

**УДК 629.7.058**

## **ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ГРУПП БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

А.А. Липатов (my-post-box@hotmail.ru)

Д.А. Миляков (from\_fn@mail.ru)

ОАО «Концерн «Вега», Москва

В работе проведён анализ ряда задач управления и информационного обеспечения, возникающих в связи с применением групп беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Рассмотрены способы решения задач оптимального централизованного управления траекторией и пространственным построением группы БЛА, а также выявления таких групп с использованием неопределённой информации количественного и качественного характера.

### **Введение**

За последнее десятилетие интерес к беспилотным летательным аппаратам (БЛА) заметно возрос. По мнению большинства экспертов, БЛА являются наиболее перспективным направлением развития авиации. Это объясняется не только тем, что массовое производство и применение БЛА оказывается дешевле и проще, чем пилотируемых летательных аппаратов (ЛА), но и тем, что некоторые типы БЛА способны решать задачи, недоступные пилотируемым ЛА, к примеру, задачи ближней разведки в условиях плотной городской застройки, в помещениях и т.п. При этом повреждение БЛА в ходе выполнения задачи приводит лишь к финансовым потерям и не угрожает жизни пилота-оператора.

Долгое время БЛА находили только военное применение. При этом принятие в ряде стран концепции бесконтактных сетцентрических войн [Верба 2009] привело к усилению роли БЛА в качестве средств как нападения, так и разведки, и защиты. В этом смысле БЛА должны восприниматься как летающие роботы с относительно высокими показателями автономности, т.е. способные решать ряд задач без непосредственного участия оператора [Каляев и др. 2009].

Однако в последние годы растёт потребность и в БЛА гражданского назначения, например, для мониторинга состояния нефте- и газопроводов,

лесных массивов, водоёмов, сбора метеорологических данных и т.д. Также БЛА находят применение в поисковых и спасательных операциях. Таким образом, развитие БЛА гражданского назначения имеет большие перспективы.

Наиболее важными задачами, решаемыми БЛА как военного, так и гражданского назначения, являются:

- многоспектральный мониторинг местности, под которым понимается её обследование с использованием оптических, инфракрасных, радиолокационных и других датчиков информации;
- картографирование местности;
- формирование мобильных коммуникационных сетей и др.

Решение указанных задач требует перехода от применения одиночных БЛА к использованию групп однотипных и разнотипных БЛА. Это связано с тем, что мониторинг объектов, имеющих большую площадь или протяжённость, для одиночных БЛА является весьма затруднительным. Кроме того, ограничения по массе целевой нагрузки БЛА не позволяют реализовать многоспектральный мониторинг местности с помощью одиночного аппарата. Применение БЛА в экстремальных условиях и, тем более, в условиях организованного противодействия нередко приводит к их повреждению или полному выходу из строя. В случае группового применения БЛА это может затруднить решение поставленной задачи, но не приведёт к прекращению её выполнения.

Кроме того, в условиях конфликта увеличение количества БЛА в группе может приводить к созданию эффекта «роя», при котором их количество превышает пропускную способность средств противодействия [Канащенков и др. 2002], что обеспечивает группе БЛА существенное тактическое преимущество. В связи с этим важной задачей становится автоматическое выявление и сопровождение групп взаимодействующих воздушных объектов (ВО), в частности БЛА.

Необходимо подчеркнуть, что переход к групповому применению БЛА приводит к возникновению ряда специфических задач управленческого и информационного характера.

Среди наиболее сложных задач управления следует отметить:

- задачи траекторного управления группами БЛА, осложнённые большой размерностью моделей состояния и нелинейным ростом размерности алгоритмов управления;
- задачи формирования и поддержания требуемого пространственного построения группы БЛА.

Для информационного обеспечения групповых действий БЛА в условиях конфликта большое значение имеет решение задачи заблаговременного выявления и последующего сопровождения враждебных групп БЛА при возможности проявления эффекта «роя».

Целью настоящего доклада является выявление актуальных задач управления группами БЛА и информационного обеспечения этого процесса, а также рассмотрение и разработка способов решения некоторых из них.

## 1. Задачи управления группами БЛА

Особенностью задач траекторного управления группой БЛА является то, что помимо управления отдельными БЛА необходимо обеспечить согласованность их действий с действиями других БЛА группы.

В настоящее время известны два основных вида стратегий управления группами БЛА [Каляев и др. 2009]: стратегии централизованного и децентрализованного управления, которые имеют ряд разновидностей.

Следует, однако, подчеркнуть, что независимо от способа синтеза управления группой БЛА на основе классической теории оптимального управления необходимо использовать уравнения высокой размерности, а в качестве критериев оптимальности — минимум квадратичных функционалов качества с высокоразмерными матрицами штрафов за точность управления и расход энергии управляющих сигналов.

Эти особенности приводят к тому, что в процессе формирования сигналов управления группой БЛА необходимо совместно решать системы уравнений очень высокой размерности. Это явление, известное как «проклятие размерности» [Ройтенберг 1992], затрудняет использование классических алгоритмов оптимизации (в постановке Летова-Калмана, Красовского, Понтрягина) при решении задач управления большими группами БЛА.

Одним из примеров снижения размерности данной задачи может служить алгоритм оптимального централизованного управления группой БЛА [Меркулов и др. 2012]. Снижение размерности достигается следующими способами:

- декомпозицией вектора состояния группы БЛА на подвекторы, соответствующие отдельным объектам или их составным частям;
- заменой классического функционала качества с использованием общей квадратичной формы, отвечающей за точность функционирования, на модифицированный функционал с сумой квадратичных форм для каждого подвектора;
- последовательным индивидуальным управлением каждым БЛА с учётом состояния других БЛА в группе вместо одновременного управления всеми БЛА.

Другой класс задач управления группами БЛА связан с необходимостью формирования и поддержания требуемого пространственного построения группы. Эти задачи также называют строевыми задачами [Каляев и др. 2009].

В общем виде данная задача формулируется следующим образом: при заданных исходных и требуемых положениях БЛА группы в пространстве, допустимой погрешности построения, ограничениях на положения БЛА и на их возможные перемещения требуется переместить БЛА из исходного положения в требуемое.

В зависимости от того, каким образом задается требуемое положение БЛА, общую задачу можно разбить на два класса.

В задачах первого класса требуемые положения БЛА группы задаются в виде абсолютных координат в пространстве.

Задачи второго класса требуют поддерживать определённое взаимное положение БЛА в строю.

В свою очередь, задачи первого класса разбиваются на два подкласса. К первому подклассу относятся задачи, в которых координаты требуемого положения определены для каждого конкретного БЛА группы. Задачи данного подкласса характерны для групп, состоящих из небольшого числа разнородных БЛА, которые должны занимать строго определенные позиции в строю [Каляев и др. 2009]. Примерами задач такого типа служат транспортировка крупных тел (БЛА выстраиваются по периметру перемещаемого тела), сбор проб (БЛА занимают строго заданные места для забора образцов), охрана протяженных объектов (БЛА группы перемещаются на контрольные точки) и т.п. Решение задачи сводится к перемещению каждого БЛА из начальной точки в заданную точку с обходом/облетом препятствий и предотвращением столкновений.

Задачи второго подкласса связаны с группами из однотипных БЛА. В этом случае не имеет большого значения, какой из БЛА группы займет то или иное положение в строю, а описание требуемого положения группы содержит координаты требуемых точек, но не содержит информации о том, какому БЛА какая точка соответствует [Каляев и др. 2009].

На практике задача такого типа встречается в тех же применениях, что и предыдущая. Решение такой задачи разбивается на два этапа. На первом этапе решается задача о назначениях, в результате чего каждому БЛА ставится в соответствие определенное требуемое положение, а затем задача сводится к предыдущей.

Существенно бóльшую сложность имеют задачи второго класса, в которых первоочередное значение имеет обеспечение заданного взаимного положения БЛА в строю. В частности, положение БЛА друг относительно друга может задаваться в виде матрицы относительных расстояний между ними. Следует отметить, что такие задачи чаще встречаются на практике, чем задачи первого класса.

Особенность данного класса задач заключается в том, что строевому расположению, задаваемому в виде относительных расстояний между БЛА, может отвечать бесконечное множество различных наборов точек в

пространстве. Поэтому в первую очередь необходимо определить, каким образом найти такое конкретное множество точек пространства, отвечающее заданному строевому расположению, переход в которое всех БЛА группы позволяет минимизировать пройденные ими расстояния и, как следствие, временные и энергетические затраты.

В свою очередь, данная задача также может быть разбита на два подкласса. К первому подклассу относятся те задачи, в которых задано как требуемое строевое расположение в виде относительных расстояний между БЛА, так и соответствие между каждой позицией и БЛА, который должен её занять. Такой тип задач характерен для групп разнотипных БЛА.

Второй подкласс составляют задачи, в которых требуемое строевое расположение задано в виде относительных расстояний между БЛА, а соответствие между конкретными БЛА и позициями в строю не задано. Подобные задачи актуальны для групп однотипных БЛА.

## **2. Задача выявления групп воздушных объектов с учётом неопределённости их координат состояния**

Задача выявления групп (группирования) взаимодействующих ВО актуальна в связи с широким распространением групповых действий пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов.

Автоматическое группирование ВО в первую очередь призвано облегчить анализ тактической обстановки операторам, управляющим группами БЛА. Кроме того, результаты группирования ВО могут использоваться для решения задачи целераспределения в группе БЛА [Горощенко Л.Б. 2000].

Известные способы решения этой задачи основаны на оценке расстояния между ВО в пространстве их координат состояния (КС), которые могут быть как количественными (координаты в пространстве, курс, скорость), так и качественными (класс, тип, государственная принадлежность) [Горощенко Л.Б. 2000, Кирсанов и др. 1996]. Однако эти способы не учитывают возможной неопределённости значений количественных и качественных КС ВО, связанной с ошибками их оценивания и неполнотой доступной информации об объектах.

В связи с этим были разработаны способы группирования ВО с учётом их неопределённых количественных КС [Верба и др. 2014]. В данном докладе предлагается способ, который позволяет проводить группирование ВО с использованием как количественных, так и качественных КС.

Под количественными КС понимаются координаты в пространстве, курс и скорость объектов. Из числа качественных КС (признаков) рассматриваются государственная принадлежность и класс ВО.

При решении задачи группирования ВО  $p$  представляется набором своих КС  $\langle x_1^p, x_2^p, \dots, x_k^p, x_{k+1}^p, \dots, x_n^p \rangle$ , где  $\langle x_1^p, x_2^p, \dots, x_k^p \rangle$  – его количественные координаты, а  $\langle x_{k+1}^p, x_{k+2}^p, \dots, x_n^p \rangle$  – качественные признаки.

Каждая количественная КС  $x_i^p$ ,  $i = \overline{1, k}$  может быть представлена интервалом с нижней границей  $x_{ин}^p = \hat{x}_i^p - \Delta_i^p$  и верхней границей  $x_{ив}^p = \hat{x}_i^p + \Delta_i^p$ , где  $\hat{x}_i^p = a_i^p + \xi_i^p$  – текущая оценка  $i$ -й КС ВО  $p$  (число),  $a_i^p$  – её фактическое значение,  $\xi_i^p$  – ошибка её измерения,  $\Delta_i^p = 3\sigma_i^p$ ,  $\sigma_i^p$  – среднеквадратичное отклонение случайной величины  $\xi_i^p$ .

Для качественных признаков  $x_i^p$ ,  $i = \overline{k+1, n}$  известны конечные множества их возможных значений  $A_i$ , а текущие оценки их значений представлены множествами  $B_i^p \subseteq A_i$ . При  $|B_i^p| = 1$  значение  $x_i^p$  известно точно, а при  $|B_i^p| = |A_i|$  оно полностью неопределено.

Предполагается, что расстояние между парой непосредственно взаимодействующих ВО  $p$  и  $q$  в пространстве их количественных КС не превышает некоторого априорно заданного порога [Кирсанов и др. 1996], а качественные признаки этих объектов, такие, как государственная принадлежность и класс, совпадают.

Проверка пары ВО  $p$  и  $q$  на наличие непосредственного взаимодействия между ними осуществляется путём попарного сравнения значений их одноимённых КС. Для каждой пары КС  $(x_i^p, x_i^q)$ ,  $i = \overline{1, n}$  задано условие  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  непосредственного взаимодействия пары ВО  $p$  и  $q$  в одной группе. При этом, с учётом неопределённости значений  $x_i^p, x_i^q$ ,  $i = \overline{1, n}$  возможны три результата проверки условия  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  [Верба и др. 2014]:

- условие *не выполняется*;
- условие *возможно выполняется*;
- условие *достоверно выполняется*.

Заключение о непосредственном взаимодействии пары объектов  $p$  и  $q$  в составе одной группы делается по следующим правилам.

Если существует  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , для которого  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  не выполняется, то объекты  $p$  и  $q$  *непосредственно не взаимодействуют* в составе группы.

В противном случае, если существует  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , для которого  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  возможно выполняется, то объекты  $p$  и  $q$  *возможно непосредственно взаимодействуют* в составе группы.

В противном случае ВО  $p$  и  $q$  *достоверно непосредственно взаимодействуют* в составе группы.

Условие  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  для неопределённых количественных КС  $x_i^p, x_i^q$ ,  $i = \overline{1, k}$  требует, чтобы различие их значений не превышало априорно заданного порога  $\varepsilon_i$  [Кирсанов и др. 1996] и для интервальных КС сформулировано следующим образом [Верба и др. 2014].

Если  $|\hat{x}_i^p - \hat{x}_i^q| > \varepsilon_i + \Delta_i^p + \Delta_i^q$ , то  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  *не выполняется*.

Если  $|\hat{x}_i^p - \hat{x}_i^q| \leq \varepsilon_i + \Delta_i^p + \Delta_i^q$  и  $|\hat{x}_i^p - \hat{x}_i^q| > \varepsilon_i - \Delta_i^p - \Delta_i^q$ , то  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  *возможно выполняется*.

Если  $|\hat{x}_i^p - \hat{x}_i^q| \leq \varepsilon_i - \Delta_i^p - \Delta_i^q$ , то  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  *достоверно выполняется*.

Одним из возможных условий принадлежности пары ВО к одной группе является совпадение их качественных признаков (например, государственной принадлежности или класса). Для неопределённых качественных признаков  $x_i^p, x_i^q$ ,  $i = \overline{k+1, n}$  условие  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  формализуется следующим образом.

Если  $B_i^p \cap B_i^q = \emptyset$ , то  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  *не выполняется*.

Если  $|B_i^p| > 1$  и (или)  $|B_i^q| > 1$  и  $B_i^p \cap B_i^q \neq \emptyset$ , то  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  *возможно выполняется*.

Если  $|B_i^p| = |B_i^q| = 1$  и  $B_i^p = B_i^q$ , то  $Cr_i(x_i^p, x_i^q)$  *достоверно выполняется*.

С использованием приведённых правил группирования ВО может быть построен граф их взаимодействия, вершины которого соответствуют ВО, а рёбра могут быть двух типов и отображают возможное или достоверное непосредственное взаимодействие между парой ВО. Путём выявления связных компонент этого графа могут быть выделены возможные и достоверные группы ВО [Верба и др. 2014].

Таким образом, предложенный способ группирования ВО даёт следующие преимущества:

- облегчение работы операторов, управляющих группами БЛА, за счёт автоматизации процесса группирования;
- оценка степени достоверности состава выявленных групп ВО за счёт разделения их на возможные и достоверные;
- увеличение времени сопровождения групп ВО за счёт того, что возможные группы выявляются раньше, чем достоверные, а при

кратковременном расхождении ВО достоверные группы не снимаются сразу с сопровождения, а переводятся в класс возможных.

## Заключение

Проведенный анализ состояния и тенденций развития тематики управления группами БЛА позволяет сделать следующие выводы.

Актуальными являются задачи оптимального управления траекторией полёта группы БЛА и её пространственным построением для различных стратегий группового управления, а также задачи информационного обеспечения групповых действий БЛА, включая выявление, оценку состава и сопровождение групп ВО. К настоящему времени предложены решения отдельных разновидностей указанных задач, достоинствами которых являются, в частности, снижение вычислительной сложности алгоритмов оптимального группового управления и способность работы с неопределённой количественной и качественной информацией.

## Список литературы

- [**Верба 2009**] Верба В.С., Поливанов С.С. Организация информационного обмена в сетцентрических боевых операциях. // Радиотехника. 2009. №8.
- [**Каляев и др. 2009**] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
- [**Канашенков и др. 2002**] Канашенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. — М.: ИПРЖР, 2002.
- [**Ройтенберг 1992**] Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. — М.: Наука, 1992.
- [**Меркулов и др. 2012**] Меркулов В.И., Харьков В.П., Шамаров Н.Н. Оптимизация коллективного управления группой беспилотных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012, №7.
- [**Горощенко Л.Б. 2000**] Горощенко Л.Б. Методы координированного наведения и атаки несколькими истребителями группы самолётов противника. // Полёт. – 2000, №6.
- [**Кирсанов и др. 1996**] Кирсанов А.П., Сорвенков О.С., Сузанский Д.Н. Методы обработки радиолокационной информации при сопровождении компактных групп воздушных объектов // Радиотехника. – 1996, №10.
- [**Верба и др. 2014**] Верба В.С., Липатов А.А., Федисов А.Н. Выявление групп воздушных объектов с учётом неопределённости их координат состояния. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014, №1.