B при вхождении в систему 3G-ALE работа синхронного режима 3G-ALE (SSC) должна предваряться асинхронным режимом сканирования в ожидании вызова и ответом на вызов по протоколу асинхронного режима. Перед сканирующим вызовом режима ASC 3G-ALE время прослушивания связного канала равно 2 с, прослушивания вызывного канала — 640 мс. Время передачи сканирующего вызова в секундах должно быть не менее

$$T_{\text{ASC выз. 3G}} = T_{\text{вых. прд}} + (C M + 1)(T_{\text{преам. выз}} + T_{\text{дан. выз}}),$$

где $T_{\text{вых. прд}} = 0,1067$ с — время выхода передатчика на полную мощность; C — количество частот вызова; $M = 1,3$; $T_{\text{преам. выз}} = 0,16$ с — время преамбулы вызывного пакета (BW0); $T_{\text{дан. выз}} = 0,346667$ с — время передачи данных в пакете вызова.

При $C = 10$ минимальное время передачи сканирующего вызова в асинхронном режиме 3G-ALE $T_{\text{ASC выз. 3G}} = 7,707$ с. Время “рукопожатия вызова” составляет 10,8 с. С учетом времени прослушивания (2,64 с) время составления канала

$T_{\text{сост.}} = 13,44$ с. Время составления канала с первой попытки с учетом обмена согласования режима связи на частоте трафика равно 14,8 с. Среднее время составления канала с учетом всех (P_1, P_2, P_3, P_4) вероятностей состояния канала равно 27,7 с. Время обслуживания заявки при $T_m = 2,46$ с равно 41,74 с. Результаты расчета характеристик асинхронного режима составления канала 3G-ALE приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что минимальное среднее время составления канала в асинхронном режиме с отдельными каналами (ASC) 3G-ALE составляет 14,65 с, что меньше минимального среднего времени составления канала в режиме ACC 2G-ALE (15,1 с) с интервалом сканирования $T_c = 0,1$ с.

Таблица 2

Количество частот вызова / связи	5 / 5	10 / 10	15 / 15	20 / 20
$T_{\text{выз}}^*$, с	4,16	7,707	10,75	14,293
$T_{\text{сост. мин.}}$, с	9,893	13,44	16,48	20,027
$T_{\text{сост. ср.}}$, с	14,647	17,888	21,137	25,311
$T_{\text{обсл.}}$, с	26,12	28,28	31,17	35,2
M , сооб/с	46	42	37	34

Анализ характеристик технологии HFDDL. Третьей стандартной технологией адаптивного ведения пакетной ВЧ связи является система “воздух—Земля” HFDDL, представленная стандартами ARINC 634, 635, 753, RTCA DO-625, 277, Приложением 10 к соглашениям ICAO, Руководством ICAO по HFDDL [2—7]. Она относится к синхронным системам с общими частотами вызова и связи (SCC) и состоит из нескольких подсетей “воздух—Земля” типа звезда, ведущие (наземные) станции (НС) которых связаны между собой с наземными пользователями и с центром управления системой связи HFDDL через наземную сеть связи. В системе HFDDL канал связи составляется не для каждого пакета сообщения, как в системах 2G-ALE и 3G-ALE, а на более длительный период времени, пока качество канала между воздушным судном (ВС) и ВЧ НС не деградирует ниже заданного порога.

Система HFDDL оптимизирует надежность связи, спектральную и экономическую эффективность системы пакетной связи “воздух—Земля”, в которой большое количество ВС (до 2500) обслуживается малым количеством частотных каналов (до 48—60) и наземных станций (до 16) в режиме множественного доступа с временным и частотным разделением. В системе HFDDL реализуются все перспективные технологии ВЧ связи: автоматического составления канала с автовыбором частоты; высокоскоростной передачи данных в каналах с изменяющимися параметрами и многоразовостью; многопараметрической адаптации радиолинии по частоте, скорости передачи, видам модуляции и кодирования; автоматического управления частотой (ионосферного мониторинга), а также пространственного разнесения НС.

Высокая спектральная эффективность системы достигается благодаря использованию комбинированного протокола множественного доступа к каналу с частотным (FDMA) и временным (TDMA) разделением. Протокол FDMA обеспечивается тем, что разные частотные каналы (от двух до шести) назначаются разным ВЧ НС, а протокол TDMA — тем, что время использования каждого частотного канала разбивается на 32-секундные кадры, а каждый кадр разбивается на 13 временных слотов доступа длительностью 2,46 с. На всех частотах НС периодически (в первом слоте каждого кадра) излучают сигналы маркеров, качество которых оценивают станции ВС при выборе частоты связи. Станция ВС выби-

рает для связи любой канал, качество сигнала маркера которого является приемлемым или наилучшим, регистрируется на этом канале на наземной станции и ведет на нем связь до тех пор, пока качество канала отвечает требуемому уровню. Один канал связи могут выбрать несколько ВС и зарегистрироваться на нем.

Каждый канал HF DL системы используется всеми зарегистрированными на нем станциями ВС и НС в режиме TDMA. Управление протоколом TDMA обеспечивает ВЧ наземная станция как ведущая станция сети типа звезда, передавая в сигналах маркеров назначения слотов, резервируемых по запросам от бортов, слотов случайного доступа и слотов для передач с "Земли". Наземная станция прогнозирует системные характеристики (задержку передачи пакета) на каждом своем частотном канале и выставляет флаг занятости канала в маркере, когда критическое число самолетов зарегистрировалось на канале, чтобы прекратить доступ к нему новых корреспондентов и гарантировать заданные системные характеристики (задержку передачи пакета не более допустимой).

Простота прогнозирования системных характеристик в системе HF DL и их гарантирование для пользователей определяется тем, что все сообщения в системе (вызывные и связные) имеют одинаковую стандартную структуру, длительность, равную слоту (2,46 с), и передаются по единому протоколу TDMA на общем наборе частот. В зависимости от качества канала и объема передаваемых данных в сообщении каждым корреспондентом выбирается оптимальный вид многопозиционной фазовой манипуляции и кодирования. При этом меняется скорость передачи данных пользователя (300, 600, 1200 или 1800 бит/с), но длительность сообщения (2,46 с) и символьная скорость 1800 Бод не меняются. В одном слоте (пакете сообщения) можно передать до 405 байт пользователя, в двухслотовом сообщении (4,92 с) — до 945 байт.

Приемник станции HF DL воздушного судна может анализировать сигналы маркеров от разных станций в фоновом режиме, в паузах между сеансами связи и непрерывно поддерживать таблицу качества каналов связи для того, чтобы оперативно менять канал при ухудшении качества связи ниже допустимого порога. При этом среднее время составления канала содержит только время регистрации на выбранном канале, равное в среднем 16 с. В отличие от стандарта MIL-STD-188-141B, где для каждого сообщения составляется канал связи, в HF DL канал составляется один раз для многих сеансов связи между ВС и НС, который используется для передачи многих пакетов сообщений до тех пор, пока качество канала остается приемлемым для ВС. Основной вклад во время обслуживания пакета HF DL вносит задержка, обусловленная коллизиями случайного доступа. Вероятность коллизий зависит от количества корреспондентов, использующих один канал, и от интенсивности потока сообщений от каждого из них.

Результаты расчета количества ВС, обслуживаемых одним частотным каналом при средней задержке передачи пакета, не превышающей 60 с, при комбинированном протоколе TDMA с пятью слотами случайного доступа и пятью слотами резервированного доступа с бортов в кадре, приведены в табл. 3. Эти результаты совпали с системными характеристиками, рекомендуемыми ICAO для сети передачи данных HF DL. Они получены путем моделирования процесса возникновения коллизий случайного доступа с использованием аппарата теории марковских цепей.

Количество ВС, обслуживаемых одним ВЧ радиоканалом HF DL в режиме TDMA с задержкой не более 60 с при использовании 10 слотов случайного доступа с борта внутри кадра HF DL, приведено в табл. 4. Из таблицы видно, что для интенсивности потока сообщений с борта 50 сооб/ч системы связи стратегического назначения, при задержке, не превы-

Таблица 3

Интенсивность потока сообщений с борта, сооб/ч	Число абонентов на одном канале	Интенсивность потока сообщений с борта, сооб/ч	Число абонентов на одном канале
1	156	11	26
2	85	12	25
3	61	13	24
4	50	14	23
5	43	15	22
6	38	16	21
7	36	17	20
8	33	18	20
9	30	19	19
10	28	20	18

Таблица 4

Интенсивность потока сообщений с борта, сооб/ч	Число абонентов на одном канале	Интенсивность потока сообщений с борта, сооб/ч	Число абонентов на одном канале
2	156	13	37
3	109	14	35
4	85	15	34
5	71	16	32
6	61	17	31
7	55	18	30
8	50	19	29
9	46	20	28
10	43	30	22
11	41	40	19
12	39	50	17

шающей 60 с, на одном частотном канале HF DL возможно обслужить до 17 ВС. Для обслуживания 500 ВС стратегической авиации потребуется всего 30 частотных каналов шириной 3 кГц. При этом на каждом частотном канале будет обслуживаться $50 \times 17 = 850$ сооб/ч.

При интенсивности обмена, соответствующей тактической авиации (порядка 120 сооб/ч), и времени задержки не более 15 с на одном канале можно обслужить всего 5 ВС. Для обслуживания 500 ВС тактической авиации потребуется 100 каналов связи. На одном канале при этом будет обслуживаться $120 \times 5 = 600$ сооб/ч.

Для обслуживания 500 ВС ГА с интенсивностью обмена 11 сооб/ч с борта, 6 сооб/ч с Земли и временем задержки не более 60 с потребуется всего 20 каналов связи. Пропускная способность канала при этом будет 442 сооб/ч.

Таким образом, для интегрированной российской воздушной ВЧ системы связи, обслуживающей одновременно до 1500 ВС ГА и ВВС, потребуется 150 частотных 3-кГц каналов. Если ВЧ наземный центр (станцию) оснастить шестью приемниками, передатчиками и модемами HF DL, то для единой интегрированной системы воздушной ВЧ дальней связи РФ потребуется 25 ВЧ НС, пространственно разнесенных по границам РФ. Если ВЧ систему связи использовать только для дальней связи 500 ВС стратегической авиации и 500 ВС ГА, то достаточно 50 частотных каналов, обслуживаемых девятью ВЧ НС.

Технология HF DL может быть использована для военных систем связи при условии обеспечения соответствующей крипто- и имитозащиты путем засекречивания начальной

установки скремблера в модеме HF DL. Возможность обмена данными в режиме HF DL в интересах командования и управления проверялась центром систем электроники ВВС США в ходе трассовых испытаний "JEFX99" [8], в результате которых было принято решение о внедрении режима HF DL в дальней стратегической авиации США.

Заключение. Технология HF DL обеспечивает максимальную эффективность использования ограниченного набора частот, поскольку позволяет обслуживать большое количество ВС на одном частотном канале. Одна наземная станция ГА, оборудованная шестью каналами HF DL обслуживает до 156 ВС ГА. При этом пропускная способность одной наземной станции составляет 2652 сооб/ч, одного частотного канала 442 сооб/ч.

Результаты расчетов сети 2G-ALE для пакетов длительностью 2,46 с (как и в HF DL), показывают, что максимальная пропускная способность станции ACC 2G-ALE может достигать 186 сооб/ч. В ASC системе 3G-ALE на одном частотном вызывном канале в среднем обслуживается 88 выз/ч. Следовательно, эффективность использования частотного канала в HF DL в 2,37 раза больше, чем в 2G-ALE, в 5 раз больше, чем в асинхронной 3G-ALE (ASC) и в 2 раза больше, чем в синхронной 3G-ALE (SSC) системе.

Предлагаемое в [9] экономное использование программно-аппаратных средств ВЧ НС для организации связи "воздух—Земля" и "Земля—Земля" на базе технологии HF DL, возможность прогнозирования и гарантирования системных характеристик, способность системы HF DL к масштабированию делают ее эффективной для построения единой системы

авиационной ВЧ связи РФ. Оснащение российских ВС ГА и ВВС станциями с режимом HF DL "Ягут-324", которые разработаны ФГУП НПП "Полет", обеспечит внедрение в международную сеть HF DL, а также позволит создать автономную российскую высоконадежную сеть передачи данных двойного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рекомендации МСЭ-Р.** Фиксированная служба ВЧ системы. Том 1997 г., серия F, часть 3. Бюро радиосвязи.
2. **MIL-STD-188-141B.** Стандарты взаимодействия и характеристик для среднечастотных и высокочастотных радиосистем. 1999.
3. **Приложение 10** к соглашениям ICAO (Том 3, часть 1, глава 11). — Женева. ICAO, 2000.
4. **ARINC 635-3 Specification.** HF Data Link Protocols. 2000.
5. **ARINC 753-3 Characteristics.** HF Data Link System. 2001.
6. **Руководство по ВЧ-линии передачи данных (Doc9741 — AN/962).** Издание первое. — ICAO, 2000, 148 с.
7. **RTCA/DO-265.** Стандарты минимальных требований к эксплуатационным характеристикам (MOPS) для авиационной мобильной высокочастотной линии данных (HF DL). 2000.
8. **Girard M.M., Brady R.F., Stephen C., Hill W.** Dual Use of Commercial Avionics Data Links for the U.S. Air Force. — The MITRE Corp.; ESC. Massachusetts, 2001.
9. **Патент РФ № 2286030.** ВЧ система и способ обмена пакетными данными. ФГУП "НПП "Полет". 2006.

Получено 2.07.07

ЦИФРОВАЯ РАДИОСВЯЗЬ XXI ВЕКА

ЯГУТ-324

АВИАЦИОННАЯ БОРТОВАЯ
РАДИОСТАНЦИЯ
ДКМВ ДИАПАЗОНА

Дальняя телефонная радиосвязь и передача данных для воздушных судов гражданской авиации

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ:

- Дальняя телефонная связь между экипажами воздушных судов и наземными пунктами управления
- Работа в международной сети передачи данных HF DL
- Адаптация радиолинии по частоте, скорости передачи данных, виду модуляции и кодирования, пространственному разнесению радиочастот сети
- Эффективное использование частотного спектра в режиме TDMA
- Надежность связи не менее 0,95
- Мощность передатчика 400 Вт
- Соответствует требованиям ARINC 635, 753, 758, 624, 604, 429, DO-265, RT-178, 160D





ФГУП НПП
ПОЛЕТ

60350 Нижний Новгород, ГСН-402
 телефон: (831) 245-21-04
 факс: (831) 249-35-41, 245-31-07
 E-mail: info@polnet.ru Web: www.polnet.ru
 Представительство в Москве
 телефон: (495) 621-62-63, факс: (495) 617-00-78