

ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТ С ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

А.А. Емельянов (Москва-Смоленск)

Введение. *Топографическая карта* – географическая карта универсального назначения, на которой подробно изображена местность. Топографическая карта содержит сведения об опорных геодезических пунктах, рельефе, гидрографии, растительности, грунтах, хозяйственных и культурных объектах, дорогах, коммуникациях, границах и других объектах местности. Специальные математические приемы и геометрические проекции позволяют решать экономические, технические, экологические задачи, а также задачи гражданской защиты с высокой точностью привязки к местности.

Топографические изображения подразделяют на планы, крупномасштабные, среднemasштабные и мелкомасштабные карты (табл. 1)

Таблица 1

Типы топографических изображений

№	Типы топографических планов и карт	Диапазон масштабов		Диапазон масштабов	
		от:		до:	
		относительный	метрический	относительный	метрический
1	Планы местности	1:1000	в 1 см 10 м	1:5000	в 1 см 50 м
2	Крупномасштабные	1:10 000	в 1 см 100 м	1:100000	в 1 см 1 км
3	Среднемасштабные	1:200 000	в 1 см 2 км	1:1 000 000	в 1 см 10 км
4	Мелкомасштабные	Менее 1:1 000 000	в 1 см 10 км	1:5 000 000	в 1 см 50 км

В гражданских проектах разрешено использовать крупномасштабные карты, обладающие высокой относительной точностью, на которых отсутствуют условные обозначения оборонных объектов и «сетки» военных карт:

- атласы Роскартографии на бумажных носителях и на DVD, появляющиеся в свободной продаже, в масштабах не крупнее 1:100 000 (в 1 см 1 км);
- электронные растровые карты ФГУП «Госгисцентр» (ГГЦ-карты) в масштабах 1:100 000 (в 1 см 1 км), 1:50 000 (в 1 см 500 м) и 1:25 000 (в 1 см 250 м).

ГГЦ-карты могут закачиваться в GPS-навигаторы или использоваться в приборах ГЛОНАСС. Но проведение с помощью приборов GPS и ГЛОНАСС точных измерений и вычислений невозможно без специальных программных корректировок, поскольку абсолютная точность привязки соответствующих навигационных систем страдает из-за наличия временного «дрейфа» точки пересечения поверхности эллипсоида Земли «вертикалью» спутника – условной линии, соединяющей спутник с центром эллипсоида; причем у каждого спутника свой дрейф. У топографических карт привязка иная.

Задачи поиска решений на местности. Типовыми задачами, в которых необходимо использовать точную топографическую информацию, являются: прокладка маршрутов движения техники в новых меняющихся условиях (в т.ч. при возникновении ЧС), определение путей прокладки линий электропередач и монтажа новых подстанций, решения по топологии кабельных информационных сетей, прокладка маршрутов нефте- и газо-трубопроводов, монтаж новых сетей водоснабжения, размежевание территории, анализ обеспечения населения энергией, товарами и услугами. Остановимся

на родственных, с математической точки зрения, задачах маршрутизации и размежевания, которые традиционно считаются *задачами статической оптимизации*, решаются различными средствами, самым мощным из которых является динамическое программирование.

Типичным примером является задача коммивояжера. При полном отсутствии ограничений (например, коммивояжер использует вертолет), если пункт старта и пункт финиша – это один пункт, причем неважно – какой, задача имеет единственное решение определения кратчайшего маршрута. Однако при появлении ограничений на пункты, маршруты, допустимые ландшафтные условия, стоимость путей и пропускные способности, количество вариантов становится практически неограниченным сверху, и применение динамического программирования становится проблематичным.

В таком случае можно предложить *мощное решение*: от методов статической оптимизации перейти к динамической модели адаптивной поисковой системы, обладающей особой памятью, контурами положительной и отрицательной обратных связей по управлению [3], т.е. построить динамическую модель дискретно-непрерывной системы. *Память* системы предназначена для запоминания информации о последних маршрутах. При выполнении очередной итерации эта память содержит информацию об уже посещенных пунктах. *Положительная обратная связь* предназначена для «консервирования» удачных маршрутов. *Отрицательная обратная связь* работает иначе. Если последнее удачное решение, улучшившее маршрут, имеет номер i , а на следующей итерации более удачное решение не получено, то приоритет решения i уменьшается, используется «законсервированный» маршрут, но коэффициент усиления по отрицательной обратной связи увеличивается, и начинаются случайные попытки поиска новых отрезков пути и их продолжений при достижении каждого пункта. Через конечное число итераций приоритет последнего решения станет нулевым, а поиск уже будет постоянным, и так до тех пор, пока либо не будет найдено более удачное решение, либо процесс поиска не будет принудительно остановлен. В системе есть три регулятора, управляемые ЛПР: коэффициенты усиления в контурах положительной и отрицательной обратных связей и срок хранения в положительном состоянии приоритета последнего удачного решения.

Типичным аналогом рассмотренной гипотетической системы является муравьиная колония [5]. Этот аналог впервые использовал Марко Дориго, Бельгия (более 200 работ за 20 лет по муравьиным и генетическим алгоритмам). Муравей – насекомое, не имеющее развитой центральной нервной системы. Но муравьиная колония коллективно «вполне разумна» с позиций искусственного интеллекта. Память муравьев основана на феромонах – летучих нановеществах. Обнаружено более 20 видов феромонов, с помощью которых муравьи и еще и «общаются». В своих алгоритмах М. Дориго использовал свойства *феромона пищи*.

Муравьиный алгоритм поиска и размежевания территории (феромон опасности). Этот авторский алгоритм [3] основан на следующих предпосылках. Предположим, что в пунктах $A_{\text{старт}}$ и $A_{\text{финиш}}$ находятся две муравьиные колонии (условно обозначим эти колонии и муравьев из колоний как Ant_1 и Ant_2), которые должны решить следующую задачу: всю территорию нужно поделить на две зоны ответственности, чтобы:

- между зонами можно было демаркировать условную границу;
- в процессе размежевания муравьи из разных колоний держатся дальше друг от друга под воздействием феромона опасности;
- внутри каждой зоны во время итерации строится субоптимальный маршрут;
- прокладка маршрута проходит в виртуальном абсолютном времени;
- только в конце каждой итерации представители разных колоний оказываются ближе всего друг к другу (до этого они стараются держаться подальше друг от друга);

- для простоты полагаем, что гнезда метят феромоном опасности – как бы «запирают» для последующего освоения колонией, из которой вышел «муравей-землемер»;
- муравей, находящийся в движении к очередному пункту, чтобы включить его в состав своей зоны, не может планировать наперед посещение другого пункта, так как другой муравей тоже находится в движении и может раньше и спланировать, и занять его, а конфликты запрещены феромоном опасности.

При этом задача коммивояжера может быть сведена к минимаксной игровой задаче двух партнеров, оптимизация решения которой достигается за счет выбора ближайшего пункта с максимальной вероятностью принадлежности к своей зоне ответственности. Если определить множество Ω , уменьшающееся после каждой итерации на один элемент, как набор нераспределенных пунктов, не принадлежащих ни к одной зоне, то условие выбора

можно записать так:

$$\max_{\substack{k \in \Omega \\ \{i,j\} \notin \Omega}} \left\{ p_{ik} = 1 - \frac{d_{ik}}{d_{ik} + d_{kj}} \right\}.$$

Маршруты «муравьев-землемеров» заканчиваются в каких-то двух соседних пунктах.

Имитационная модель адаптивной поисковой системы. Функциональная схема модели в системе графических обозначений ActorPilgrim [1] представлена на рис. 1. Особенностью модели [3] является наличие памяти, состоящей из:

1) «Массива space» – массив пунктов; фактически – это маршрутное расписание с заданным порядком, но неизвестными временами;

2) «Журналов Ant_1 и Ant_2 » – узлов типа dynamo, динамических очередей, выполняющих функции маршрутного журнала муравьев-«землемера» Ant_1 и Ant_2 .

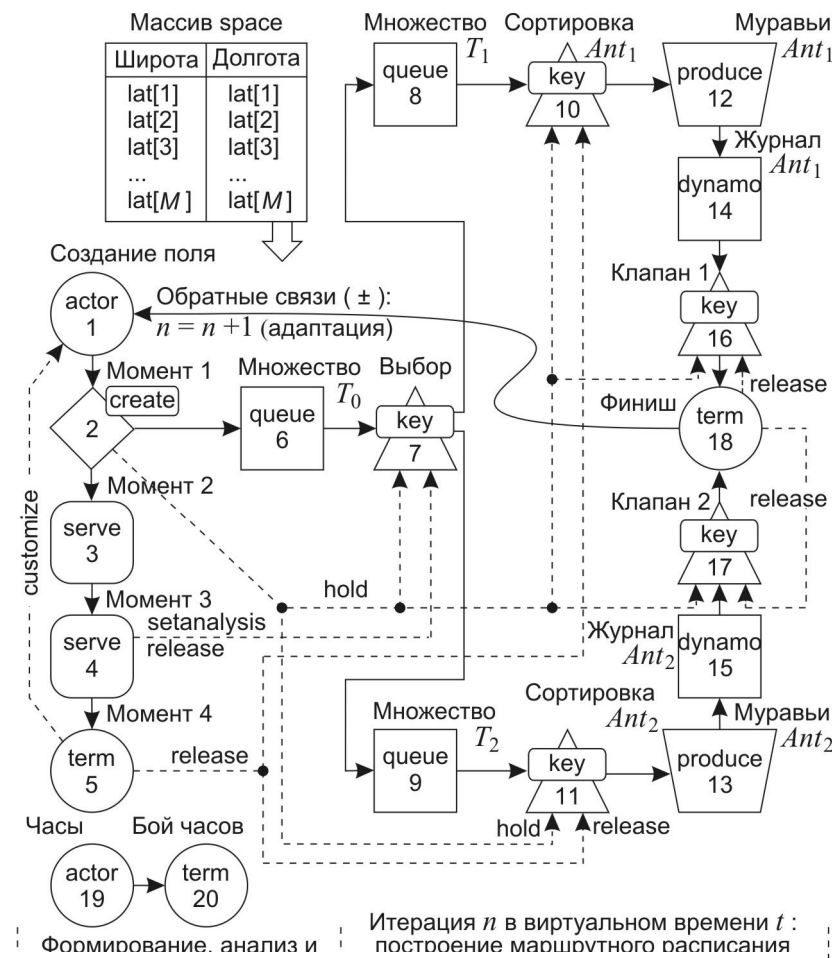


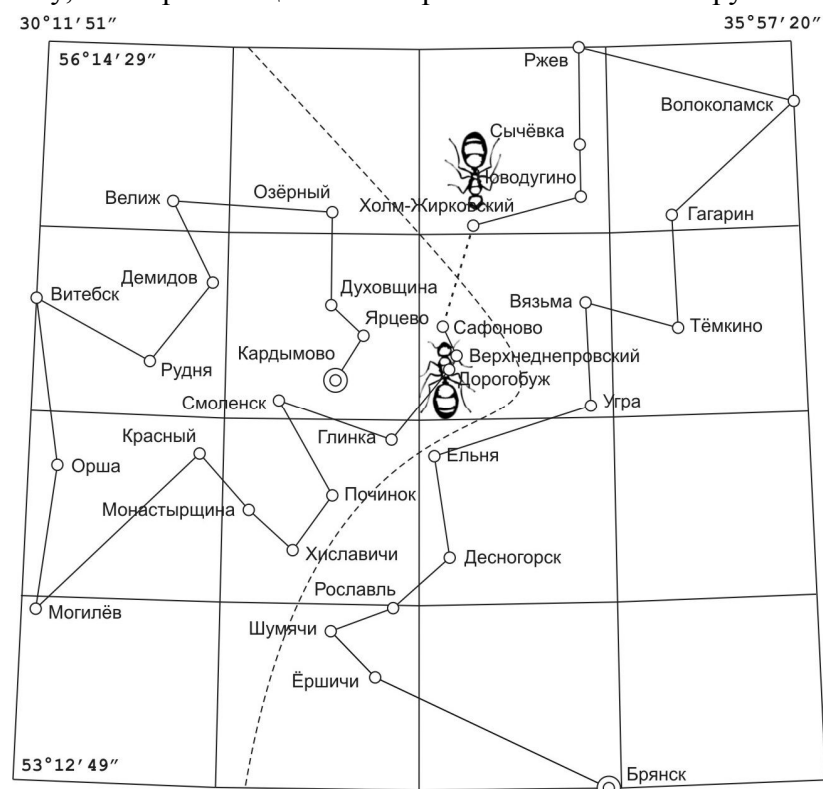
Рис. 1. Имитационная модель работы адаптивной системы «Муравьиная колония»: алгоритм размежевания территории

полняющих функции маршрутного журнала муравьев-«землемера» Ant_1 и Ant_2 . При подготовке очередной итерации функция *setanalysis* разыгрывает минимаксную игровую задачу двух партнеров. Адаптация осуществляется после завершения итерации – переформированием «Массива space», используя «Журналы Ant_1 и Ant_2 ». Если отрицательная обратная связь не работает, то поиска не будет.

На рис. 2 представлен вариант решения конкретной задачи, полученный после третьей итерации. При наличии такой модели остается только спланировать эксперимент [2], выбрать и ввести в ActorPilgrim необходимые электронные карты.

Программная привязка растровой топографической карты к географическим координатам Земли в ActorPilgrim. Авторы имели многолетний опыт работы с платформами ESRI (Environmental Systems Research Institute): начинали с ArcView, затем ArcInfo и ArcGIS. Имелся опыт работы и с платформой MapInfoProfessional. Принципиальных трудностей стыковки оболочки ActorPilgrimc нет: они предусмотрены. Однако есть значимые технологические трудности [3].

Первая. В 100% случаев задания на разработку новых Pilgrim-моделей были связаны с территориями, для которых исторически не было крупномасштабной топографической информации ни в одной базе. Возникла необходимость, во-первых, получения ее и, во-вторых, поддержки технологической линии ввода этой информации послойно в соответствующую базу, что организационно непросто – в связи с «крупномасштабностью» и по некоторым



иным причинам. В лучшем случае новая информация – электронный растр, в худшем – крупномасштабные топографические бумажные карты или старые, но точные кальки, созданные когда-то опытными геодезистами.

Вторая. Для использования указанных платформ в качестве средства индикации во время выполнения требовалось запрограммировать соответствующие приложения средствами этих платформ – практически для каждой модели свое приложение.

Рассмотрим методику привязки новой карты по эталонным точкам A_1 и A_2 на ней, координаты которых известны: например, это могут быть точки пересечения основных параллелей и меридианов.

Данная авторская методика (математическое и программное обеспечение [3]) использует особый математический аппарат – сферическую тригонометрию Феодосия Николаевича Красовского [4].

Основные этапы этой методики (см. обозначения на рис. 3):

1. *Определение угла ψ между крайними меридианами, используя референц-эллипсоид [4] с радиусами: 6 378 245,000 м (экватор); 6 356 863,019 м (полюс).*
2. *Привязка карты по долготе.*
3. *Привязка карты по широте.*
4. *Определение географических координат точек на карте, необходимых для последующих измерений и формирования растровых образов.*

Технология, реализованная в оболочке ActorPilgrim, сократила время соответствующей настройки моделей для доступа к информации с недели до десятков минут (в пределах часа). Ввод новой информации в ГИС-базы одной из вышеуказанных платформ выполнялся, но по факту – уже после проведения модельных экспериментов, всех измерений и принятия на их основе решений; возможны были и такие решения, после которых необходимость ввода в ГИС отпадала. Рассмотренные выше методы использовались при решении конкретных задач на территориях Удмуртии, Московской и Смоленской областей.

В заключение можно сделать некоторые выводы.

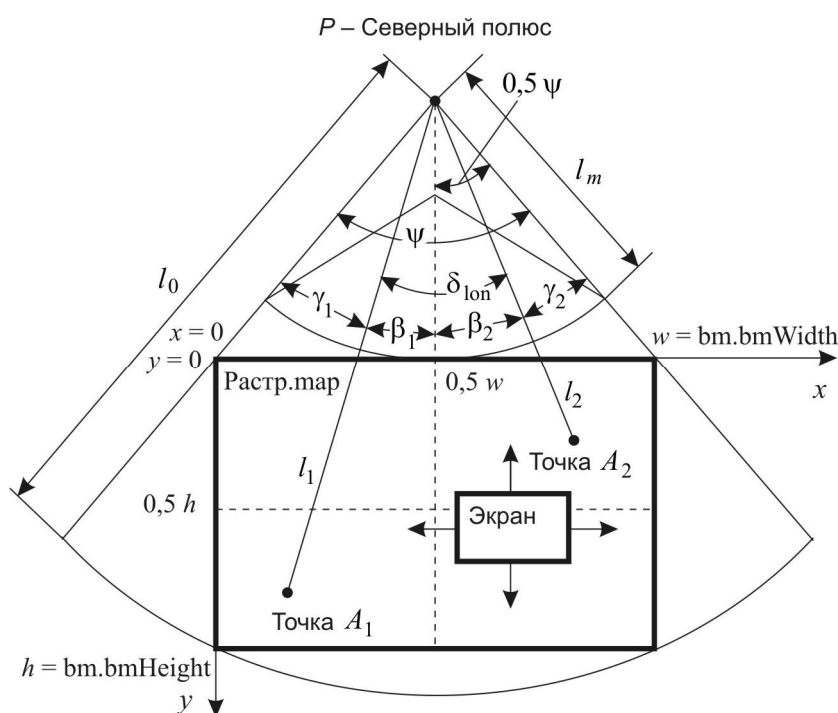


Рис. 73. Схема привязки электронной растровой карты в оболочке Actor Pilgrim

1. Без точного представления пространства в компьютерной модели (в рамках точности топографических карт) невозможно обеспечить точность результатов имитационного моделирования экономических и иных процессов в регионе, хотя бы в пределах относительных погрешностей используемых карт. Компьютерное представление пространства региона строится на математической основе, элементами которой на карте являются координатные сетки, масштаб и геометрическая проекция развертки.

2. Динамический муравьиный алгоритм «размежевания территории» для минимизации маршрутов при наличии существенных ограничений обладает более быстрой сходимостью по сравнению с ранее известными муравьиными алгоритмами. Однако он имеет общий для подобных эвристических алгоритмов недостаток: при достижении конечного варианта маршрута нет возможности доказать, построен ли кратчайший путь.

3. Растровые карты очень нужны, но только для съема информации при планировании эксперимента, когда на основе топографической информации с помощью программных средств (в данном случае – оболочки ActorPilgrim) в модели создаются векторные образы пространства (точки, линии, геометрические фигуры), элементы которых участвуют в модельных расчетах после съема всей необходимой информации с крупномасштабных растровых карт. В процессе прогона модели растровые карты либо используются для наглядной справочной индикации, либо не нужны.

Литература

1. Емельянов А.А. Концепция и возможности акторно-ориентированной системы имитационного моделирования ActorPilgrim: Ч. I // Прикладная информатика. – 2012. – № 6 (42). – С. 49–66; Ч. II // Прикладная информатика. – 2013. – № 1 (43). – С. 41–53.

2. **Емельянов А.А.** Планирование экстремальных экспериментов с имитационными моделями // Прикладная информатика. – 2013. – № 3 (45). – С. 76–90.
3. **Емельянов А.А., Емельянова Н.З.** Технология работ с топографической информацией в имитационных моделях ActorPilgrim// Прикладная информатика. – 2013. – № 4 (46). – С. 65–91.
4. **Красовский Ф.Н.** Избранные сочинения. Т. 1. – М.: Геозедиздат, 1953. – 374 с.
5. **Coloni A., Dorigo M., Maniezzo V.** Distributed Optimization by Ant Colonies. – In: European Conference on Artificial Life, Paris, France: Elsevier Publishing. – 1994. – Vol. 3/4, P. 134–142.