

А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов, В.Ю. Тихонов**ПЛАНИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ В ЗАДАЧАХ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОИСКА ОБЪЕКТОВ***

Одно из важнейших направлений современной науки и технике является пространственный поиск объектов. Задача поиска возникает тогда, когда требуется определить положение некоторого объекта (цели), находящегося в заданной области физического пространства, с помощью поисковых средств. Теория поиска является одним из разделов теории операций: предметом ее изучения являются математические модели процессов поиска, методы организации и оптимального планирования поисковых операций, обеспечивающие обнаружение целей при минимальных временных или ресурсных затратах. В работе излагаются общие положения классической теории поиска. Для выполняющих поиск субъектов приемлем термин – наблюдатели. Отмечается специфика задач дискретного поиска объектов. В континуальных задачах поиска исследуется кинематика движения наблюдателя в физическом пространстве. В задачах дискретного поиска обследуемая область представляется в виде совокупности зон, причем кинематические аспекты поиска в них не рассматриваются, а процесс поиска представляется как чередование обследования выделенных зон имеющимися средствами наблюдения. Важным преимуществом задач дискретного поиска является возможность применения к ним методологии и математического аппарата теории расписаний, сводящего решаемую задачу к задачам комбинаторной оптимизации. Рассматриваются две задачи управления поисковыми операциями – задача оптимального распределения поисковых ресурсов по выделенным зонам поиска и задача оптимизации маршрутов поиска. Первая задача формулируется как задача о назначениях, а вторая – как задача транспортной маршрутизации на основе предложенной авторами графовой модели зоны поиска. Современные способы организации поиска не могут обходиться без автоматизации и интеллектуализации процессов управления поисковыми операциями. В связи с этим обсуждаются перспективы организации процессов группового поиска объектов средствами интеллектуальной робототехники на основе применения агентных технологий.

Пространственный поиск объектов; планирование поисковых операций; методы теории расписаний; задача распределения ресурсов; задача оптимальной маршрутизации; групповой поиск; агентные технологии.

A.B. Filimonov, N.B. Filimonov, V.Yu. Tikhonov**OPERATIONS SCHEDULING IN TASKS SPATIAL SEARCH OBJECTS**

One of the most important areas of modern science and technology is the space of object. The task of search arises when it is required to determine the position of some object (goal) being in the given area of physical space with the help of search means. The theory of search is one of the sections of the operations theory. The subject of its study are the mathematical models of search processes, methods of organization and optimal planning of search operations, providing the detection of goals with minimal time and resource inputs. The general positions of the classical theory of search are presented in the paper. The term «observers» is admissible for subjects fulfilling the search. It is noted the specific character of tasks discrete search of objects. In the continual tasks of search the kinematics of the motion of the observer in the physical space is investigated. In the problems of discrete search the investigated area is represented as the rotation of the investigation of chosen zones by having means of observation. Two control problems by search operations are considered: the problem of optimal distribution of search resources on chosen search zones and the optimization problem of the routes search. The first problem is formulated as the assignment problem and the second one is formulated as the problem of transport routing based on graph model of the search area suggested by the authors. The modern methods of search

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант: № 16-08-00313.

organization can't do without the automation and intellectualization of control processes by search operations. In this connection the prospects of the organization of processes of the group search objects by means of the intellectual robotics on the basis of use of agent technologies are also discussed.

Space search of objects; planning search operations; methods of the scheduling theory; the problem of resource distribution; the problem of optimal routing; group search; agent technologies.

Введение. Явление поиска представляет собой одну из важнейших сторон человеческой деятельности и встречается в самых разных областях. При этом все большую актуальность приобретают задачи пространственного поиска реальных объектов в различных средах.

Теория пространственного поиска объектов зарождалась в работах Купмана (В.О. Коорман, 1946) и к настоящему времени сложилась как самостоятельная научная дисциплина [1–5]. Основной целью пространственного поиска является обнаружение разнообразных сторонних объектов в обследуемом пространстве с определением их характера и местоположения. Объекты поиска (цели) могут быть неподвижными (статическими) и подвижными, иметь различную природу и располагаться в разных средах, например: летательные аппараты, разнообразные предметы на поверхности Земли, корабли и судна, промысловая рыба и морские животные и т.д. Задачей теории поиска объектов является выработка оптимального плана поиска, обеспечивающего обнаружение объекта при минимальных временных или ресурсных затратах [6–10].

Несмотря на широкие инженерные применения, проблематика управления поисковыми операциями к настоящему времени остается малоизученной. Вместе с тем принципиально изменяются технологии поиска, а также его научно-техническая проблематика в результате использования мобильной робототехники в качестве основных технических средств поиска. Здесь особое внимание заслуживает разработка теоретических основ авиационного поиска, базирующегося на применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [11, 12], которые используются в различных областях науки и техники при решении многих комплексных задач как мирного, так и военного характера. При этом БПЛА гражданского назначения весьма эффективно осуществляют дневной и ночной поиск различных объектов, патрулирование районов, экологический мониторинг, ретрансляцию радиосвязи, радиопеленгацию, разведку районов крупных аварий и катастроф и т.д. БПЛА военного назначения в наибольшей степени используются в качестве средств реализации операции геолокации при решении таких задач, как исследование мест применения оружия массового поражения; подготовка вооруженного нападения на стационарные или вражеские движущиеся объекты; операции идентификации, распознавания, разведки, поиска, спасения и т.д.

БПЛА оказываются весьма эффективными для реализации процессов группового поиска. В качестве примера реализации поиска движущихся целей с помощью группы БПЛА можно привести работу [13], где оператор осуществляет контроль над поиском и слежением многими БПЛА. Исследования в данном направлении правомерно относить к *групповой робототехнике* - подход к управлению большим количеством физически простых роботов, основывающийся на принципах роевого интеллекта [14]. Идеологической основой групповой робототехники служит эффект эмерджентности простых механизмов индивидуального поведения: из них может создаваться сложное организованное поведение всего роя.

В данной статье акцент сделан на задачах дискретного поиска целей, важнейшим достоинством которых является возможность применения методологии и математического аппарата теории расписаний [15], сводящего решаемую задачу к задачам комбинаторной оптимизации [16]. Использование мобильных роботов в

качестве средств поиска закономерно приводит к необходимости изучения перспектив применения агентных технологий [17–20] к задачам группового поиска целей – эти вопросы также затрагиваются в статье.

Общие положения классической теории поиска. Задача поиска возникает тогда, когда требуется определить положение объекта, находящегося в заданной области Ω физического пространства с помощью поисковых средств. Классические результаты в данной научной области исследований отражают монографии [1, 3, 4].

Для выполняющего поиск субъекта примем термин - *наблюдатель* [1]. Задачей теории поиска объектов является выработка оптимального плана поиска, обеспечивающего обнаружение целей при минимальных временных или ресурсных затратах. Положение цели может задаваться с помощью некоторой плотности распределения.

В теории поиска рассматривают два критерия оптимизации процесса поиска [3]: 1) максимум вероятности обнаружения цели при заданных ограничениях на поисковые ресурсы; 2) минимум средней продолжительности поиска. Во многих случаях данные критерии приводят к одной и той же стратегии поиска.

Сам поиск может осуществляться как одиночным наблюдателем, так и группой наблюдателей.

Если подлежащая обследованию площадь значительно больше площади, обзораемой из некоторой фиксированной точки или просматриваемой движущимся наблюдателем за один прогон, то лучший способ добиться равномерного покрытия всей площади заключается в реализации последовательности перемещений по параллельным маршрутам, пролегающим на некотором фиксированном расстоянии d один от другого. Этого можно достичь двумя путями: 1) если разведка ведется одним наблюдателем, то он выполняет движение по спирали или по челночному маршруту; 2) в случае использования нескольких наблюдателей они должны следовать параллельными курсами, так чтобы расстояния между смежными маршрутами равнялось d .

При весьма общих допущениях вероятность обнаружения цели может быть выражена формулой

$$P(\Phi) = 1 - e^{-\Phi}, \quad (1)$$

где Φ – *поисковый потенциал* наблюдателя.

Поясним смысл этой формулы. Введем $p(x)$ – вероятность обнаружения цели, расстояние до которой по траверзу (направлению, перпендикулярному курсу самолета, судна или его диаметральной плоскости) равняется x .

Приведенная ширина полосы обзора, охватываемая наблюдателем при его движении по заданному курсу, определяется формулой

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx.$$

Согласно [3] она является наиболее объективной мерой эффективности принимаемой наблюдателем разведывательной аппаратуры.

Обозначим через S_{Ω} площадь всей обследуемой области Ω . Положим, что разведывательный маршрут состоит из нескольких лежащих внутри области Ω отрезков, сумма длин которых равняется L .

Разобьем маршрут на N малых участков протяженности ΔL . Тогда

$$L = N \Delta L. \quad (2)$$

Вероятности обнаружения цели на каждом таком участке равны

$$P_1 = (\Delta L / S_\Omega) \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = \frac{W \Delta L}{S_\Omega}. \quad (3)$$

Введем так называемое [3] *поисковое покрытие*:

$$E = WL.$$

Поисковый потенциал определяется формулой

$$\Phi = E / S_\Omega.$$

Отсюда и из (2) и (3) выводим соотношение

$$P_1 = \Phi / N. \quad (4)$$

Для вероятности обнаружения цели на N участках имеем

$$P_N = 1 - (1 - P_1)^N.$$

Подставляя сюда (4) при $N \rightarrow \infty$ получаем (согласно второму замечательному пределу) формулу (1).

Поисковые потенциалы обладают свойством аддитивности - если поиск осуществляется несколькими наблюдателями, которые либо перемещаются по одному и тому же маршруту, либо следуют параллельными курсами, то их поисковые потенциалы Φ_i суммируются:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots$$

Сущность проблемы оптимального распределения поисковых усилий раскрывает работа [3]. Так установлено, что если цель находится внутри области Ω , но о координатах цели ничего не известно, то оптимальным является равномерное распределение имеющихся разведывательных ресурсов по всей площади.

В случай частичной осведомленности о местонахождении цели считаются известными априорные вероятности ее расположения в той или иной подобласти $\Omega' \subset \Omega$.

Задачи дискретного поиска. В континуальных задачах поиска исследуется кинематика движения наблюдателя в физическом пространстве. Здесь различают поиск в трехмерном пространстве, на площади (в заданном районе) или на линии (на рубеже).

В задачах *дискретного* поиска обследуемая область представляется в виде совокупности зон, однако кинематические аспекты поиска в них не рассматриваются, а процесс поиска представляется как чередование обследования выделенных зон имеющимися средствами наблюдения. Важным преимуществом задач дискретного поиска является возможность применения к ним методологии и математического аппарата теории расписаний [15], сводящего решаемую задачу к задачам комбинаторной оптимизации.

Далее полагаем, что район поиска Ω разбит на n зон:

$$\Omega = \bigcup_{i=1}^n \Omega_i. \quad (5)$$

причем поисковые усилия внутри каждой зоны распределены равномерно.

Выделение тех или иных зон поиска должно быть обусловлено топографическими условиями и элементами местности: строением рельефа местности и местными предметами – природными объектами (реки, озера, зеленые массивы, заболоченные территории и т.п.) и искусственными объектами (населенные пункты, дороги, инженерные сооружения и т.п.).

Задачи оптимального распределения поисковых ресурсов. В теории расписаний исследуются задачи составления расписаний, т.е. упорядочивания некоторых работ (операций) по времени и/или по исполнителям (приборам). При этом необходимо учитывать ограничения на порядок выполнения работ. Конечная цель решения таких задач – нахождение оптимального допустимого расписания по тому или иному критерию оптимальности [21].

Частным видом задач теории расписаний является задача о назначениях [22]. Приведем традиционную формулировку данной задачи.

Задача о назначениях. Заданы:

1) некоторое множество работ

$$J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\} \quad (6)$$

с определенным набором характеристик для каждой работы: длительность, стоимость и т.п.;

2) некоторое множество исполнителей (средств)

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}, \quad (7)$$

осуществляющих выполнение данных работы в соответствии с выбранным расписанием.

Дана также матрица себестоимости работ

$$C = \|c_{ij}\|_{n \times m}. \quad (8)$$

Здесь c_{ij} – затраты на выполнение работы J_i исполнителем M_j .

Требуется распределить работы по исполнителям таким образом, чтобы выполнить работы с минимальными затратами.

Введем *матрицу назначений*:

$$X = \|x_{ij}\|_{n \times m},$$

где x_{ij} – бинарная переменная: $x_{ij} = 1$, если исполнитель M_j назначен на работу J_i , и $x_{ij} = 0$ – в противном случае.

Суммарные затраты на выполнение всех работ:

$$Q(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}. \quad (9)$$

Если число $m=n$, т.е. число работ и исполнителей совпадают, то задача называется *сбалансированной*, в противном случае – не сбалансированной. В случае сбалансированной задачи о назначениях выполняются два условия: каждый исполнитель выполняет только одну работу и каждая работа выполняется только одним исполнителем.

Несбалансированная задача о назначениях может быть приведена к сбалансированному виду введением недостающего числа фиктивных работ либо исполнителей. Так если имеется избыток исполнителей, то следует назначить недостающее число работ с заведомо большой ценой для каждого исполнителя и после решения задачи игнорировать их. Аналогично, поступаем в случае избытка работ.

Задачу о назначениях можно представить как задачу булева программирования. Положим, что она является сбалансированной, т.е. $m=n$.

Решается оптимизационная задача

$$Q(X) \rightarrow \min \quad (10)$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1:n; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1:n; \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1:n. \quad (13)$$

Заметим, что ограничение (11) требует, чтобы для каждой работы был назначен один исполнитель, а ограничение (12) – каждому исполнителю была назначена в точности одна работа.

Одним из наиболее популярных алгоритмов решения данной задачи является венгерский алгоритм, обеспечивающий решение сбалансированной задачи о назначениях за полиномиальное время от числа работ [22, 23].

Формализация задачи распределения поисковых ресурсов. Организация поиска пространственных объектов сопряжена с распределением поисковых ресурсов по зонам поиска. При этом под поисковыми ресурсами понимаются наблюдатели со всеми их техническими средствами и качествами. В условиях ограниченности поисковых ресурсов стоит задача их оптимального распределения (см., напр., [24]).

Задачу оптимального распределения поисковых средств сформулируем как задачу о назначениях. Тогда выполняемые работы (6) – это поиск цели в заданной зоне, а исполнителями работ (7) являются наблюдатели.

Любому наблюдателю может быть назначена любая зона поиска. Дана матрица затрат ресурсов на выполнение поисковых работ (8): здесь c_{ij} – затраты на выполнение поиска цели наблюдателем M_j в зоне Ω_i .

Задача состоит в распределении зон по наблюдателям таким образом, чтобы выполнить поисковые работы с минимальными затратами.

Дальнейшее усложнение данной задачи включает два аспекта: 1) учет возможности совместного действия нескольких наблюдателей в каждой зоне поиска; 2) переход от детерминированной к вероятностной постановке задачи.

Первый аспект учитывается посредством исключения условия (11). Второй аспект сопряжен с введением вероятностных характеристик как расположения цели, так и технических возможностей наблюдателей.

Будем считать заданными априорные вероятности p_i нахождения цели в выделенных зонах поиска Ω_i . Очевидно,

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

Пусть p_{ij} – вероятность обнаружения цели наблюдателем M_j в зоне Ω_i , если цель находится в этой зоне.

Вероятность обнаружения цели вычисляется по формуле

$$P(X) = \sum_{i=1}^n p_i \left(1 - \prod_{j=1}^m q_{ij}^{x_{ij}} \right), \quad (14)$$

где q_{ij} – условная вероятность пропуска цели наблюдателем M_j в зоне Ω_i :

$$q_{ij} = 1 - p_{ij}.$$

Пусть задана нижняя граница вероятности обнаружения цели \underline{P} :

$$P(X) \geq \underline{P}. \quad (15)$$

Вероятностную постановку задачи распределения поисковых средств с целевой функцией (9) дает экстремальная задача (10), (9), (12)–(15).

Дуальная постановка задачи – вводится ограничение на затраты:

$$Q(X) \geq \underline{Q},$$

и ищется матрица назначений X , обеспечивающая максимум вероятности обнаружения цели:

$$P(X) \rightarrow \max.$$

Задача оптимизации маршрутов поиска. В структуре разбиения района поиска на зоны (5) не учитывается взаимное расположение выделенных зон и переходы наблюдателя между зонами. Этот недостаток позволяет преодолеть графовые модели района поиска цели. Опишем способ построения такого рода моделей, возможности их применения для описания дискретных процессов поиска статических целей и формализации задачи оптимизации маршрутов поиска.

Наряду с зонами $\Omega_i (i = 1:n)$ в разбиении района поиска (5) введем также дополнительную зону Ω_0 – место базирования наблюдателя: отсюда он стартует (и сюда возвращается).

Обозначим через $R_j (j = 1:m)$ трассы перехода между зонами. Отметим, что каждая трасса, соединяющая смежные зоны в Ω , проходит через общие участки этих зон.

Пространственную конфигурацию процесса поиска представим графом, в котором выделенным зонам поставлены в соответствие вершины графа, а трассам – его ребра:

$$G = (V, H),$$

где

$$V = \{\Omega_i, i = 0:n\}, \quad H = \{R_j, j = 1:m\}.$$

Будем предполагать случай частичной осведомленности наблюдателя о расположении объекта: заданы априорные вероятности p_i нахождения цели в выделенных зонах поиска Ω_i . Полагаем, что в процессе сканирования зоны наблюдатель не может пропустить находящуюся там цель.

Введем также временные характеристики процесса поиска: τ_i – время полного сканирования зоны Ω_i ; θ_j – время движения наблюдателя по трассе R_j .

Планы поиска определяют порядок обследования зон и представляются некоторым (разведывательным) маршрутом в графе G , т.е. чередующимися последовательностями смежных вершин:

$$\mu_V = (v_0, v_1, v_2, \dots, v_n), \quad v_i \in V, i = 0:n; \quad v_0 = \Omega_0;$$

и соединяющих их ребер:

$$\mu_H = (h_1, h_2, \dots, h_n), \quad h_k = (v_{k-1}, v_k), \quad k = 1:n.$$

Каждый план поиска состоит из n этапов, на каждом из которых осуществляется переход в очередную зону и ее обследование.

Соответствие между вершинами выбранного маршрута и зонами поиска можно задать некоторой перестановкой π индексов $1:n$:

$$v_k = \Omega_{\pi(k)}, \quad k = 1:n. \quad (16)$$

Обозначим через T_k период времени, прошедший от начала поиска до завершения k -го этапа. Очевидно,

$$T_k = T_{k-1} + \theta_k + \tau_k, \quad T_0 = 0. \quad (17)$$

Среднее время обнаружения объекта определяется формулой

$$\bar{T} = \sum_{k=1}^n \gamma_k T_k, \quad (18)$$

где γ_k - вероятность обнаружения цели на k -м этапе. Согласно (16)

$$\gamma_k = p_{\pi(k)}, \quad k=1:n. \quad (19)$$

Величина (18) зависит от выбора маршрута поиска. Задача построения оптимального маршрута направлена на минимизацию данного критерия:

$$\bar{T} \rightarrow \min. \quad (20)$$

Важно отметить, что сформулированная задача является задачей комбинаторной оптимизации.

Рассмотрим упрощенный вариант модели района поиска цели, когда временем перехода между зонами можно пренебречь: $\theta_j = 0 (j=1:m)$. В этом случае район поиска можно представить полностью связным графом, причем соответственно упрощается и формула (17):

$$T_k = T_{k-1} + \tau_k, \quad T_0 = 0. \quad (21)$$

Утверждение. Маршрут поиска $\mu_V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ является оптимальным в смысле критерия (20) тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$\frac{p_k}{\tau_k} \geq \frac{p_{k+1}}{\tau_{k+1}} (k=1:n-1). \quad (22)$$

Доказательство. Вначале рассмотрим случай двухзонного разбиения района поиска: $n=2$. Возможны два маршрута поиска: $\mu'_V = (\Omega_1, \Omega_2)$ и $\mu''_V = (\Omega_2, \Omega_1)$. Согласно формулам (18), (19), (21) им отвечают следующие значения среднего времени поиска:

$$\bar{T}' = p_1 \tau_1 + p_2 (\tau_1 + \tau_2), \quad \bar{T}'' = p_2 \tau_2 + p_1 (\tau_2 + \tau_1).$$

Отсюда находим:

$$\bar{T}'' - \bar{T}' = p_1 \tau_2 - p_2 \tau_1 = \tau_1 \tau_2 \left(\frac{p_1}{\tau_1} - \frac{p_2}{\tau_2} \right).$$

Следовательно,

$$\bar{T}'' \geq \bar{T}'$$

при выполнении условия

$$\frac{p_1}{\tau_1} \geq \frac{p_2}{\tau_2}.$$

Этот результат легко распространяется на случай $n > 2$, причем достаточно ограничиваться сравнением маршрутов μ'_V и μ''_V , различающихся лишь местоположением каких-либо двух вершин. ■

Пример. Аэроснимок района поиска представлен на рис. 1. Он разбит на $n=9$ равновеликих зон.

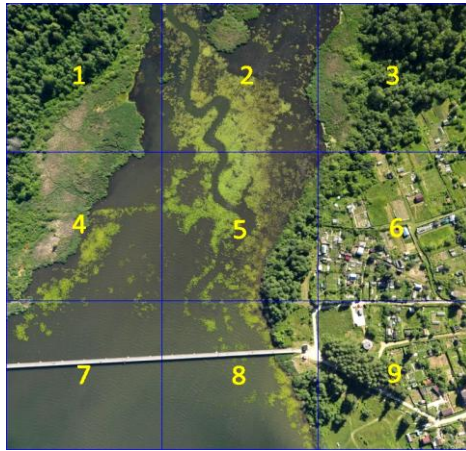


Рис. 1. Разбиение района поиска на зоны

Исходные данные для задачи оптимизации маршрута поиска приведены в таблице.

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_k	0.05	0.08	0.11	0.12	0.18	0.07	0.16	0.13	0.10

Считаем, что время сканирования каждой из зон одинаковое. В этом случае условие (22) упрощается:

$$p_k \geq p_{k+1} \quad (k=1:n-1).$$

Отсюда с учетом табличных данных находим последовательность индексов зон в оптимальном маршруте поиска:

$$5-7-8-4-3-9-2-6-1.$$

Предложенная модель представляет интерес для систем авиационного наблюдения за территориально распределенными объектами [25] – для решения задач оптимизации планирования маршрутов их облета.

Перспективы применения агентных технологий. Современные способы организации поиска не могут обходиться без автоматизации задач планирования и мониторинга поисковых операций, выполняемых оперативным персоналом. В связи с этим, системы поиска должны рассматриваться как особый класс эргатических информационно-управляющих систем.

Развитие автоматизированных систем поиска на базе мобильной робототехники немислимо без привлечения методов и инструментальных средств искусственного интеллекта [19, 26]), причем для задач группового поиска целей особый интерес представляют агентные технологии.

Под агентом понимается любая сущность, которая может воспринимать среду обитания (внешний мир) и воздействовать на нее [17–20]. Искусственный агент может иметь программно-аппаратную (робот) или программную (софбот) реализацию. Программные агенты – это компьютерные программы, которые исполняются асинхронно в соответствии с предписанным им целенаправленным поведением.

Агент способен автономно решать возложенные на него задачи, адаптироваться к изменениям во внешнем окружении, а также общаться с другими агентами для достижения глобальных целей.

Агенты можно классифицировать по степени развития внутреннего представления внешнего мира и способу реализации поведения. Исходя из этого, выделяют два типа агентов – реактивные и интеллектуальные.

Реактивные агенты имеют примитивную внутреннюю модель внешнего мира. Для них характерно использование концепции состояния и простейших механизмов поведения типа «стимул–состояние–реакция». Как следствие, реактивные агенты обладают весьма ограниченной возможностью предвидения и практически не способны планировать свои действия. В простейшем варианте реакция агента на внешние события генерируется конечным автоматом и их поведение описывается языком формальных грамматик.

Интеллектуальные агенты отличаются от реактивных агентов наличием у них встроеной базы знаний и развитого механизма планирования действий.

В наибольшей степени разумные свойства присущи делиберативным агентам, которые обладают символьной моделью внешнего мира, а также способны принимать решения на основе символьных рассуждений. Однако, существующий уровень развития теории и технологии проектирования делиберативных агентов далек от сферы практических применений. Альтернативный подход к формированию ментальной структуры агентов на основе ситуационной методологии и принципах вычислительного интеллекта.

Многоагентная система (МАС) – система агентов, взаимодействующих между собою. Агрегированное поведение агентной системы проявляется посредством локальных взаимодействий отдельных агентов.

В МАС функциональные задачи разбиваются на типовые подзадачи, выполняемые отдельным агентом или группой агентов. Это сказывается на организационной структуре МАС. Во-первых, осуществляется функциональная специализация агентов. Во-вторых, агенты также образуют иерархию уровней (нижний: сенсорные агенты, агенты-исполнители, интерфейсные агенты; средний: агенты-процессы; верхний: агенты-менеджеры и т.п.).

Выскажем некоторые соображения по разработке агентно-ориентированной архитектуры автоматизированных систем авиационного поиска с применением БПЛА. В организационной структуре такой МАС предлагается выделять особый тип агентов – виртуальные операторы-пилоты (именуемые далее агентами-пилотами) БПЛА.

Действительно, БПЛА вследствие ограниченности вычислительных ресурсов бортовых компьютеров могут располагать лишь примитивным бортовым интеллектом. В этих условиях для реализации агентного подхода необходимо использовать интеллект наземной операторской станции: на ее программной платформе создаются индивидуальные агенты-пилоты для каждого БПЛА в составе разведывательной группы, производящей поиск. Дистанционное управление БПЛА осуществляется посредством средств радиосвязи.

На первом этапе исследований в области мультиагентных технологий поиска логично придерживаться реактивных моделей поведения агентов, базирующихся на ситуационной методологии описания условий проведения и результатов поиска. Изменение ситуаций (т.е. состояния объектов наблюдения и внешней среды) должно приводить к либо к мягкой, либо к кардинальной перестройке поведения МАС. По-видимому, стратегии группового управления поисковой операцией должны основываться на гибком комбинировании двух принципов: стайного поведения и координированного управления. Начальные фазы ситуационных изменений функционирования МАС характеризуются существенными факторами неопределенности. Поэтому здесь логично запускать механизм стайного поведения агентов. Одновременно с этим включается механизм обучения МАС – эмпириче-

ского поиска эффективных стратегий координированного управления, благодаря чему МАС будет эволюционировать в направлении более детерминированного поведения своих агентов. В итоге реализуются два важнейших свойства системы – эмерджентность и самоорганизация.

Заключение. Работа посвящена проблеме планирования операций в задачах пространственного поиска объектов. Изложены общие положения классической теории поиска. Дана характеристика задачам дискретного поиска – их важнейшим методологическим аспектом является возможность применения концептуального и математического аппарата теории расписаний, сводящего решаемую задачу к задачам комбинаторной оптимизации. Предложена формализация двух задач: оптимального распределения поисковых ресурсов и оптимизации маршрутов поиска.

Принципиально новые научно-технические задачи порождает практика использования автономных мобильных роботов в поисковых операциях. Эффективное решение таких задач немыслимо без привлечения методов и инструментальных средств искусственного интеллекта. В связи с этим в работе также обсуждаются перспективы применения агентных технологий к задачам группового поиска целей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абчук В.А., Суздаль В.Г.* Поиск объектов. – М.: Сов. радио, 1977. – 334 с.
2. Головинский О.Б., Лавинский Г.В. *Поисковые системы.* – К.: Техніка, 1979. – 103 с.
3. *Морз Ф.* Теория поиска. Исследование операций. Т. 1. – М.: Мир, 1981. – С. 549-629.
4. *Хеллман О.* Введение в теорию оптимального поиска. – М.: Наука, 1985. – 248 с.
5. *Ким Д.П.* Методы поиска и преследования подвижных объектов. – М.: Наука, 1989. – 336 с.
6. *Беседин В. М., Крамарчук М. Г.* Оптимальный взаимный поиск в системе управления роботами // Управление в робототехнических комплексах и гибких автоматизированных производствах: Межвуз. сб. науч. трудов. – М.: МИЭРА, 1987. – С. 151-156.
7. *Строцев А.А.* Оптимальный поиск неподвижной цели многопозиционной информационной системой // Журнал радиоэлектроники. – 2004. – № 4. – С. 1.
8. *Савич А.В., Кириллов И.Г., Бурковский С.И.* Оптимизация автономного поиска целей многофункциональной РЛС многоканального зенитно-ракетного комплекса средней дальности // Системы обработки информации. – 2004. – Вып. 9 (37). – С. 158-163.
9. *Маркушин Н.А.* Использование имитационного моделирования для поиска морских подвижных объектов // Сб. докл. Третьей всеросс. науч.-практ. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика». Т. II. – СПб.: ЦНИИ технологии судостроения, 2007. – С. 124-129.
10. *Кокуев А.А., Кмитров С.В.* Оптимизация способов свободного поиска воздушных целей истребителями в заданном районе // Военная мысль. – 2013. – № 11. – С. 54-60.
11. *Sarris Z.* Survey of UAV applications in civil markets. June 2001 [Электронный ресурс].
12. *Абдулов Р.Н., Абдуллаев Н.А., Асадов Х.Г.* Вопросы оптимизации применения БПЛА для поиска и слежения объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 1 (83). – С. 45-49.
13. *Wheeler M., Schrick B., Whutacre W., Campell M., Rusdyk R., Wise R.* Cooperative tracking of moving targets by a team of autonomous UAVs // Authorized licensed use limited to: Uppsala Universitetbibliotek. Downloaded on January 8, 2010 at 03:11 from IEE Xplore. Restrictions apply. – P. 5C2-1-5C2-9.
14. *Beni G., Wang J.* Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems // Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Tuscany, Italy, June 26-30 1989.
15. *Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В.* Теория расписаний. – М.: Наука, 1975. – 360 с.
16. *Корте Б., Фиген И.* Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: МЦНМО, 2015. – 720 с.
17. *Jennings N.R., Wooldridge M.J.* Agent Technology. – Berlin Heidelberg New-York: Springer-Verlag, 1998.
18. *Wooldridge M.J.* An Introduction to MultiAgent Systems. John Wiley&Sons Ltd, 2002. – 366 p.

19. *Russel C., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. – М.: ИД «Вильямс», 2007. – 1408 с.
20. *Теряев Е.Д., Петрин К.В., Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б.* Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Ч. I. Основы агентного подхода // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 7. – С. 11-27.
21. *Лазарев А.А., Гафаров Е.Р.* Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. – 222 с.
22. *Таха Х.А.* Задача о назначениях. В кн.: Введение в исследование операций. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – С. 206-213.
23. *Kuhn H.W.* The Hungarian for the Assignment Problem // Naval Research logistics Quarterly. – 1955. – Vol. 2. – P. 83-97.
24. *Аркин В.И.* Задачи оптимального распределения поисковых усилий // Теория вероятностей и её применения. – 1964. – Т. 9, № 1. – С. 179-180.
25. *Поддильяев П.Е., Максимов Н.А.* Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2011. – Вып. 43. – С. 1-16.
26. *Льюггер Дж.Ф.* Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: Вильямс. 2005. – 864 с.

REFERENCES

1. *Abchuk V.A., Suzdal' V.G.* Poisk ob'ektov [Search of objects]. Moscow: Sov. radio, 1977, 334 p.
2. *Golovinskiy O.B., Lavinskiy G.V.* Poiskovye sistemy [Search engines]. Kiev: Tekhnika, 1979, 103 p.
3. *Morz F.* Teoriya poiska. Issledovanie operatsiy [Theory of search. Survey operations]. Vol. 1. Moscow: Mir. 1981, pp. 549-629.
4. *Khellman O.* Vvedenie v teoriyu optimal'nogo poiska [Introduction to the theory of optimal search]. Moscow: Nauka, 1985, 248 p.
5. *Kim D.P.* Metody poiska i presledovaniya podvizhnykh ob'ektov [Methods of search and pursuit of moving objects]. Moscow: Nauka, 1989, 336 p.
6. *Besedin V.M., Kramarchuk M.G.* Optimal'nyy vzaimnyy poisk v sisteme upravleniya robotami [Optimal mutual search system robot control], *Upravlenie v robototekhnicheskikh kompleksakh i gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstvakh: Mezhdvuz. sb. nauch. Trudov* [Control in robotic complexes, flexible automated productions: interuniversity collection of scientific papers]. Moscow: MIEHRA, 1987, pp. 151-156.
7. *Strotev A.A.* Optimal'nyy poisk nepodvizhnoy tseli mnogopozitsionnoy informatsionnoy sistemoy [Optimal search for a stationary target multi-position information system], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2004, No. 4, pp. 1.
8. *Savich A.V., Kirillov I.G., Burkovskiy S.I.* Optimizatsiya avtonomnogo poiska tseley mnogofunktsional'noy RLS mnogokanal'nogo zenitno-raketnogo kompleksa sredney dal'nosti [Optimization of Autonomous search for targets multi-function radar multi-channel anti-aircraft missile complex medium-range], *Sistemi obrabki informatsii* [System of information processing], 2004, Issue 9 (37), pp. 158-163.
9. *Markushin N.A.* Ispol'zovanie imitatsionnogo modelirovaniya dlya poiska morskikh podvizhnykh ob'ektov [The use of simulation to search for sea mobile objects], *Sb. dokl. Tret'ey vseross. nauch.-prakt. konf. «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika»* [A collection of papers of Third all-Russian scientific-practical conference "Simulation. Theory and practice"]. Vol. II. Saint Petersburg: TSNII tekhnologii sudostroenie, 2007, pp. 124-129.
10. *Kokuev A.A., Ktitrov S.V.* Optimizatsiya sposobov svobodnogo poiska vozdukhnykh tseley istrebitelyami v zadannom rayone [Optimization methods free search of air targets by fighters in a given area], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2013, No. 11, pp. 54-60.
11. *Sarris Z.* Survey of UAV applications in civil markets. June 2001 [Electronic resource].
12. *Abdulov R.N., Abdullaev N.A., Asadov K.H.G.* Voprosy optimizatsii primeneniya BPLA dlya poiska i slezheniya ob'ektov [The optimization of the use of drones for search and tracking of objects], *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2013, No 1 (83), pp. 45-49.
13. *Wheeler M., Schrick B., Whutacre W., Campell M., Rusdyk R., Wise R.* Cooperative tracking of moving targets by a team of autonomous UAVs, *Authorized licensed use limited to: Uppsala Universitetbibliotek. Downloaded on January 8, 2010 at 03:11 from IEE Xplore. Restrictions apply*, pp. 5C2-1-5C2-9.

14. Beni G., Wang J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, *Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Tuscany, Italy, June 26-30 1989*.
15. Konvej R.V., Maksvell V.L., Miller L.V. Teoriya raspisaniy [Theory of scheduling]. Moscow: Nauka, 1975, 360 p.
16. Korte B., Figen I. Kombinatornaya optimizatsiya. Teoriya i algoritmy [Combinatorial optimization. Theory and algorithms]. Moscow: MTSNMO, 2015, 720 p.
17. Jennings N.R., Wooldridge M.J. Agent Technology. Berlin Heidelberg New-York: Springer-Verlag, 1998.
18. Wooldridge M.J. An Introduction to MultiAgent Systems. John Wiley&Sons Ltd, 2002, 366 p.
19. Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyy podkhod [Artificial intelligence: a modern approach]. Moscow: ID «Vil'yams», 2007, 1408 p.
20. Teryaev E.D., Petrin K.V., Filimonov A.B., Filimonov N.B. Agentnye tekhnologii v avtomatizirovannykh informatsionno-upravlyayushhikh sistemakh. Ch. I. Osnovy agentnogo podkhoda [Agent technologies in the AV-aromatizirovannaya management information systems. Part I. Foundations of agent-based approach], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2010, No 7, pp. 11-27.
21. Lazarev A.A., Gafarov E.R. Teoriya raspisaniy. Zadachi i algoritmy [Theory. Problems and algorithms]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 2011, 222 p.
22. Takha Kh.A. Zadacha o naznacheniyakh [[Task assignment]. V kn.: *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [In book: Introduction to operations research]. Part 5, p. 5.4. Moscow: Izd. dom «Vil'yams», 2001, pp. 206-213.
23. Kuhn H.W. The Hungarian for the Assigment Problem, *Naval Research logistics Quarterly*, 1955, Vol. 2, pp. 83-97.
24. Arkin V.I. Zadachi optimal'nogo raspredeleniya poiskovykh usilii [The problem of optimal distribution of search efforts], *Teoriya veroyat-nostej i eyo primeneniya* [Theory of probability and its applications], 1964, Vol. 9, No 1, pp. 179-180.
25. Podlip'yan P.E., Maksimov N.A. Mnogofaznyy algoritm resheniya zadachi planirovaniya poleta gruppy bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Multi-phase algorithm for solving the problem of planning the flight of unmanned aerial vehicles], *Trudy MAI* [Transactions of the Moscow aviation Institute], 2011, Issue 43, pp. 1-16.
26. Lyugger Dzh.F. Iskusstvennyj intellekt. Strategii i metody resheniya slozhnykh problem [Artificial intelligence. Strategies and methods to solve difficult problems]. Moscow: Vil'yams. 2005, 864 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Ф. Чебурахин.

Филимонов Александр Борисович – Московский технологический университет (МИРЭА); e-mail: filimon_ab@mail.ru; 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, 78; тел.: +79032929125; кафедра автоматических систем; д.т.н.; профессор.

Филимонов Николай Борисович – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; e-mail: nbfilimonjv@mail.ru; 119991, Москва, ГСП-2, Ленинские горы; тел.: +79165147102; кафедра физико-математических методов управления; д.т.н.; профессор.

Тихонов Владимир Юрьевич – Центр развития образования и международной деятельности «Интеробразование»; e-mail: bot-32@yandex.ru; 119021, Москва, Большой Чудов пер., 8, стр. 1; тел.: +79251552681; научный ассистент.

Filimonov Aleksandr Borisovich – Moscow Technological University (MIREA); e-mail: filimon_ab@mail.ru; 78, Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russia; phone: +79032929125; the department of automatic systems; dr. of eng. sc.; professor.

Filimonov Nikolay Borisovich – M.V. Lomonosov Moscow State University; e-mail: nbfilimonov@mail.ru; Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; phone: +79165147102; the department of physics and mathematical methods of control; dr. of eng. sc.; professor.

Tikhonov Vladimir Yurjevich – The centre for educational development and international activities; e-mail: bot-32@yandex.ru; 8, Bolshoi Chudov per., Moscow, 119021, Russia; phone: +79251552681; research assistant.