

УДК-629.7.017.1+519.852

Автоматическое управление безопасным движением строя самолетов с виртуальным ведущим.

Рыбников С.И., Степаньянц Г.А, Фомичев И. Д.

Рассматривается проблема автоматического управления движением строя пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Обсуждаются принципы построения и структура систем управления строем. Предлагается метод виртуального ведущего для организации систем. Приводятся примеры систем управления относительным положением объектов и предотвращения их опасного сближения.

Ключевые слова: строй; группа; самолет; ведущий; ведомый; управление; система.

Введение

Кратко обсуждаются принципы построения и структура систем автоматического управления строем пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (ЛА). Несмотря на значительные результаты в области автоматического управления движением комплексов ЛА, актуальны работы по формированию алгоритмов управления, разработке структуры и исследованию динамики систем управления этими комплексами.

Объектом управления здесь является строй ЛА одного и того же или различных классов, имеющий вид потока одиночных объектов или их звеньев. Основные этапы полета строя самолетов: сбор на круге или на маршруте, движение по маршруту, облет препятствий, иное совместное маневрирование, роспуск. Задачи и этапы полета строя зависят от его назначения. Для строя беспилотных летательных аппаратов (БЛА) боевого назначения актуальны задачи маневрирования на подходе к зоне операции и уходе от нее, при выполнении операции.

На выбор метода управления полетом строя на различных этапах его движения влияют многочисленные условия, среди которых: вид и плотность строя; располагаемая априорная и рабочая информация для управления; ограничения на относительное положение объектов в строю, в частности, требование практически гарантированного расположения каждого ЛА в эллипсоиде безопасности; требуемая точность управления абсолютным и относительным положением объектов в строю; допустимые потери скорости строя, по сравнению со скоростью полета одиночного объекта, а также допустимый дополнительный расход топлива объектов, входящих в строй, по сравнению со случаем их автономного полета; требования к экологичности строя, к скрытности строя боевого назначения в радиодиапазоне; вытекающие из частных условий критерии оптимальности управления строем и применяемые методы оптимизации.

В зависимости от расстояний между объектами в строю, можно выделить три основных вида строя: сомкнутый (плотный) строй, в котором дистанция между объектами может составлять 3-6 единиц их характерных размеров L (размах крыла или длину фюзеляжа), а интервал и превышение – 1-2 единицы; разомкнутый строй (средней плотности), в котором расстояния между объектами на порядок превышают характерные размеры объектов; рассредоточенный (редкий) строй, в котором расстояния между объектами превышают характерные размеры объектов на два порядка; комбинированный строй, например, рассредоточенный строй звеньев, каждое из которых представляет собой сомкнутый строй одиночных объектов.

В конкретных случаях численные требования к точности измерения относительного положения объектов в строю и управления им должны быть заданы заказчиком работ. Можно предположить, что в случае сомкнутого строя допустимая среднеквадратическая погрешность обработки заданной дистанции составит порядка 0,5-1 значения характерной длины, превышения и интервала - порядка 0,1 – 0,2 характерной длины. Для совместного и одновременного выполнения специальных задач объектами эти допуски могут быть уменьшены.

1. Рабочая информация для управления строем

Системы сбора, переработки информации, навигации и управления БЛА должны строиться как интегрированные системы навигации и управления полетом и всеми функциями БЛА, включая получение необходимой информации о параметрах строя БЛА и управление строем.

Традиционное измерение относительного положения летательных аппаратов, например ведомого относительно ведущего или наоборот, выполняется радиолокационными системами (РЛС) в полярной антенной системе координат. Обычно измеряются дальность до ведущего ЛА и углы его пеленга в одной (двух) плоскостях, пересчитываемые при необходимости в декартовы координаты ведущего в системе ведомого: дистанцию, интервал (и превышение). При наличии информационного обмена между объектами источником информации об относительном положении объектов могут служить их инерциальные навигационные системы (ИНС), в случае, когда разность координат объектов периодически корректируется показаниями РЛС. При этом среднеквадратические погрешности информационной системы несколько выше, чем при непрерывных радиолокационных определениях, но выше также ее помехозащищенность и скрытность применения. Значительная масса и энергоемкость радиолокационных систем не позволяют применить их на малых летательных аппаратах. Для плотного строя информация об относительном положении двух объектов с дециметровой точностью может быть получена оптической квантовой дальномерно-угломерной системой с гиостабилизированным координатором.

Основным современным и наиболее перспективным средством межсамолетной и иной межобъектовой навигации является сочетание инерциальных навигационных систем, для БЛА – бесплатформенных (БИНС), со спутниковыми навигационными системами (СНС) /1/. БИНС, корректируемая СНС и скомплексированная с ней, обеспечивает систему управления рабочей информацией о навигационных параметрах БЛА (координатах, высоте полета, составляющих вектора скорости). Разность навигационных параметров, определенных на борту ведущего и ведомого

объектов, пересчитывается в параметры положения ведомого в строю: дистанцию, интервал, превышение. Для повышения точности спутниковых навигационных измерений применяется дифференциальный режим. Для целей высокоточной межобъектовой навигации необходима достаточно точная численная информация о зависимости погрешностей указанных относительных измерений от определяющих их факторов, в числе которых: географические координаты работы строя и его параметры, состав и форма рабочего созвездия спутников, расположение строя относительно созвездия, состояние соответствующего участка атмосферы и т.п. Получение такой информации возможно лишь при организации специальных исследований.

2. Способы управления строем.

Итак, комплексная информационная система, предназначенная для измерения относительного положения и относительной скорости двух объектов, в современном варианте включает в себя взаимосвязанные бортовые информационные системы, содержащие скомплексированные БИНС и СНС. Эта система с достаточной для управления точностью, в высокоточных случаях - со среднеквадратической погрешностью порядка первых единиц метров, оценивает разности координат и скоростей объектов и преобразует их в оценки параметров строя – дистанции $\Delta x=d$, интервала $\Delta z=l$, превышения $\Delta y=h$, являющихся управляемыми координатами, а также в оценки их производных – соответствующих скоростей.

Кратко рассмотрим основные способы управления строем БЛА.

В строю ЛА обычно выделяется ведущий, он же – головной, хотя при развитой информационно-управляющей технологии ведущий может располагаться внутри управляемой группы объектов. Требования к системе управления строем формулируются в виде компонент заданного положения каждого объекта относительно ведущего и допусков на эти величины. При традиционных, доспутниковых технологиях измерения относительного положения объектов управление каждым объектом как элементом строя выполняется одним из двух способов: по впередиидущему или по головному объекту.

Простейший (и реализуемый при ручном управлении пилотируемых самолетов) способ управления – по отклонению от положения, определяемого заданными значениями дистанции d , интервала l и превышения h .

При управлении ведомым объектом, выполняемым лишь по отклонению каждого из этих параметров строя от заданного значения, ошибки управления положением каждого впередиидущего объекта входят в ошибки управления каждого последующего, накапливаясь по длине строя, причем динамические ошибки накапливаются в виде нарастания амплитуд колебаний. При полете в строю скорость ведомого объекта колеблется относительно скорости ведущего, и для сохранения строя ведомый должен иметь запас скорости и тяги, по отношению к ведущему. Это ведет к снижению скорости общего движения на несколько процентов на каждое звено ведущий-ведомый, в итоге тем большее, чем больше звеньев в цепи ведомых.

При управлении каждым объектом по одному ведущему накопления ошибок не происходит, но для информационного обеспечения системы управления требуется более развитая

информационная система, с повышенной надежностью измеряющая координаты каждого объекта относительно ведущего.

Управление рассредоточенным строем мало отличается от управления одиночными объектами и, во избежание указанного колебательного нарастания ошибок вдоль строя, может выполняться как программное, по координированным программам, с обратными связями по положению каждого объекта, определяемого БИНС, корректируемой СНС. Такое управление позволит обеспечить обработку заданного программного положения объекта с погрешностями, в основном определяющимися погрешностями измерения положения.

Традиционные виды управляемых строев и обеспечивающие их управление информационные технологии взаимосвязаны. Эти технологии в основном адаптированы к управлению движением строев вида клина, ромба, пеленга, кильватера, потока или колонны и их комбинаций, таких как колонна пеленгов звеньев и т.п. Значительные особенности вносят в методологию управления строем и необходимое информационное обеспечение условия маловысотного полета. Здесь возникают задачи облета, обхода, комбинированного преодоления препятствий, усложняющиеся в условиях недостатка тяги двигателей для поддержания постоянной скорости полета, местных воздушных течений, пониженного количества исходной информации и повышенного уровня возмущающих воздействий, меняющегося с высотой влияния экранного эффекта. Комбинированные, инерциальные и спутниковые технологии измерения географических и относительных координат объектов, включающие в себя межобъектовый информационный обмен, позволяют расширить область применения координированного программного управления объектами. Эти технологии позволяют реализовать управление уже не строями в традиционном их понимании, а группами объектов, имеющими любую конфигурацию, в том числе переменную, движущимися произвольным образом, в рамках ограничений по энергетике объектов и безопасности их полетов (как внутренней, так и внешней). Инструментом представления информации о заданном и фактическом положении и движении группы, формирования управления может служить многослойная нейронная сеть. Для управления сложным строем, возможно, переменной конфигурации, может быть полезен метод управления по виртуальному, расчетному ведущему, оптимально задающему движение целевого строя и являющегося началом отсчета для управления положением и движением объектов в строю. Такой отсчет от виртуального ведущего может производиться только для положения центра масс ведущих или же и для положения центра масс, и для углового положения. Виртуальный ведущий может быть организован как несколько скорректированный комплекс фазовых координат материального ведущего или же как полностью расчетная движущаяся точка и связанная с ней система координат. В частности, если на ведущий объект не возлагается разведывательных функций, таких как разведка ветра, подстилающего рельефа и т.п., то для минимизации ошибок управления в качестве виртуального ведущего может рассматриваться центр масс группы. В этом случае дистанции и превышения имеют знак.

3. Структура некоторых систем управления относительным положением объектов в группе.

Рациональный во многих случаях комбинированный способ управления движением объектов, составляющих строй, включает в себя программное управление вектором скорости каждого объекта $V_i(t)$ по координированным программам, а также управление по отклонению дистанции d , интервала l и превышения h относительно ведущего от их заданных значений, дополняемое управлением по производным. В простейшем случае программа полета ведомого $V_i(t)$ повторяет программу полета ведущего $V_e(t)$ с временным сдвигом $\tau_i = d_i / V_{x \text{ средн.}}$, $V_i(t) = V_e(t - \tau_i)$.

При переменной скорости полета программа должна строиться в функции пройденного пути X с учетом отставания ведомого от ведущего, $V_i(X) = V_e(X - d_i)$. При полете с автоматом тяги путевая скорость примерно постоянна при наличии достаточного запаса тяги на совершение маневров. При ограничении же и стабилизации рабочей мощности двигателей и небольших вариациях высоты полета H относительно стабильна характеристическая скорость, путевая же меняется с высотой.

В математические модели систем управления строем входит описание кинематики относительного движения пар объектов «ведущий (1) - ведомый (2)». В первом приближении относительное движение объектов 1 и 2 рассматривается лишь как поступательное. Его кинематика может быть описана уравнениями в проекциях скоростей объектов, в прямоугольной декартовой системе координат, начало которой совмещено с одним из объектов. В случае управления перелетом группы самолетов ось x , направленная горизонтально, лежит в вертикальной плоскости заданного «невозмущенного» направления его полета, ось y направлена вверх по местной вертикали, ось z дополняет систему координат до правой тройки. Принимая направляющие углы малыми, их синусы - равными углам, косинусы - по модулю равными единице, в пренебрежении малыми нелинейными вариациями проекций скоростей, в малых отклонениях от установившегося движения со скоростью v_0 , кинематические уравнения в форме Лапласа для переменных можно записать как связь относительных координат и скоростей. Например, в системе координат ведущего объекта кинематические уравнения имеют вид:

$$s\Delta x = s d_{12}(s) = v_{x1}(s) - v_{x2}(s),$$

$$s\Delta z = s l_{12}(s) = -v_0(\Psi_1 - \Psi_2) = -v_0((\Psi_1 - \beta_1) - (\Psi_2 - \beta_2)),$$

$$s\Delta y = s h_{12}(s) = v_0(\Theta_1 - \Theta_2) = v_0((\theta_1 - \alpha_1) - (\theta_2 - \alpha_2)).$$

Такой выбор начала отсчета предпочтителен при управлении относительным положением объектов с воздействием преимущественно на ведомый ЛА. Если рассматривать управление «ведомым» как его наведение на «ведущего», то можно констатировать, что «цель» здесь является кооперированной и при некоторых методах наведения может участвовать в маневрировании в интересах управления относительным положением объектов.

В случае, когда управляемыми координатами систем стабилизации БЛА являются нормальные избыточные и бинормальные перегрузки, Δn_{y1} и Δn_{y2} , соответствующие кинематическим уравнениям кинематические звенья становятся дважды интегрирующими. Например, второе уравнение приобретает вид: $s^2 \Delta z = s^2 l_{12}(s) = g(n_{z1} - n_{z2})$.

Приведем структурные схемы локальных систем управления параметрами относительного положения двух объектов для случая, когда управление скоростью их полета выполняется

автоматами тяги, управление продольным угловым движением – каналами их рулей высоты, управление боковым движением центров масс – с использованием исполнительных систем управления углами крена.

Обобщение систем управления, имеющих традиционную структуру, позволят в автоматическом режиме решать традиционные же задачи управления движением строя БЛА любой применяющейся конфигурации, в частности, с использованием метода виртуального ведущего. Современные информационные и управляющие цифровые технологии позволяют существенно расширить область решаемых задач управления строем, по существу перейдя к автоматическому управлению движением многоцелевого комплекса БЛА. Укрупненная структура возможной системы управления комплексом БЛА приведена на рис.1, где показаны во взаимодействии основные информационные и управляющие устройства системы: бортовые информационные системы БЛА комплекса, основанные на сочетании бесплатформенных инерциальных систем и спутниковых навигационных систем, вычислители относительных скоростей и расположений БЛА, входящих в комплекс, задатчик указанных координат, матрицы ограничений, критериев оптимальности частных систем, вычислитель управляющих сигналов автопилотов и автоматов тяги, собственно бортовые автопилоты и автоматы тяги.

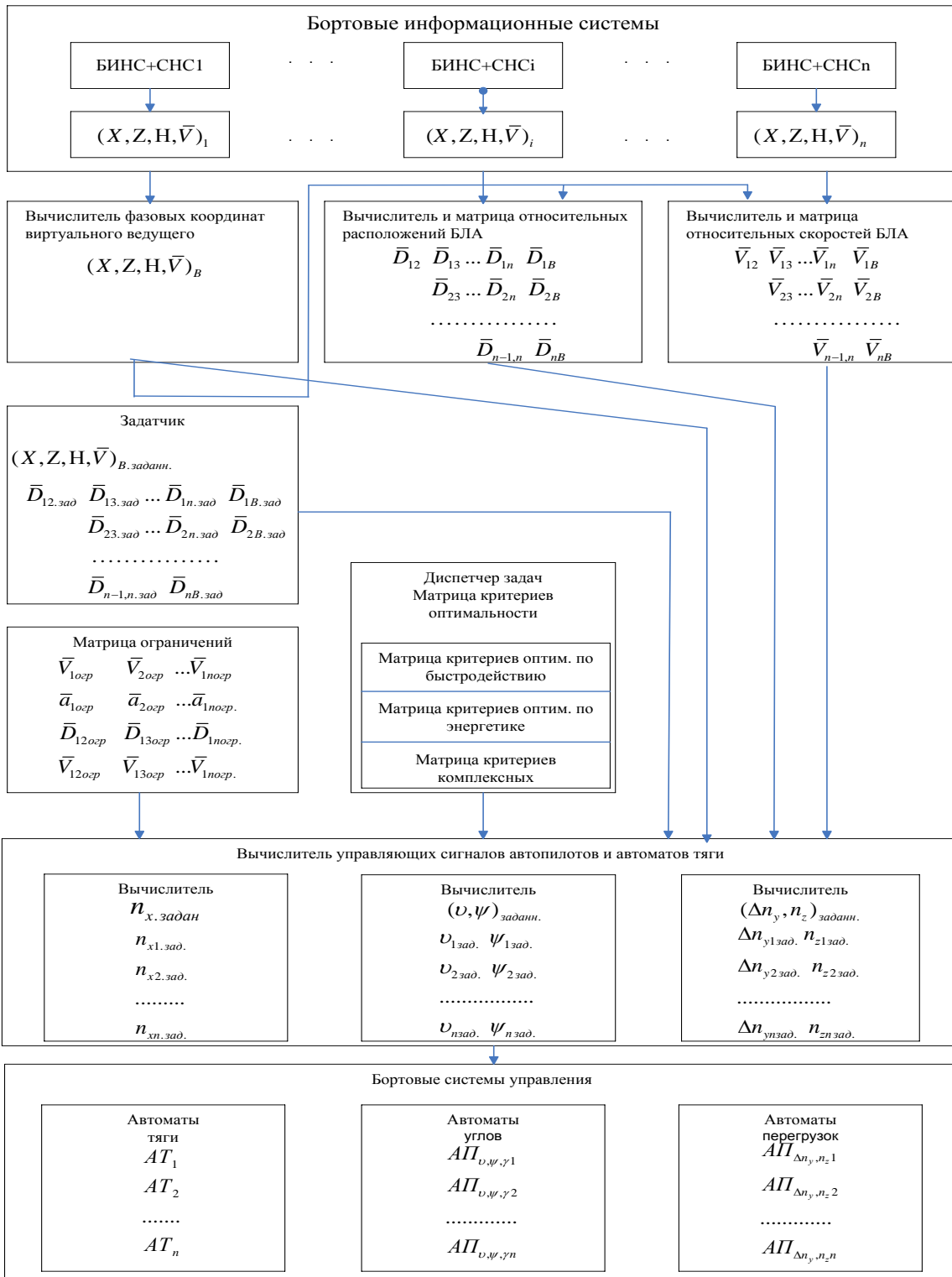


Рис.1.Укрупненная схема системы управления строем ЛА

Система управления скоростью полета двух БЛА, их относительной скоростью и дистанцией, организуемая с программными воздействиями на автоматы тяги обоих объектов и управлением ведомым по отклонению дистанции от заданного значения, иллюстрируется ее структурной схемой (рис.2).

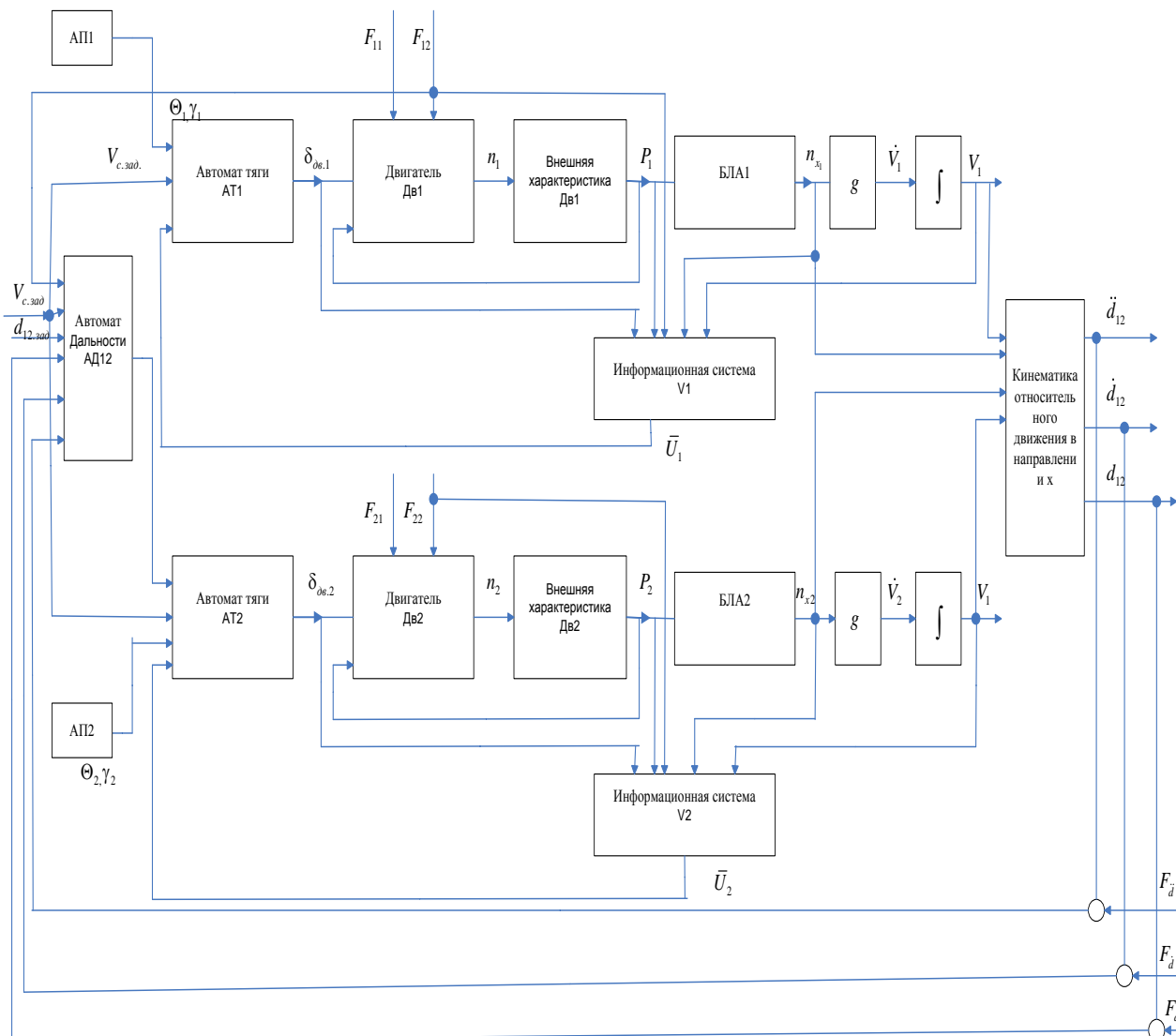


Рис.2. Укрупненная структурная схема системы управления скоростью полета двух БЛА, их относительной скоростью и дистанцией с воздействием по отклонению на тягу двигателей ведомого ЛА.

Каждый из каналов скорости объектов, показанных на схеме, входит в расширенный объект управления. Он включает в себя управляемые маршевые двигатели, обороты $n_{1,2}$ роторов которых в соответствии с внешней характеристикой преобразуются в значения их тяги $P_{1,2}$, собственно беспилотные ЛА с выходными управляемыми продольными перегрузками $n_{x1,2}$ и скоростями полета $V_{x1,2} = V_{1,2}$. Система управления дистанцией d_{12} включает в себя прямые связи по заданной скорости

строя $V_{изад}$, внутренние обратные связи по фазовым координатам частных систем управления тягами двигателей, продольными перегрузками и скоростями полета объектов, замыкаемые через соответствующие частные информационные системы и автоматы тяги, а также внешние обратные связи по управляемой дистанции и, возможно, ее производным. На схеме показано также наличие внешних воздействий F_1, F_2 на двигатели, измеряемые части которых F_{12}, F_{22} могут частично компенсироваться, случайные возмущения f в измерительных цепях (датчики на схеме не показаны), сигналы связи с автопилотами (АП) объектов АП_{1,2}, по которым предполагается передача информации об угловых координатах объектов, влияющих на их скорости полета. Заметим, что описанная структура работоспособна лишь в сочетании с системой управления превышением ведомого над ведущим, в более развитом варианте структуры системы целесообразно связанное управление дистанцией и превышением.

Одна из функций каждой локальной системы – обеспечение безопасного расстояния между объектами. Эта задача решается, во-первых, алгоритмически, например, организацией нелинейного управления по относительному положению объектов, при котором по мере сближения объектов резко увеличивается коэффициент обратной связи в системе, работающей по этому отклонению, при сохранении устойчивости процессов в системе, во-вторых, структурно, организацией в системах отдельных каналов предотвращения опасного сближения объектов.

4. Система предотвращения опасного сближения самолетов

При групповом полете самолетов одной из наиболее важных проблем является проблема обеспечения безопасности (предотвращения опасных сближений) взаимодействующих объектов группы.

Возникновение опасных ситуаций возможно: при потере взаимодействующих объектов из вида в результате нарушений параметров строя при полете ночью и в сложных метеоусловиях; в результате ошибок маневрирования на этапе построения строя, при полете строем при действии по целевым объектам после роспуска единого строя.

Исходной информацией для решения задачи обеспечения безопасности группового самолетовождения (ГСВ) является информация о положении и движении взаимодействующих самолетов в группе.

В качестве устройств для измерения местоположения самолетов в строю наибольшее распространение получили радиолокационные системы. Такие устройства на основе радиотехнического метода измерения дальности до взаимодействующих самолетов, информации межсамолетного обмена (координатная и навигационная информация, высотно-скоростные параметры движения взаимодействующих самолетов), собственных координат и параметров движения оценивают взаимные координаты самолетов группы: дальность до взаимодействующих самолетов D , пеленги φ и углы места β на взаимодействующие самолеты.

В результате решения задачи на борту ведомого самолета должны выявляться *ситуации опасного сближения* с ведущим самолетом, выбираться *направление отворота*, а так же формироваться *условия включения и сигналы управления* для маневрирования.

Выявление ситуаций опасного сближения самолетов возможно выполнять посредством анализа параметров относительного движения:

- отрицательность производной по относительной дальности (самолеты сближаются)

$$\dot{D} < 0 \quad (3)$$

Относительная дальность между самолетами аналитически записывается в следующем виде:

$$\dot{D} = (V_1 - V_2) \cos \varphi - V_1 \sin \varphi (\psi_2 - \psi_1) \quad (4)$$

- при непараллельных курсах и при выполнении первого условия

$$\dot{\varphi} = 0 \quad (5)$$

Условие подразумевает собой движение с выполнением условия параллельного сближения, когда линия визирования с течением времени остается параллельной самой себе.

Скорость изменения угла визирования аналитически выражается формулой:

$$\dot{\varphi} = \frac{(V_2 - V_1) \sin \varphi - V_1 \cos \varphi (\psi_2 - \psi_1)}{\dot{D}} - \dot{\psi}_2 \quad (6)$$

Для исключения опасного сближения, которое складывается при выполнении указанных условий, необходимо формировать условия включения и сигналы управления, которое позволило бы ведомому самолету за счет выполнения специального (расчетного) маневра увода (с фиксированными максимально допустимыми значениями заданного угла крена и/или нормальной перегрузки) выйти в безопасную для ведущего самолета зону.

При выполнении маневра самолет движется по траектории, параметры которой известны (радиус окружности, время, после которого самолет начинает двигаться по ней). Это позволяет выполнить геометрическое построение (рисунок 3), при котором траектория движения ведомого самолета не пересекает зону, являющуюся для ведущего самолета опасной, что, при наличии на борту ведомого самолета информации, которая описана выше как исходная информация для решения задачи безопасности, позволяет рассчитать дальность между самолетами в момент выполнения маневра.

Сравнение текущей дальности и дальности, рассчитанной указанным методом, позволяет сформировать команду переключения (команда «увод») с траекторного управления (предназначенного для выдерживания заданного местоположения) на управление, при котором ведомый самолет выполняет маневр увода.



Рис. 3. Геометрическое построение, используемое для вычисления дальности увода

Отработка алгоритмов обеспечения безопасности полета строем самолетов первоначально должна проводиться на комплексной математической модели, включающей в себя модели самолетов и измерителей их относительного положения в строю, а так же реализующей необходимые взаимосвязи всего комплекса, логику его работы и т.д.

Литература

1. Под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Себрякова. “правление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий”. - М.: Физматлит, 2003.-280 с.
2. В.Г.Тарасов. “Межсамолетная навигация”. - М.: Машиностроение, 1980.-184 с.

Сведения об авторах

Рыбников Сергей Игоревич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., тел.: 8 (499)-158-41 82; e-mail: kaf301@mai.ru

Фомичев Иван Дмитриевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета),тел.: 8(965)397-9669; e-mail: ivan.mai@mail.ru

Степаньянц Георгий Аркадьевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., профессор, тел.: 8 (499)-158-41 82; e-mail: kaf301@mai.ru