

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ «МУРАВЬИНЫХ АЛГОРИТМОВ» ПРИ РЕШЕНИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ТРАССИРОВКИ И РАЗМЕЖЕВАНИЯ

А.А. Емельянов (Москва), О.В. Булыгина (Смоленск), Н.З. Емельянова (Москва)

### Введение

Эффективность многих алгоритмов принятия решений, связанных с оптимизацией взаимного расположения объектов на поверхности Земли, определением маршрутов передвижения, прокладкой линий электропередач, размежеванием территорий, проверяется в первую очередь на задаче коммивояжера, которая является хорошим наглядным «тестовым полигоном». В настоящее время существует обширная база интересных задач о коммивояжере, о размежевании и методов их решения, что позволяет сравнивать эффективность вновь появляющихся алгоритмов оптимизации с ранее известными. Но, как правило, в современном региональном «хозяйстве» задача коммивояжера не решается изолированно от задач других типов. Более того, эти задачи часто решаются на фоне противоречивых ведомственных интересов в условиях неопределенности [2]. В результате процесс поиска становится эволюционирующим, и как следствие, возникают точки бифуркации на фазовой траектории этого процесса, и возникают ранее неизвестные аттракторные ограничения на саму процедуру поиска решения [1].

«Точное» решение задач о назначении с большим количеством исходных данных в условиях неопределенности и мультикритериальности практически невозможно. В связи с этим понятен интерес к разработке и применению методов искусственного интеллекта, в том числе и для решения задач о назначении. Однако есть и критика в отношении способов применения «интеллектуальных» методов, если их значимость абсолютизируется по сравнению с традиционными методами моделирования, включая имитационное. Например, Стивен С. Скиена, профессор кафедры вычислительной техники университета Стони Брук (Нью-Йорк), лауреат премии института IEEE, специалист по генетическим алгоритмам пишет [7]: «Я лично никогда не сталкивался ни с одной задачей, для решения которой такие алгоритмы оказались бы самым подходящим средством». Действительно, если классические методы соседствуют с метрологией, то «интеллектуальные» ближе к квалиметрии. Истина скорее всего находится где-то между классическими и «интеллектуальными» методами, возможно – на стыке. Одно из решений – это комплексное их использование.

В связи с вышесказанным в статье рассматривается гибридная имитационная модель, которая использует в качестве «интеллектуальной» программной функции одну из разновидностей муравьиного алгоритма. Эта функция подключается к системе имитационного моделирования *Astor Pilgrim* и позволяет решать задачу о назначении (коммивояжера и размежевания) с привязкой к топографическим картам. Внутренняя геоинформационная система пакета [3] позволяет моделям работать практически с любым регионом или акваторией России, кроме Северной Полярной Шапки – с топоосновой средних и крупных масштабов (пример фрагмента карты показан на рис. 1).

Выбор системы имитационного моделирования был предопределен благодаря проведенным за последние пять лет удачным экспериментам по комплексному использованию *pilgrim*-моделей и адаптивных нечетких контроллеров для решения задачи о назначении в сложных ситуациях в реальном времени событий [5].

### Рабочий пример задачи трассировки и размежевания

Особенности задачи рассмотрим на учебном гипотетическом примере. Имеется территория региона в составе: Смоленская область – полностью, а также «соседи» – прилегающие территории Брянской, Московской, Псковской, Тверской, Витебской и Могилевской областей, которые относятся к России и Белоруссии. Смоленская область является неким хабом для соседей в смысле передачи энергии и энергоносителей, поэтому по условиям задачи нужно рассматриваемую территорию поделить и разграничить на две примерно равные части, причем через некоторые определенные населенные пункты каждой из частей должны быть проложены траектории кратчайших путей без пересечений. Нужно учитывать, что территория большая, и Земля – почти эллипсоид. Кроме того, существуют дополнительные многочисленные ограничения, и решить точно поставленную задачу с использованием современной ГИС и «четких» алгоритмов оптимизации при таких условиях нереально. Единственная гипотетическая помощь тем, кто собирался решать эту задачу, было выделение двух вертолетов, которые можно было использовать одновременно. Это обстоятельство стало «решающей подсказкой» при выборе метода решения.



Рис. 1. Фрагмент электронной топографической карты ГИС Pilgrim (скриншот)

### Используемые свойства муравьиных алгоритмов

Положительные результаты по «получению пользы» от изучения алгоритмов поведения муравьев были достигнуты Марко Дориго (Брюссель) в 1992 г. Особенность существования и жизнедеятельности муравьиной колонии заключается в том, что *муравей не имеет центральной нервной системы*. Он не может рассматриваться как мыслящее существо. Однако известно, что муравьиная колония обладает довольно своеобразными «псевдоинтеллектуальными» свойствами и может реализовывать весьма «разумные» алгоритмы поведения. За десять лет М. Дориго создал направление искусственного интеллекта на этой основе [6]. Некоторые особенности поведения муравьиной колонии как «кибернетического организма» рассмотрены в [3,6]. Вкратце перечислим свойства, используемые в предлагаемом методе.

Колония не имеет централизованного управления, и ее особенностью является обмен локальной информацией только между отдельными особями (прямой обмен – пища, визуальные и химические контакты). Наличие непрямого обмена информацией между всеми осуществляется с помощью *феромонов*, которых существует более двадцати. Самые нужные в нашем случае – феромон пищи и феромон опасности.

Адаптивность поведения муравьиной колонии реализуется испарением феромона, который в природе воспринимается муравьями в течение нескольких суток. Можно провести некоторую аналогию между распределением феромона в окружающем колонию пространстве и «глобальной» памятью муравейника, носящей динамический характер. Такой аналог позволяет существенно упростить формальное описание имитационных моделей, реализующих муравьиные алгоритмы в виде компьютерных программ.

Очевидная *положительная обратная связь* быстро приведет к тому, что кратчайший путь станет единственным маршрутом движения большинства муравьев. Но процесс испарения феромона является основой *отрицательной обратной связи*, которая гарантирует нам, что найденное локально оптимальное решение не будет единственным – муравьи будут искать и другие пути.

Решения задач ориентации в моделях можно проводить с использованием одного из двух муравьиных алгоритмов: 1) поиска и доставки пищи в муравейник; 2) раздела территории между двумя колониями. Оба алгоритма имеют достоинства и недостатки. Муравьиный алгоритм поиска и доставки пищи в муравейник [4] – это поведение муравьев, связанное с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь. При своем движении муравей метит свой путь *феромоном пищи*, и эта информация используется другими муравьями для выбора пути. Предлагаемый ниже новый метод основан на особенностях *феромона опасности*.

### Динамическая модель системы управления

Рассмотрим имитационную модель (рис. 2), которая предназначена для моделирования системы адаптивного управления при поиске субоптимальных маршрутов. Модель представлена в соответствии с графическим стандартом в системе Actor Pilgrim и в операторах языка этой системы моделирования.

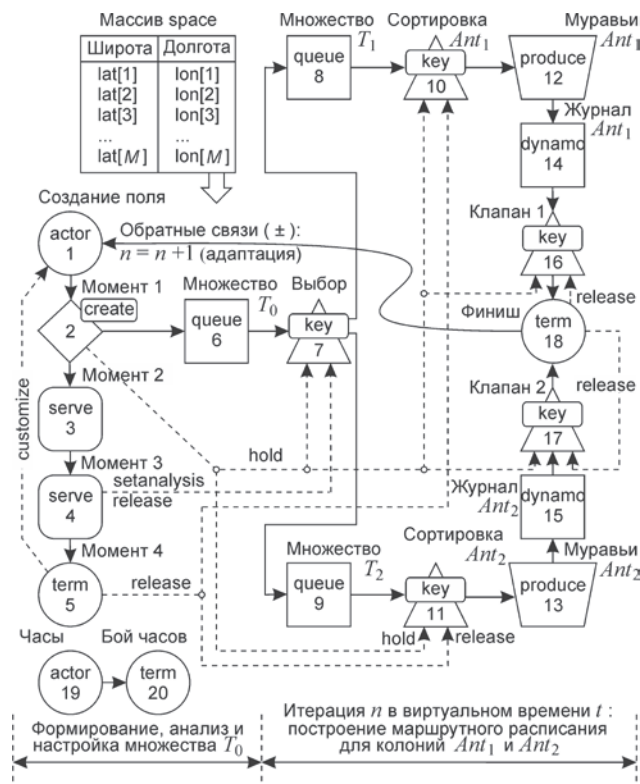


Рис. 2. Схема имитационной модели в Actor Pilgrim с функцией setanalysis, реализующей муравьиный алгоритм во время выполнения модели

Чтобы легче разобраться с работой модели, отметим некоторые её особенности. В этой модели оператор *setanalysis* выполняет обращения к одноименной функции, реализующей рассматриваемый алгоритм поиска и размежевания территории двумя муравьями. Особенностью модели является наличие динамической памяти, состоящей из трёх элементов: 1) «Массив *space*» – структурный массив пунктов; фактически – это маршрутное расписание с заданным порядком, но неизвестными временами; 2) «Журнал *Ant<sub>1</sub>*» – узел типа *dynamo*, динамическая очередь, выполняющая функции маршрутного журнала муравья-«землемера» *Ant<sub>1</sub>* первой колонии; 3) «Журнал *Ant<sub>2</sub>*» – также узел типа *dynamo*, маршрутный журнал муравья-«землемера» второй колонии.

Память работает следующим образом (см. рис. 2 и рис. 3). В начальный момент в массив *space* помещена информация обо всех пунктах посещения в произвольном порядке (для определённости в алфавитном порядке), кроме двух пунктов, для которых установлен иной порядок на время поиска решения:

$A_{\text{старт}}$  – на первом месте помещён пункт старта вертолёта (Брянск); в модели это место расположения главного муравейника первой колонии, откуда начинается движение муравей *Ant<sub>1</sub>*;

$A_{\text{финиш}}$  – на последнее место (в нашем случае это позиция Кардымово) помещён пункт финиша вертолёта; в модели это место расположения главного муравейника второй колонии, откуда начинается движение муравей *Ant<sub>2</sub>*.

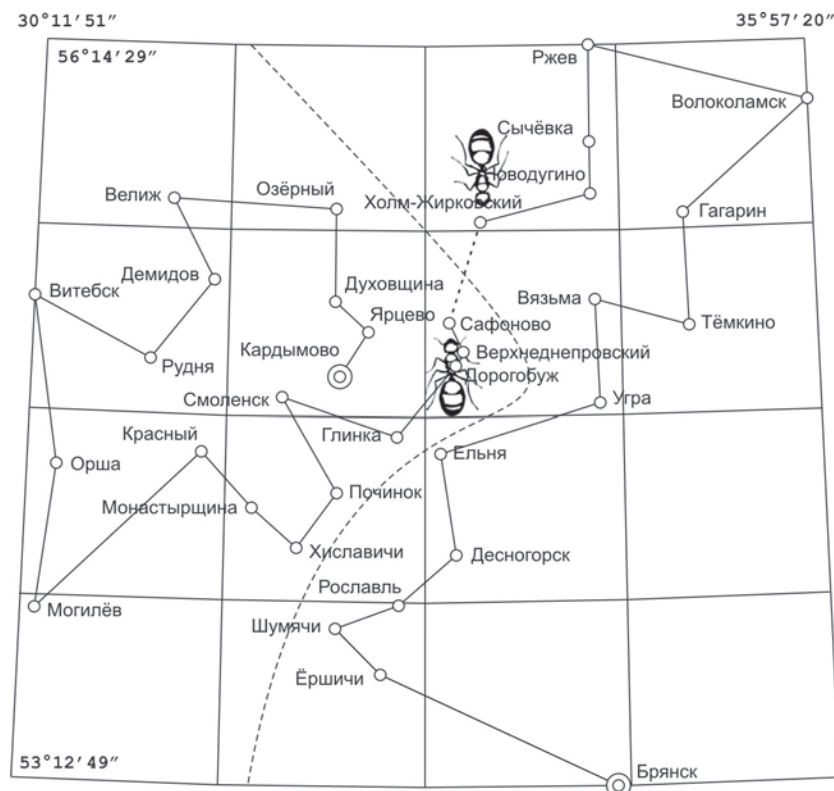


Рис. 3. Результаты третьей итерации: территория поделена на две части; построены два кратчайших маршрута практически одинаковой длины для каждой из частей

При подготовке очередной итерации функция *setanalysis* разыгрывает минимаксную игровую задачу двух партнеров *Ant<sub>1</sub>* и *Ant<sub>2</sub>*. Исходные данные в это время из массива *space* помещены в рабочую очередь «Множество  $T_0$ » – узел № 6 *queue*, которая заблаговременно закрыта ключом № 7. В этой очереди все пункты находятся в том же порядке, каков был установлен в массиве *space*.



Отличной особенностью Actor Pilgrim является развитая система динамических приоритетов с разными правилами и алгоритмами назначения (в том числе и fuzzy – нечеткими [5]), которая используется функцией *setanalysis*. Эта функция записывает информацию о решении игровой задачи в виде динамических приоритетов в соответствующие информационные элементы акторов, находящихся в очереди «Множество  $T_0$ ». Назначение акторов такое: каждый актор – это запрос на посещение конкретного пункта, причём в запросе имеется информация, предназначенная для последующей адаптации.

Далее, в соответствии с этими приоритетами акторы рассортировываются на два множества: «Множество  $T_1$ » и «Множество  $T_2$ ». Затем акторы поступают в распоряжение узлов модели «Муравьи  $Ant_1$ » и «Муравьи  $Ant_2$ », где происходит собственно имитация во времени поведения муравьёв  $Ant_1$  и  $Ant_2$ . Отработанные акторы поступают постепенно в «Журнал  $Ant_1$ » и «Журнал  $Ant_2$ », где порядок уже иной: он соответствует результатам решения *игровой задачи* и *маршруту*, выполненному каждым из муравьёв.

Далее, если маршрут не вполне устраивает конечного пользователя, с его разрешения «Массив *space*» модифицируется: в него помещается итоговое маршрутное расписание муравьёв  $Ant_1$  и  $Ant_2$ , и выполняется следующая итерация. Как и прежде, пункт  $A_{\text{старт}}$  – на первом месте (Брянск), а  $A_{\text{финиш}}$  – на последнем месте (Кардымово).

### Заключение

Функция *setanalysis* реализована на C++ и включена в состав Actor Pilgrim, что отражено в документации и в новом учебнике, который готовится к изданию. По итогам выполненной разработки можно сделать краткие выводы.

1. Новизна разработанного метода состоит в том, что он основан на «общении муравьёв» посредством феромона опасности, а не феромона пищи. В результате применение игрового алгоритма существенно ускоряет сходимость процедуры поиска в смысле количества итераций, если сравнивать с аналогичными опубликованными алгоритмами [4], работающими на основе феромона пищи.

2. В учебном процессе подготовки магистров направления «Прикладная информатика» поставлены лабораторные работы по дисциплине «Имитационное моделирование». С учетом новых возможностей планируется модернизация рабочих программ для введения тематики по гибридным моделям.

## Литература

1. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Емельянова Н.З., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении / под ред. А.А. Емельянова. 2-е изд. М.: ФОРУМ – ИНФРА-М, 2017. 450 с.
2. Гимаров В.В., Глушко С.И., Дли М.И. Конфигурирование информационных и транспортных сетей в условиях неопределённости // Прикладная информатика. 2012. № 6 (42). С. 81–85.
3. Емельянов А.А., Емельянова Н.З. Технология работ с топографической информацией в имитационных моделях Actor Pilgrim // Прикладная информатика. 2013. № 4 (46). С. 65–91.
4. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. 2003. № 4 (4). С. 70–75.
5. Emelyanov A.A., Bulygina O.V., Dli M.I., Emelyanova N.Z. Simulation modeling and fuzzy logic in real-time decision-making of airport services // Journal of Applied Informatics. 2017. Vol. 12. No. 2 (68). P. 99–105.
6. Dorigo M., Birattari M., Stützle T. Ant colony optimization: artificial ants as a computational intelligence technique // IEEE Computational Intelligence Magazine. 2006. No. 1 (4). P. 28–39.
7. Skiena S.S. The algorithm design manual. 2nd edition. London: Springer-Verlag London Limited, 2008. 740 p.