

УДК 629.735.33

# ЦЕЛЕУКАЗАНИЕ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТИВНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ В РАЗНОРОДНЫХ ГРУППАХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**В.П. Кутахов**

*Институт имени Н.Е. Жуковского*  
*ФГБУ Российская академия ракетных и артиллерийских наук*  
Россия, 125319, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, корп. 12  
E-mail: kutahovvp@nrczh.ru

**А.Е. Титов**

*Институт имени Н.Е. Жуковского*  
E-mail: titovae@nrczh.ru

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, групповое применение, управление групповым поведением, целеуказание.

**Аннотация:** В докладе исследуется задача управления групповым поведением беспилотных летательных аппаратов с учётом неопределённостей различного уровня. Задача управления коллективным поведением беспилотных аппаратов при взаимодействии с многокомпонентным объектом рассматривается авторами не в классической постановке динамической задачи управления, а в виде последовательности задач принятия решений – обнаружения группового объекта, оценивания ситуации, целераспределения, целеуказания и ряда других в совокупности с динамическими задачами по реализации этих решений. Представлены формализованные процедуры целеуказания, как элемента системы управления групповым коллективным поведением с учётом различных факторов неопределённости.

В формировании принципов построения беспилотной техники следующего поколения наряду с разработкой собственно летательных аппаратов важнейшую роль приобретают исследования по направлению обеспечения поведения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при совместном проведении авиационных работ в составе группы [1]. Важнейшим научным направлением в этой области является создание системы управления коллективным поведением беспилотных летательных аппаратов различного функционального назначения для решения единой многокомпонентной задачи. [2-4].

В докладе рассматривается задача управления групповым поведением БЛА для условий автономного коллективного их применения с учётом неопределённостей различного уровня; полагается, что группа БЛА состоит из аппаратов различного функционального назначения, используемых совместно для решения некоторой общей задачи [2]. Аппараты могут быть оснащены различными информационными средствами и различными исполнительными средствами. Общей задачей функционирования группы является некоторое воздействие на пространственно-

распределённую систему, представляющую собой совокупность разнородных объектов. Примером такой задачи может быть групповое действие БЛА на объекты чрезвычайной ситуации в случае техногенной катастрофы.

Неопределённость формируется недостаточной априорной информацией о количестве, характеристиках и координатах объектов групповой системы, а также неточностями информационных систем в процессе применения группы. Необходимо сформировать систему управления коллективным поведением аппаратов для такой постановки [3].

Авторы полагают, что управление групповым поведением включает последовательность задач принятия решений и динамических задач по их реализации, а основными и взаимообусловленными задачами системы управления в данной постановке являются:

- выявление обстановки – оценка состояния групповой цели, как совокупности объектов целевой системы в заданной области;
- распределение информационных ресурсов и ресурсов воздействия группы аппаратов на обнаруженные объекты (задача целераспределения);
- осуществление информационно-координатной привязки аппаратов к объектам, назначенным для воздействия (задача целеуказания);
- непосредственная доставка средств воздействия на объект.

Первые две задачи рассмотрены авторами в [3]. В докладе рассматриваются третья и четвертая задачи – целеуказания с учетом динамики структурного изменения в процессе выполнения задачи. Полагается, что объекты групповой цели обнаружены, распознаны и определены их свойства.

Задана группа из  $N$  аппаратов с их координатами и свойствами  $\rho_i$  и  $v_i$ . Свойства определяются наличием в составе данного БЛА тех или иных информационных каналов или средств воздействия на объекты. Групповая цель состоит из  $M$  объектов в области  $\Omega_0$  также с координатами  $\rho_j$  и свойствами. Свойства объектов проецируются на совокупность признаков, по которым они могут быть обнаружены и распознаны  $\xi_j$  информационными системами размещенными на БЛА. Признаки соответствуют характеру объектов, а также информационным каналам БЛА оперирующим с этими объектами. (рис.1).

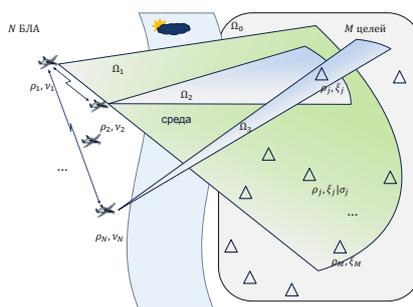


Рис. 1. К процедуре целеуказания.

Групповая цель представляется случайным полем событий. Координаты этих событий заданы с некоторой неточностью  $\sigma_{\rho_j}$ , определяемой точностными характеристиками информационного поля группы БЛА, а свойства этих событий-объектов определяются с ошибками распознавания, характеризуемыми вероятностью

правильного распознавания объекта  $P_j$ . Предполагается, что и БЛА группы и объекты подвижны.

В общей задаче управления группой БЛА целераспределение формализуется нахождением некоторой матрицы, состоящей из 1 и 0, если аппарату назначен или не назначен соответствующий объект. Целераспределение определяет также и функцию по отношению к назначенному объекту в соответствии со свойствами аппарата – получение информации соответствующим каналом или воздействие имеющимся на аппарате средством. Задача целеуказания рассмотрена авторами в [3, 4].

Целеуказание определяется как взаимная привязка координат аппарата и назначенного ему объекта. В общем случае, целеуказание характеризуется недостаточной для непосредственного воздействия точностью, определяемой характеристиками первичного информационного канала ИК1, осуществившего сканирование области  $\Omega_1$  с ошибками оценки координат (и свойств) объектов на этапе первичной оценки состояния групповой цели. Требуется дополнительное уточнение координат объекта (или относительных координат), что связано с использованием подпоиска объекта более точным информационным каналом аппарата. Более точный информационный канал имеет большую удельную стоимость ресурса получения информации, поэтому зона сканирования  $\Omega_2$  ему должна назначаться меньше, в большей степени концентрированная на назначенном (назначенных) объекте.

Общий объем ресурсов на поиск и подпоиск определяется интегралами от удельных ресурсов  $R^y$  по областям сканирования. Качественная картина целеуказания для трёх этапов (в общем случае  $K$  этапов) уточнения представлена на рис 2.

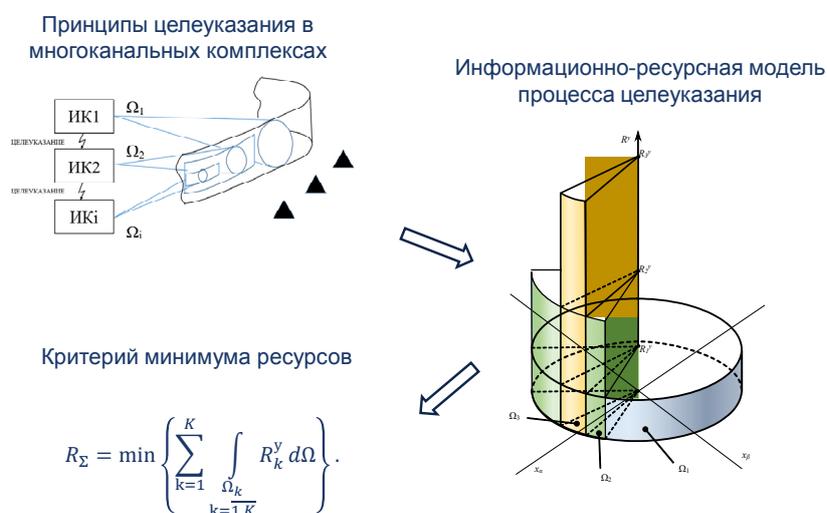


Рис. 2. Оптимизация процедуры целеуказания.

Получившаяся информационно-ресурсная модель, или «информационный пирог», как называют его авторы, описывает одну из задач целеуказания. А именно, задачу определения оптимального соотношения между распределением зон поиска и подпоиска  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  и последующих для минимизации общих затрачиваемых ресурсов для информационного обеспечения задачи целеуказания, как элемента системы группового управления. Для общего случая для  $K$  этапов целеуказания:

$$R_{\Sigma} = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \int_{\Omega_k} R_k^y d\Omega \right\},$$

$$\Omega_2, \Omega_3, \Omega_k = \text{var}, \sigma_k < \sigma_{\text{треб}}$$

Минимизация достигается варьированием размерами зон подпоиска на каждом этапе с учётом требований достоверности процесса управления и различных факторов, описание которых не входит в задачи доклада.

В процессе функционирования группы возникает еще одна задача управления - управления целеуказанием в процессе доставки средств воздействия к назначенному объекту. Доставка развивается во времени  $t$ .

В процессе полета БЛА к цели знание о её координатах претерпевает изменения. Ошибка определения координат  $\sigma_{\rho_j}$  для каждого объекта в общем случае может оказаться недостаточной для точной доставки средства воздействия. При этом, существенное влияние на определение координатных отношений оказывает ряд факторов, зависящих от времени  $t$ , таких как старение информации, связанное с неопределенностью изменения состояния объекта в соответствии с моделями динамики распознанных объектов, влияние среды, помеховой ситуации и другие факторы. По этим причинам наблюдается размытие функции неопределенности координат объекта в процессе полета. Упрощенно говоря, необходимо ввести зависимость  $\sigma_{\rho_j}$  от времени и от других факторов. В предположении нормального распределения ошибок:

$$\begin{aligned}\sigma_{\rho_j} &= \sigma_{\rho_j}(t, q), \\ W_j(\rho) &= W_j(\rho, t, q),\end{aligned}$$

где  $q$  – совокупность перечисленных факторов.

В этой постановке требуется процедура подпоиска  $j$ -й цели информационным каналом  $i$ -го БЛА с зоной подпоиска  $\Omega_i$  соответствующей размеру неопределенности координат объекта в момент времени  $t$ . Вероятность обнаружения объекта в зоне подпоиска по данным целеуказания на этапе  $k$  определяется размером зоны:

$$D_{ij} = \int_{\Omega_k} W_j(\rho_j, t, q) d\Omega$$

Весьма важное значение в управлении целеуказанием играет различие в совокупности признаков  $\xi_{j1}$  и  $\xi_{j2}$  первичного информационного канала и вторичного канала  $i$ -го аппарата, которому выдаётся целеуказание. Например, первичное целеуказание производится по данным радиолокатора, а информационный канал БЛА работает в оптическом диапазоне, поэтому  $\xi_{j2}$  не равно  $\xi_{j1}$ , а находится с ним в некоторой связи  $\xi_{j2} \Leftrightarrow f(\xi_{j1})$ . Вероятность обнаружения объекта для  $K$  этапов целеуказания будет определяться выражением:

$$D_{ij} = \int_{\Omega_k} W_j(\rho_j, t, q, \xi_k | \xi_{k-1}) d\Omega.$$

Закон подпоиска определяется вероятностной картиной неопределённости координат объекта.

Общая процедура целеуказания для этой задачи иллюстрируется на рис. 3.

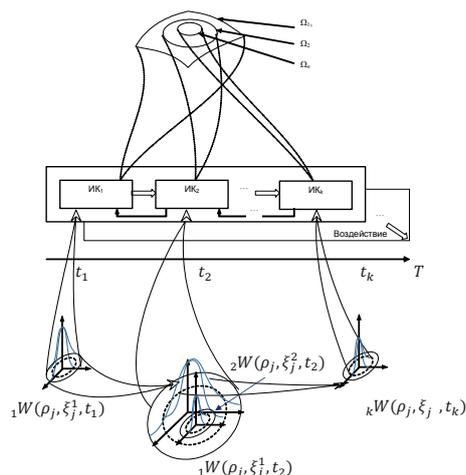


Рис. 3. Последовательность целеуказания.

Как следует из указанного рисунка, информационным каналом ИК1 в момент  $t_1$  координаты объекта  $j$  передаются в качестве целеуказания на некоторый БЛА; координаты определяются с некоторой неточностью, представленной функцией неопределённости  ${}_1W(t_1)$ , через некоторое время полета в момент времени  $t_2$  функция неопределённости «размывается» и представлена  ${}_1W(t_2)$ . В этот момент начинается подпоиск в области, определяемой зоной  ${}_1W(t_2)$ . Подпоиск каналом ИК2 приводит к уточнению координат с неопределённостью описываемой  ${}_2W$  в данный момент  $t_2$ . Процедура в общем случае имеет  $K$  этапов.

Таким образом, в докладе даётся формализация процедур целеуказания, как составной части задачи управления групповым поведением с учетом перечисленных факторов. В постановке принимается случайное поле объектов, возможность последовательного выделения объектов из группы, использование неэнергетических признаков обнаружения и распознавания, а также отличия этих признаков для разных информационных каналов системы управления коллективным поведением в группе БЛА.

Формализация и алгоритмизация решения задач целеуказания явится существенным элементом системы управления коллективным поведением автономных разнородных групп БЛА и других робототехнических систем.

## Список литературы

1. Стратегия развития беспилотной авиации РФ на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г. от 21 июня 2023 г. № 1630-р / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407003744/?ysclid=lpktmlr7m9247908452> (дата обращения 30.11.2023).
2. Кутахов В.П. Развитие информационных технологий и их влияние на облик боевых действий XXI века // Известия РАН. 2020. № 112. С. 11-16.
3. Кутахов В.П., Титов А.Е. Крупномасштабные авиационные системы с беспилотными летательными аппаратами – новая парадигма боевых действий // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 19. С. 212-221.
4. Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 67-74.