

УДК 621.396.933

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ СРЕДСТВАМИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ МЕЖСАМОЛЁТНОЙ НАВИГАЦИИ

Липаков Н.Е.

Рассматриваются направления организации распределенной сети информационного обмена в группе летательных аппаратов с использованием унифицированной бортовой аппаратуры определения взаимных координат. Производится оценка максимального объема группы, для которого может осуществляться решение задач группового самолётовождения с обеспечением заданной точности определения взаимных координат и темпа обновления информации.

Ключевые слова: летательные аппараты; групповой полет; взаимные координаты; задача самолётовождения; относительная навигация.

Введение

Данная публикация посвящена проблеме организации системы взаимодействия большого числа летательных аппаратов, позволяющей решать задачи группового самолётовождения и задачи обмена тактической и навигационной информацией с использованием средств унифицированной бортовой аппаратуры межсамолётной навигации (МСН). Расчётным путем была определена доля информационной емкости канала связи, которую можно использовать для передачи тактической информации, а также максимальное число самолётов в группе и длительность периода информационного обмена между ними, при которых достигается требуемая точность определения взаимных координат объектов, расположенных на малых удалениях. Расчёт числа самолётов в группе выполнен с учётом возможного влияния переходных процессов синхронизации в системе, приводящих к перерывам в поступлении информации и, как следствие, увеличению ошибки определения координат в течение интервала экстраполяции. Проведенные расчёты показывают возможность организации устойчивой работы и обмена навигационной информацией на скорости до 1 кбит/с в группе от 2 до 36 самолётов, которые могут находиться как на минимальных удалениях – 100 м между самолётами пары, так и на максимальных – 100 км между самолётами группы. Результаты работы могут быть использованы при проектировании информационно-навигационной системы навигации и управления группы летательных аппаратов.

В настоящей статье рассматривается возможность расширения функций аппаратуры летательных аппаратов, работающей в режиме определения взаимных координат (ОВК), предназначенной для обмена навигационной информацией между различными летательными аппаратами [1], для организации взаимодействия в рамках локальной радиотехнической системы (ЛРТС) ОВК, обеспечивающей:

- взаимодействие до $N_{max}=100$ абонентов (ЛА) в группе на взаимных удалениях между парой абонентов от $D_{min}=100$ м до $D_{max}=100$ км;

- темп обновления информации $T_{\text{Ои}}$ – от 1 с;
- объем информации, передаваемой каждым абонентом – 1000 бит.

Взаимодействие абонентов ЛРТС ОВК предполагает следующие условия работы:

- все взаимодействующие абоненты находятся в зоне видимости друг друга, т. е. в общей зоне работы диаметром 100 км;
- абоненты решают задачу относительной радионавигации (ОРН), т.е. выполняют только определение взаимных координат взаимодействующих объектов без решения задачи группового самолётовождения (ГСВ) [2];
- каждый абонент передаёт в эфир координатную информацию, получаемую от бортовых систем, а также служебную, формируемую аппаратурой.

Поскольку решение задачи ОРН при указанных условиях осуществляется со значительным ресурсным запасом, представляется целесообразным рассмотреть возможность расширения функциональных возможностей системы следующим образом:

1) Оптимизировать распределение информационной емкости канала связи путем разделения на навигационную часть, требующую существенно меньших затрат (порядка 10-15% от общего объема передаваемой информации), и информационную часть, позволяющую организовать сквозную линию передачи «борт-борт», безотносительно наполнения передаваемой информации.

2) Увеличить темп информационного обмена в группах взаимодействующих ЛА путем уменьшения максимального количества абонентов до определяемого тактикой применения и характером выполнения задач реального количества ЛА, например – 24 самолётов объединенной группы [3], что позволит решать задачи ГСВ.

3) Расширить зону работы группы ЛА путем построения пространственно-распределенных групп [4], область решения задач в которых заведомо превышает максимальное удаление взаимодействия между парами ЛА.

1 Решение задач межсамолётной навигации в системах предыдущих поколений

Для определения возможного круга задач, которые могут решаться абонентами ЛРТС ОВК, целесообразно рассмотреть некоторые из предшествующих систем и выполняемые ими функции, сведения о которых представлены в таблице 1 [3, 5 - 7].

Первой рассматриваемой системой, решающей задачу межсамолётной навигации, является аппаратура «Радикал», позволяющая организовать взаимодействие объектов различных типов, выполняющих определение своего местоположения (дальности и пеленга) в группе из 2, 4 или 10 объектов в режиме сбора. В данном режиме методами «запрос-ответ» и простейшей радиопеленгации с помощью четырех антенн аппаратура осуществляла определение дальности и угла пеленга до ведущего ЛА группы.

В телекодовой аппаратуре передачи данных АПД-518 («Радикал-ПД»), совмещенной с аппаратурой определения взаимных координат А-312-ОВК («Радикал-ОВК») [5], работа осуществлялась в одном из двух режимов:

- совмещенном, при котором аппаратура АПД-518 и «Радикал-ОВК» работали по объединённой циклограмме и осуществляли на удалениях до 200 км определение взаимных координат (дальности и пеленга) методами радиопеленгации, а также выполняли передачу каждым абонентом информационного сообщения;

- автономном, в котором аппаратура по автономной циклограмме осуществляла передачу информации между абонентами без определения координат.

Т а б л и ц а 1

Наименование	Год	Режим работы	Дальность действия	Число ЛА	Число бит	Темп обмена
«Радикал»	1977	МСН	300 км	2, 4, 10	–	1,9 - 5,9 с
АПД-518 и А-312-ОВК	1979	Передача данных (ПД)	200 км	4	900	1 с
		МСН с ПД			500	2,40 с
«РТС ОВК»	1988	ОВК с ПД	100 км	4, 8, 12	200	2,44 с
		ПД			500	
«РСБН-ОВК-2000»	2004	МСН	200 км	2	–	160 мс
		ОВК	100 км	4	220	160 мс
				12		480 мс

Аппаратура АПД-518 обеспечивала, совместно с наземной станцией управления взаимодействие объектов типа МиГ-31 в составе до двух звеньев, и позволяла каждой группе из 4 объектов контролировать воздушное пространство протяженностью по фронту от 800 до 900 км [3].

Аппаратура определения взаимных координат «РТС ОВК» [6] осуществляла работу в следующих режимах:

- «прием-передача данных», необходимых для совместимости с аппаратурой предыдущих поколений;

- «определение взаимных координат», позволяющее выполнить определение наклонной дальности, пеленга и угла места на взаимодействующий объект методами обмена координатной информацией в группе до 4, 8 или 12 ЛА.

Режим определения взаимных координат, аналогичный аппаратуре «РТС ОВК», был реализован в следующем поколении аппаратуры – РСБН-ОВК-2000. Информационное взаимодействие в группе до 12 ЛА (трёх звеньев), в отличие от аппаратуры АПД-518 осуществляется на одном уровне без выделения направлений передачи типа «ведущий-ведомый». Помимо этого, в аппаратуре был реализован режим определения взаимных координат, аналогичный реализованному в аппаратуре «Радикал», получивший название «Встреча».

Обобщая, можно выделить следующие основные задачи взаимодействия ЛА, для решения которых предназначена аппаратура определения взаимных координат и передачи данных:

- взаимодействие пары объектов (наиболее востребованный вариант);
- взаимодействие двух пар в составе звена (группы);
- взаимодействие нескольких звеньев в составе объединённой группы.

Взаимодействие может осуществляться как между объектами одного типа (истребителями, перехватчиками), так и в составе смешанного строя или с особыми объектами – топливозаправщиком, воздушным командным пунктом или сопровождаемым объектом.

2 Распределение ресурсов канала информационного обмена

В одном из вариантов построения ЛРТС ОВК, рассмотренного в [7] и предназначенного для решения задач относительной навигации (наблюдения) в некоторой области навигационного пространства, взаимодействие объектов основано на последовательном доступе к единому временному каналу связи, при котором каждый объект осуществляет передачу информационной посылки (ИП) и автономного сигнала синхронизации (АСС) в пределах выделенного ему рабочего интервала (РИ). Полный цикл информационного взаимодействия длительностью $T_0=1$ с разделён на 100 рабочих интервалов длительностью 10 мс, при этом номер интервала соответствует собственному номеру ЛА, выбираемому:

- алгоритмом случайного множественного доступа, характерным для режима ОРН;

- централизованным распределением, что более соответствует режиму ГСВ;

Границы рабочего интервала каждый объект при любом варианте определяет одним из двух способов [7]:

- на уровне глобальной синхронизации – с помощью единой метки времени, формируемой встроенной или бортовой аппаратурой потребителя СРНС с периодом 1 с и погрешностью до 50 нс;

- на уровне автономной синхронизации – по автономным сигналам синхронизации (АСС), передаваемым взаимодействующими абонентами в пределах РИ и выбираемых с помощью алгоритма ранговой синхронизации.

Циклограмма информационного обмена объектов и структура рабочего интервала показаны на рисунке 1.

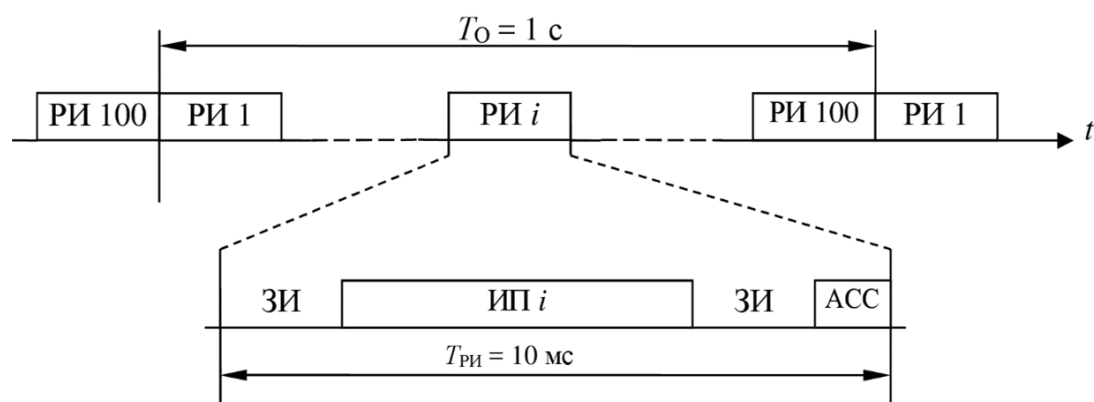


Рисунок 1:

РИ – Рабочий интервал,

ЗИ – Защитный интервал,

ИП – Информационная посылка,

АСС – Автономный сигнал синхронизации

Передаваемая каждым абонентом информация содержит в себе, как минимум, собственные координаты объекта – широту, долготу и высоту в некоторой общепринятой системе координат (например, ПЗ-90), используя которые взаимодействующий ЛА расчётным способом определяет относительные координаты взаимодействующего

объекта – дальность, пеленг и угол места. Помимо координат в передаваемую информацию включаются составляющие скоростей движения объекта – северная, восточная и вертикальная, необходимые для качественной работы фильтров координатной информации, реализованных в аппаратуре.

Исходя из этого, можно определить минимальный объем координатной информации, необходимый для решения задач ОВК, который будет составлять [8]:

- для широты и долготы – 25 и 24 бита информации соответственно;
- для высоты – 14 бит;
- для северной и восточной составляющих скоростей – 12 бит;
- для вертикальной скорости – 10 бит информации;
- для идентификатора объекта – 27 бит,

всего при этом получится 124 бита информации, что составляет всего лишь 12,4 % от объема ИП. Даже с учетом возможной передачи в навигационной части информационного сообщения дополнительных данных, таких как собственный номер ЛА (не более 7 бит для группы 100), истинный курс и крен объекта (по 16 бит), оценку точности собственных координат (9 бит) и т.п., оставшийся объем информации будет составлять порядка от 800 до 850 бит, что несколько меньше, чем в аппаратуре типа АПД-518, но значительно больше, чем в системах определения взаимных координат типа «РТС ОВК» и аппаратуре последующих поколений. Таким образом реализуется первый вариант расширения функций ЛРТС ОВК, позволяющий осуществить передачу дополнительной информации по линии «борт-борт», например, по аналогии с системой связи ТКС-2 [3]: заданного курса, скорости и высоты полёта цели, дальности «истребитель-цель», скорости сближения с целью, азимута и угла места цели, разовых команд наведения и т.п. В целом, объем передаваемой тактической информации можно считать сопоставимым с объемом информации навигационной, передаваемой аппаратурой в режиме «ОВК», при этом тактическая информация имеет меньшие требования к темпу обновления, который зачастую составляет от 5 до 10 с [3].

3 Период обновления информации в различных группах ЛА

При осуществлении информационного обмена в радионавигационной сети критериями оценки её работы могут выступать: вероятность правильного приёма одного бита при заданном соотношении «сигнал/шум» или среднее число ошибок на один информационный пакет (FER – *frame error rate*) [8]. Кроме этого, для оценки качества радионавигационной сети можно ввести критерий, определяющий *своевременность* доставки до абонента навигационной информации о взаимодействующем ЛА, координаты которого в общем случае непрерывно изменяются. Численно своевременность можно выразить через вероятность P_E , с которой координатная информация будет доставлена потребителю за интервал времени не превышающий максимально допустимого время обновления информации $T_{Ои}$, заданное в системе. Например, если $T_{Ои} = 6$ с, а цикл информационного обмена имеет длительность $T_0 = 1$ с, то, при заданной величине FER , равной $p_F = 10^{-3}$, прием хотя бы одного сообщения за время 6 секунд будет осуществляться практически достоверно, с вероятностью

$$p_E = 1 - p_F^6 = 1 - 10^{-18} \approx 1, \quad (1)$$

где p_F – вероятность пропуска информационного пакета.

Высокая вероятность правильного приёма даже одного информационного пакета позволяет ожидать высокий темп обновления информации, соответствующий длительности цикла обмена 1 секунда, и близкий к периоду обновления, необходимому для решения задач группового самолётовождения маневрирующих объектов, движение которых с достаточной точностью описывается моделью третьего порядка с экспоненциально-коррелированным ускорением [9]

$$r(\tau) = \sigma_M^2 \cdot e^{-\alpha|\tau|}, \quad (2)$$

где σ_M – интенсивность манёвра,

$\alpha = 1/t_M$ – величина, обратная постоянной времени манёвра.

Если период обновления $T_{Ои}$ удовлетворяет условию

$$\alpha \cdot T_{Ои} < 1/2, \quad (3)$$

то процесс движения ЛА в пределах периода обновления можно полагать линейным и оценивать с достаточной точностью [10], при этом, для интенсивно маневрирующих ЛА со временем манёвра до 20 с, наибольшее значение периода обновления будет составлять $T_{Ои} \leq T_{\max} = 0,5$ с.

Уменьшение периода информационного обмена в первую очередь зависит от тактики групповых действий авиации, а именно – от числа ЛА, для которого требуется обеспечить единое информационно-коммуникационное пространство (ЕИКП) [11]. Если принять неизменной структуру рабочего интервала одного абонента (рисунок 1) с длительностью $T_{ри} = 10$ мс, то в зависимости от количества N в группе период обмена $T_о$, совпадающий с периодом обновления информации $T_{Ои}$, будет определяться простой формулой: $T_о = N \cdot T_{ри}$, пример расчёта по которой приведён в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, информационное взаимодействие в малых группах ЛА может быть организовано с весьма высоким темпом обновления, значительно превышающим возможности предшествующих систем, что позволяет, при наличии соответствующей потребности несколько снизить результирующий темп информационного обмена, но при этом увеличить объем передаваемой информации, зарезервировав каждому абоненту не один, а два и более рабочих интервалов, увеличив в соответствующее количество раз объем передаваемой абонентом информации.

Простое сокращение длительности циклограммы информационного обмена $T_о$ за счёт уменьшения максимального числа взаимодействующих объектов теоретически позволяет достигнуть требуемой величины $T_{\max} = 0,5$ с, однако результирующая вероятность p_E может быть несколько ниже по причинам, представленным далее.

Т а б л и ц а 2

Конфигурация ЛА (число ЛА)	Период обмена, мс	Организационная структура
Пара (2)	20	Пара
Звено (4)	40	Звено
Два звена + АК ДРЛО (9)	90	Эскадрилья (различных типов)
Группа 12 ЛА	120	
Четыре звена (16)	160	
Группа 24 ЛА	240	Полк
Группа 36 ЛА	360	

4 Влияние процессов синхронизации на условия работы группы ЛА

Надежность канала связи при взаимодействии по линии «борт-борт» применительно к пространственно-распределённой группе абонентов в большей степени характеризует их работу в установившемся режиме взаимодействия, когда граф связей между объектами остаётся неизменным в течение некоторого времени. В случае изменения структуры связей между объектами в группе, работающей на автономном уровне синхронизации, могут происходить процессы реконфигурации [12], приводящие к формированию новой структуры передачи эталонного времени. Однако ни перестройка внутри такой группы, ни даже выход из неё некоторого числа абонентов практически не оказывают существенного влияния на взаимное соотношение шкал времени абонентов, поскольку они уже имеют синхронизацию между собой, вследствие чего процессы повторной синхронизации будут состоять в логическом переопределении рангов абонентов, а не в физической подстройке ими своих шкал времени. Наихудшим случаем является вхождение в состав группы нового объекта с несинхронизированной шкалой времени, который, при наличии у него наивысшего ранга, может запустить в группе процессы физической подстройки другими объектами своих шкал времени под его шкалу. Здесь следует отметить, что синхронность шкал времени двух абонентов означает, что моменты начала этих шкал отличаются на некоторую величину Δt , не превосходящую величины защитного интервала $t_{зи}$, предусмотренного в рабочем интервале для разделения сигналов смежных абонентов. Величина $t_{зи}$ определяется задержкой распространения сигналов на максимальную дальность действия $D_{\max}$

$$t_{зи} \geq D_{\max}/c = 0,333 \text{ мс}, \quad (4)$$

где $c=3 \cdot 10^8$ м/с.

Поскольку момент начала автономной шкалы времени присоединяющегося абонента можно полагать случайной величиной, равномерно распределённой на интервале $[0; T_0]$, вероятность того, что $\Delta t \leq t_{зи}$ будет составлять

$$p = t_{зи}/T_0 = 3,33 \cdot 10^{-4}, \quad (5)$$

где $T_0=1$ с.

Отсюда, с вероятностью $q=1-p \approx 1$ подстройка шкал времени абонентов группы будет осуществляться на величину, превышающую длительность защитного интервала, при этом на каждом шаге подстройки смещение начала шкалы времени объекта будет приводить к потере взаимодействия с теми объектами, которые ещё не выполнили процедуру подстройки. Поскольку абоненты ЛРТС ОВК работают с временным разделением, «выпадение» информационной посылки одного абонента за границы соответствующего ей рабочего интервала на шкале времени другого абонента будет приводить к отсутствию гарантированного приёма до завершения процедуры синхронизации на данном участке цепи передачи эталонного времени. При этом приём и обнаружение сигналов синхронизации, передаваемых абонентом в конце своего рабочего интервала для обеспечения синхронного приёма информационных посылок, осуществляется в асинхронном режиме, что позволяет выполнить процедуру физической синхронизации шкал времени абонентов.

Для пояснения на рисунке 2 представлен пример, на котором показано присоединение нового глобального синхронизатора (ГС) с условным номером «1» к существующей группе из трех объектов «2»-«4».

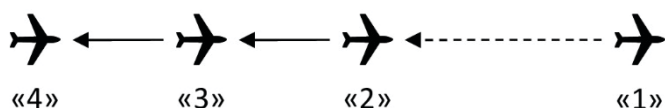


Рисунок 2

Абонент «2» на первом шаге синхронизации, произведя подстройку своей шкалы под шкалу абонента «1», потеряет взаимодействие с абонентом «3», который, осуществив коррекцию своей шкалы на втором шаге, вновь войдет в устойчивое взаимодействие с абонентом «2», но при этом будет нарушен информационный обмен между абонентами «3» и «4», после чего на третьем шаге синхронизации абонент «4» выполнит коррекцию своей шкалы времени и переходный процесс в сети завершится. В общем виде максимально возможное время переходного процесса $T_{\text{пп}}$ в сети из N абонентов, имеющих наихудшую конфигурацию взаимного расположения в виде цепи «1» ↔ «2» ↔ ... ↔ «N», определяется количеством шагов ретрансляции эталонного времени L_{max} от присоединившегося абонента с наивысшим рангом до наиболее удалённого абонента, а также длительностью цикла информационного обмена T_0

$$T_{\text{пп}} = L_{\text{max}} \cdot T_0. \quad (6)$$

Для цепи из $N = N_{\text{max}}$ абонентов количество шагов ретрансляции $L_{\text{max}} \leq N - 1$, а период информационного обмена $T_0 = N_{\text{max}} \cdot T_{\text{ри}}$, откуда можно определить максимально допустимое количество абонентов в группе, при котором длительность переходных процессов в наихудшей пространственной конфигурации (цепи) будет удовлетворять условию

$$T_{\text{пп}} \leq T_{\text{max}} = 0,5 \text{ с}. \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) при длительности рабочего интервала $T_{\text{ри}} = 10$ мс получаем

$$N \cdot (N - 1) \leq T_{\text{max}} / T_{\text{ри}} = 50, \quad (8)$$

где N – количество взаимодействующих ЛА, откуда максимально допустимое число взаимодействующих объектов будет составлять

$$N \leq 7. \quad (9)$$

Выполнение условия $L_{\text{max}} \leq N - 1$ в сети абонентов будет осуществляться при использовании в алгоритмах ранговой синхронизации соответствующих функций определения ранга [13], для чего необходимо включение в существующую структуру сигнала автономной синхронизации, содержащего информацию о собственном номере, номере первичного синхронизатора и уровне синхронизма (глобальном или автономном), дополнительного ранжирующего признака «удаленность от глобального синхронизатора». В ином случае, переходный процесс в сети может увеличиться на величину $N_{\text{max}}/2$, определяемую периодом «пересинхронизации» абонента, реализованного в аппаратуре [8].

Строгое условие (7) весьма существенно ограничивает число взаимодействующих ЛА в группе. Это число может быть увеличено, если принять во внимание, что даже в течение переходного процесса в сети информационный обмен между некото-

рым абонентом n_i , удалённом от ГС на L_i шагов ретрансляции, и всеми его «соседями» (например – абонентом «3» и абонентами «2» и «4» на рисунке 2) возобновится, когда волна передачи эталонного времени пройдёт через абонентов с удалениями L_i+1 , L_i , L_i-1 , что произойдет за время, не превышающее $3T_0$. Отсюда можно сформулировать менее строгое условие работы системы, допускающее пропуск двух циклов информационного обмена при одном успешном сеансе связи

$$T_{\text{ОИ}} = 3 \cdot T_0 = 3 \cdot N \cdot T_{\text{РИ}} \leq T_{\text{max}}, \quad (10)$$

где N – число взаимодействующих ЛА,

T_0 – длительность цикла информационного обмена,

$T_{\text{РИ}}$ – длительность рабочего интервала, откуда максимально допустимое число взаимодействующих объектов будет составлять

$$N \leq 16. \quad (11)$$

В результате, на интервале времени T_{max} , содержащем три цикла обмена, даже при наличии переходного процесса в сети, абонент n_i будет осуществлять успешную передачу навигационной и тактической информации с вероятностью:

$$p_E = 1 - p_F^3 = 1 - 10^{-9} \approx 1, \quad (12)$$

где p_F – вероятность пропуска информационного пакета, что позволит с достаточным качеством осуществлять определение взаимных координат в пределах требуемого интервала обновления T_{max} .

Передача оставшихся $I=800$ бит тактической информации при синхронизации между любой парой ЛА будет прерываться только на одном цикле информационного взаимодействия длительностью $T_0 = N \cdot T_{\text{РИ}} = 160$ мс, откуда, используя ее простое дублирование в двух смежных циклах, можно обеспечить с вероятностью $p_E=10^{-3}$ общую скорость передачи информации каждым ЛА

$$R = \frac{I}{2 \cdot T_0} = \frac{800}{2 \cdot 0.16} = 2,44 \text{ кбит/с}, \quad (13)$$

где I – объем передаваемой информации,

T_0 – период информационного обмена.

Результирующая скорость не будет зависеть от наличия переходных процессов синхронизации в сети.

Дальнейшее увеличение числа взаимодействующих ЛА в группе, при некотором снижении скорости передачи информации, возможно осуществить с учетом наличия в аппаратуре абонентов ЛРТС ОВК вторичной обработки координатной информации. Как было указано выше, рассмотрение движения взаимодействующих ЛА как случайных процессов с корреляционной функцией вида (2) позволяет формировать достаточно точную оценку координат линейно движущегося объекта, которая в аппаратуре выполняется с помощью α - β -алгоритма фильтрации, с параметрами $\alpha=0,125$ и $\beta=0,08$ [8].

В практике группового самолётоводения исходные погрешности измерения абсолютных координат объектов определяют минимальное расстояние d_{min} между парой самолётов, выполняющих полёт в строю

$$d_{\min} \geq 3 \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (14)$$

где σ_1, σ_2 – погрешности определения собственных координат объектов 1 и 2.

Для простоты расчётов полагая $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_a$, можно в зависимости от величины $d_{\min}$ рассчитать требования к погрешности определения абсолютных координат $\sigma_{\max}$, приведенных в таблице 3 [14].

Требуемая точность определения абсолютных координат каждым объектом может быть достигнута при использовании аппаратурой координатной информации бортового комплекса ориентации и навигации (КОН), имеющего значения погрешности σ_a [15]:

- от 10 до 15 м для КОН среднего класса точности, типичного для истребителей и штурмовиков;

- от 5 до 10 м для КОН высокого класса точности, типичного для самолётов стратегической и магистральной авиации.

Т а б л и ц а 3

Тип группы		В паре самолетов	В звене между парами	В эскадрилье между звеньями
Размеры сомкнутого боевого порядка, $d_{\min}$, м	от	120	350	800
	до	150	500	1000
Погрешность определения абсолютных координат, $\sigma_{\max}$, м	от	28	83	188
	до	35	118	235

Имеющийся запас по точности определения координат $\sigma_a < \sigma_{\max}$ позволяет заложить в систему допустимую динамическую погрешность одношаговой экстраполяции оцениваемой координаты σ_g , вызванную наличием у объекта ненулевого ускорения g_M , которое, как было указано выше, при линейном движения ЛА полагается нулевым и в алгоритме фильтрации не учитывается. Величина σ_g определяется [15] как

$$\sigma_g = g_M T_g^2 / \beta, \quad (15)$$

где T_g – интервал экстраполяции,

g_M – ускорение ЛА,

β – коэффициент оптимального фильтра,

при этом $\sigma_g^2 + \sigma_a^2 \leq \sigma_{\max}^2$, откуда

$$T_g^2 \leq \beta (\sigma_{\max}^2 - \sigma_a^2) / g_M, \quad (16)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимально допустимая погрешность определения относительных координат,

σ_a – погрешность определения абсолютных координат объектов.

С учетом того, что относительное ускорение между объектами, следующими в паре или звене, обычно существенно меньше максимальной эксплуатационной перегрузки самолётов, достигающей (4,5-7) g и составляет порядка (0,5-1,5) g , где $g=9,81 \text{ м/с}^2$, для наиболее плотного строя с параметрами $\sigma_{\max}=28 \text{ м}$, $\sigma_a=15 \text{ м}$, $g_M=1,5g=14,7 \text{ м/с}^2$, для экстраполяции координат после одного пропущенного цикла

($T_0 = 2T_0$) получаем

$$T_0 \leq \frac{1}{4} \sqrt{\beta(\sigma_{\max}^2 - \sigma_a^2) / g_M} = 0,43 \text{ с}, \quad (17)$$

Отсюда получаем максимальное число ЛА в группе

$$N \leq T_0 / N_{\text{PI}} = 43. \quad (18)$$

Оценка, проведённая по формулам (14) – (17), является упрощённой и требует более точного расчёта при более строгом задании величин кратковременной погрешности формирования абсолютных координат объектов (σ_a), а также параметров относительного маневрирования между объектами в строю (g_M), однако, в первом приближении, формулы (11) и (17) можно полагать нижней и верхней границей оценки соответственно. Для самой большой из рассматриваемых конфигураций ЛА – группы из $N = 36$ объектов темп передачи информации аналогично выражению (12) будет составлять

$$R = \frac{I}{2 \cdot T_0} = \frac{800}{2 \cdot 0,36} = 1,08 \text{ кбит/с}. \quad (19)$$

Выводы

Рассмотренные варианты организации взаимодействия группы ЛА показывают следующие возможности расширения функций ЛРТС ОВК:

1 Выполнение задач группового самолётовождения может быть организовано в группе от 2 до 36 ЛА с соблюдением требований к допустимой погрешности определения местоположения объектов.

2 Для наибольшей группы из $N=36$ объектов может быть организовано общее навигационное пространство, размеры которого, при последовательном расположении ЛА в виде цепи на максимальном удалении $D_{\max}=100$ км, могут достигать $(N - 1) D_{\max}=3500$ км. При этом отсутствие непосредственной связи между глобальным синхронизатором и каким-либо из объектов не оказывает существенного влияния на работоспособность системы и устойчивость информационного обмена при наличии процессов синхронизации в сети.

3 Передачу дополнительной информации через радиоканал можно осуществлять со скоростью 1,08 кбит/с, при необходимости выполняя резервирование передаваемых данных, не требующих высокого темпа обновления.

Литература

- 1 Бабуров В.И., Пономаренко Б.В.. Принципы интегрированной бортовой авионики. – СПб: Издательство «Агентство «РДК-Принт», 2005. – 448 с.
- 2 Король В.М., Шатраков Ю.Г. Основы радионавигации: учебное пособие. – СПб.: ГУАП, 2011. – 106 с.
- 3 Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под ред. Е.А.Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 816 с.
- 4 Герчиков А.Г., Липаков Н.Е., Орлов В.К. Организация ранговой синхронизации в локальных радиотехнических системах межсамолетной навигации // Вестник концерна ПВО «Алмаз – Антей». – 2014. – № 2(5). – С. 102-108.

5 Разработка бортовой аппаратура ближней навигации и посадки самолётов. Материалы технического проекта ОКР «Радикал» – ВНИИРА, 1970.

6 Единая радиотехническая система определения взаимных координат. Материалы технического проекта – ВНИИРА, 1986.

7 Орлов В.К., Липаков Н.Е., Рамаданов В.С., Шанин Е.Г. Синхронизация и многостанционный доступ в локальных радиотехнических системах относительной навигации. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – 129 с.

8 Орлов В.К., Герчиков А.Г., Чернявский А.Г. Локальные радиотехнические системы межсамолётной навигации. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 123 с.

9 Радиотехнические системы // Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.

10 Иванов П.Е., Наливайко Д.А. Алгоритмы фильтрации координат с обменом данными в интегрированных системах навигации // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОВР. – 1990. – Вып. 5.

11 Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. – М.:Издательский Дом «Наука», 2013. – 168 с.

12 Липаков Н.Е. Применение единого точного времени в системе ранговой синхронизации подвижных абонентов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2016. – Вып. 3. – С. 54-62.

13 Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. – М.: Связь, 1972. – 272 с.

14 Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.

15 Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.

16 Баушев С.В., Липаков Н.Е. Формализованное описание навигационного обеспечения групп летательных аппаратов с использованием вторичного навигационного поля // Радионавигация и время. – 2020. – № 6(14). – С. 118-126.

Липаков Николай Евгеньевич – Аспирант, АО «Всероссийский НИИ Радиоаппаратуры», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: самолетовождение, радионавигация.

Email: cluster.szrc@dsszrc.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

ORGANIZATION OF INTERACTION NETWORK OF AIRCRAFT GROUP WITH INTER-AIRCRAFT NAVIGATION ON-BOARD EQUIPMENT

The directions of organizing a distributed network of information exchange in a group of aircraft using unified on-board equipment for determining mutual coordinates are viewed. The maximum volume of the group filling is estimated, for which the tasks of group navigation can be solved with the specified accuracy of determining the mutual coordinates and the rate of information update.

Keywords: aircraft, group flight, mutual coordinates, air navigation problem, relative navigation.

Lipakov Nikolay Evgenievich – postgraduate student, JSC “VNIIRA”, St.Petersburg city.

Research interests: aircraft navigation, radio navigation.