

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А. В. МАЛЫШЕВ¹, В. И. ГОРОДЕЦКИЙ², О. В. КАРСАЕВ³, В. В. САМОЙЛОВ⁴,
В. В. ТИХОМИРОВ⁵, Е. В. МАНЬКОВ⁶

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<{¹a.malyshev, ²gor, ³ok, ⁴samovl, ⁵tikhomirov, ⁶eman}@iias.spb.su>

УДК 681.3.053:681.32:007.5

Малышев А. В., Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Тихомиров В. В., Маньков Е. В. Многоагентная система для разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве // Труды СПИИРАН. Вып. 3, т. 1. — СПб.: Наука, 2006.

Аннотация. Рассматривается проблема оперативного планирования движения воздушного транспорта в районе аэропорта при появлении захваченного самолета в данной области. В работе представляется проект многоагентной системы для разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве. В системе использовано представление воздушного пространства в области аэропорта в терминах сценарных баз знаний, механизм вывода которой был применен при построении плана движения отдельного самолета. Демонстрируются результаты работы реализованного прототипа данной многоагентной системы. — Библи. 9 назв.

UDC 681.3.053:681.32:007.5

Malyshev A. V., Gorodetsky V. I., Karsaev O. V., Samoilov V. V., Tikhomirov V. V., Mankov E. V. **Multiagent system for airspace deconfliction** // SPIIRAS Proceedings. Issue 3, vol. 1. — SPb.: Nauka, 2006.

Abstract. This paper concerns the problem of airspace traffic management in the airport area with a hijacked airliner presence. A design of a multiagent system for the problem is presented here. Airspace area around of an airport is formalized with the scenarios knowledge base language which inference functions are used to build a path of an airliner. Results of an implemented prototype of the multiagent system are introduced here. — Bibl. 9 items.

1. Введение

Рассматривается процесс управления воздушным движением в районе аэропорта. Рассматриваемая область включает в себя взлетно-посадочные полосы (ВПП), зону круга (25–30 км от центра аэродрома) и зону подхода (75–100 км от центра аэродрома). Эта область разбита на коридоры и круги ожидания, которые могут быть эшелонированы по высоте и по которым осуществляется движение воздушного транспорта. В начальный момент имеется множество самолетов, находящихся в этой области, часть из которых находится в воздухе и имеет своей целью совершить посадку на данном аэродроме, другая часть находится на земле и готовится к вылету. Движение этих самолетов заранее спланировано и у диспетчера уже имеется расписание для них. Это расписание позволяет осуществлять воздушное движение с соблюдением всех правил из Наставлений по Производству Полетов (НПП), из которых обеспечение безопасных расстояний между самолетами будет являться ключевым в данной работе. Далее, в какой-то момент времени появляется захваченный самолет, который не подчиняется командам диспетчера и не соблюдает НПП. Известно только его положение и вектор скорости. Предполагается, что этот самолет будет двигаться прямолинейно. Перед диспетчером встает задача спланировать

движения остальных самолетов так, чтобы не возникло опасных сближений (следует заметить, что нормы безопасных расстояний от обычного самолета до захваченного больше, чем между обычными самолетами), но при этом каждый самолет должен приземлиться и по возможности на данном аэродроме. Так как все самолеты перед вылетом обеспечиваются топливом, необходимым для совершения всего полета по маршруту плюс запас, который обычно, соответствует примерно одному часу полета, то потенциально диспетчер имеет возможность перенаправить самолет на ближайший аэродром.

Целью в данной работе было создание проекта многоагентной системы для разрешения конфликтных ситуаций, которые могут возникнуть в воздушном движении в районе аэропорта при появлении в ней захваченного самолета при минимальном вмешательстве диспетчера в процесс управления. Цель такой многоагентной системы состоит в обеспечении для каждого «нормального» самолета, находящегося в зоне аэропорта, или безопасной посадки или в обеспечении безопасного перелета (ухода из зоны аэропорта) на другой аэропорт независимо от траектории движения захваченного самолета. Критериальный базис должен формироваться таким образом, чтобы обеспечить разрешение конфликтной ситуации за самое короткое время с учетом запасов топлива самолетов, находящихся в воздухе, при соблюдении пространственных стандартов безопасности, принятых в авиации, и соблюдении описанной выше политики обеспечения безопасности переходов самолета из одного ресурса воздушного пространства в другой при минимальном вмешательстве диспетчера в процесс управления.

Разрешение конфликта в рассматриваемом классе задач (планирование, составление расписания и исполнение плана) начинается тогда, когда в систему поступает событие, информирующее нормальные самолеты о появлении захваченного самолета. Это событие поступает от диспетчера ко всем нормальным самолетам, присутствующим в зоне аэропорта, в широкоэшелонном режиме. Решение задачи заканчивается тогда, когда либо все нормальные самолеты совершили посадку или покинули зону аэропорта, либо захваченный самолет исчез из зоны аэропорта (независимо от причины).

2. Алгоритм

2.1. Топология воздушного пространства

Описываемая далее топология воздушного пространства в районе аэропорта является абстракцией, которая, с одной стороны, демонстрирует основные понятия, используемые в ней, ее компоненты и их структуризацию, а с другой стороны, представляет топологию, которая далее используется в демонстрационном прототипе. Она была построена на основе данных о топологии аэропортов в районе Москвы [1], топологии аэропорта «Пулково» [2], а также с использованием консультаций специалистов Академии гражданской авиации, г. Санкт-Петербург, Россия.

В воздушном пространстве в районе аэродрома различаются три зоны:

- 1) ближняя зона аэропорта;
- 2) зона подхода;
- 3) зона ожидания в районе аэропорта.

Ближняя зона аэропорта состоит из одной или нескольких взлетно-посадочных полос и одного или нескольких кругов (взлета и захода на посадку)

для каждой взлетно-посадочной полосы. Круги в этой зоне рассматриваются как части траекторий самолетов, которые ведут из зоны подхода через круг (или напрямую) на взлетно-посадочную полосу (при посадке) или от нее (при взлете). Взлет и посадка могут быть организованы в двух противоположных направлениях (в зависимости от направления ветра), но обязательно в одинаковом направлении для всех взлетно-посадочных полос.

Зона подхода состоит из нескольких коридоров, соединяющих зону ожидания (или зону ухода самолетов) и ближнюю зону (зону взлета и посадки). Каждый из этих коридоров имеет фиксированную *точку выхода* из зоны ожидания и *точку входа* на посадочный круг (часть траектории) или наоборот. Коридором называется область трехмерного пространства, прямоугольного сечения (заданной ширины и высоты) вдоль центральной линии, задающей эталонную траекторию движения самолета внутри коридора, для которой заданы трехмерные координаты точек входа в коридор и выхода из него.

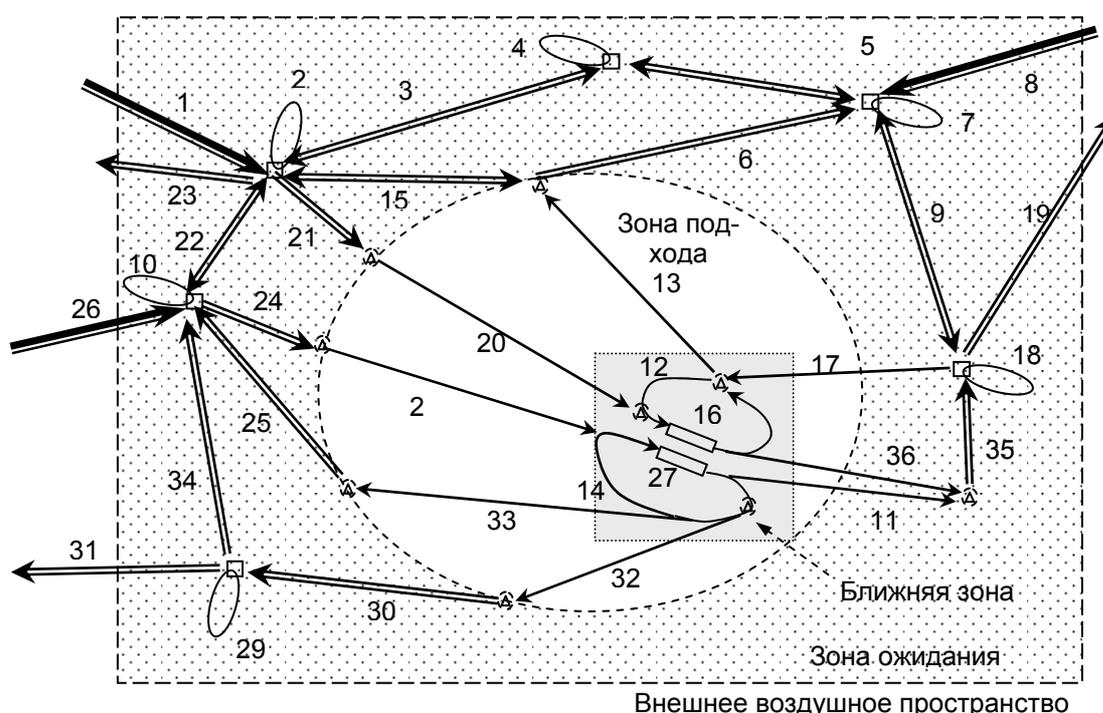
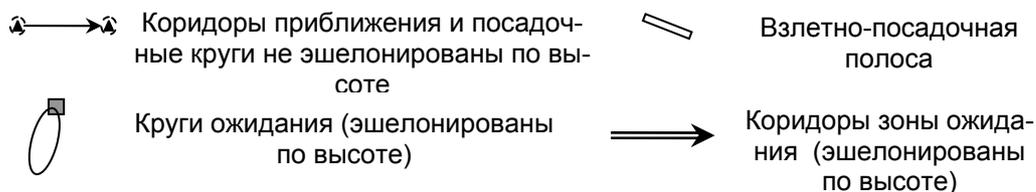


Рис. 1. Пример, иллюстрирующий топологию (геометрию и структуру) разбиения и использования воздушного пространства в районе некоторого (абстрактного) аэропорта (стрелка показывает возможные направления движения по коридору).



Зона ожидания в районе аэропорта состоит из нескольких зон (коридоров и кругов ожидания). Каждая названная компонента зоны ожидания имеет фиксированную (эталонную) *точку входа* и *точку выхода*, допустимые топологией зоны ожидания. Самолеты могут входить в зону ожидания либо из «внешнего» пространства, либо из зоны подхода (при взлете ее было бы правильнее назы-

вать зоной удаления). Каждый из коридоров зоны ожидания определяется таким же образом, как и в зоне подхода. Максимальная и минимальная высоты каждого коридора зоны ожидания постоянны вдоль его центральной линии (т.е. эти коридоры предполагаются горизонтальными). Подчеркнем еще раз, что коридоры, внутри которых могут двигаться самолеты в нормальной ситуации, заранее предопределены (это не относится к захваченному самолету). Некоторые коридоры зоны ожидания могут начинаться или заканчиваться кругами ожидания, по которым самолеты могут двигаться по указанию диспетчера для регулирования времени захода на посадку. Кругом ожидания называется горизонтальная область трехмерного пространства, прямоугольного сечения (заданной ширины и высоты) вдоль центральной линии, задающей эталонную траекторию движения самолета внутри круга, для которого заданы трехмерные координаты точки входа/выхода, центра круга и радиуса. При движении в коридоре или по кругу ожидания самолет может изменять высоту (эшелон) своего движения, перемещаясь в соседний сверху или соседний снизу эшелон.

Абстрактный пример, иллюстрирующий введенные понятия, описывающие допустимую топологию воздушного пространства в районе аэропорта, дан на рис. 1.

2.2. Предположения и упрощения модели предметной области

Представленный далее проект многоагентной системы основывается на следующих утверждениях относительно предметной области:

- 1) движение самолетов вне зоны аэропорта не рассматривается;
- 2) самолеты заходят в зону аэропорта через фиксированное множество точек (из предопределенных секторов) в фиксированных направлениях;
- 3) аэропорт имеет две взлетно-посадочные полосы;
- 4) самолет, вошедший в коридор зоны подхода, далее может входить на посадочный круг или прямо на посадку;
- 5) самолет, вошедший на посадочный круг, далее может двигаться только на посадку или покинуть его через фиксированный коридор зоны подхода (ухода);
- 6) самолет, вошедший в зону ожидания, может или ожидать разрешения на посадку, двигаясь по кругу ожидания в некотором эшелоне по высоте, или перейти в соседний по высоте коридор, или перейти в другой коридор, или перейти в зону подхода по разрешенному коридору;
- 7) в каждом коридоре, на круге ожидания, на посадочном круге, на взлетно-посадочной полосе может находиться только один самолет. Коридоры организуются таким образом, что при этом выполнены стандарты по расстоянию между самолетами по всем трем координатам;
- 8) коридоры зоны приближения и посадочные круги не эшелонированы по высоте, т.е. каждый из них может быть занят только одним самолетом;
- 9) если некоторый коридор или круг занят некоторым самолетом, то туда запрещается переход других самолетов. Считается, что при этом га-

рантируется выполнение стандартов по расстоянию между самолетами по всем трем координатам;

- 10) запас топлива любого самолета, включая захваченный, задан временем полета до истощения запаса топлива;
- 11) захваченный самолет может двигаться по любой траектории (с учетом технических возможностей самолета);
- 12) расстояния до ближайших аэропортов известны и заданы в терминах времен, необходимых самолетам для подлета и посадки на них. Эти аэропорты работают в нормальном режиме и могут принять самолеты в любое время.

Принимаются следующие упрощения относительно предметной области:

- 1) все самолеты, включая захваченный, движутся в районе аэропорта с одинаковой постоянной скоростью и обладают одинаковой скороподъемностью;
- 2) для каждого коридора, круга зоны ожидания и посадочного круга задано время, затрачиваемое самолетом для движения по нему от точки входа до точки выхода. Это упрощение следует из предположения о постоянстве скорости самолетов и скороподъемности;
- 3) захваченный самолет не согласует свое движение с диспетчером, однако в каждый момент, когда он не маневрирует, его движение прогнозируется на основании гипотезы о равномерности и прямолинейности его движения;
- 4) каждый коридор определяется координатами начальной и конечной точек его центральной линии. Таким образом, осуществляется привязка движения самолета к некоторой системе координат;
- 5) зона отчуждения вокруг захваченного самолета, в которой другим самолетам находиться запрещено, определяется следующим образом: это пространство внутри трубки прямоугольного сечения с заданными вертикальными и горизонтальными размерами относительно траектории захваченного самолета (например, размером 15 километров по ширине и 500 метров по высоте) и имеющей заданную длину вдоль траектории его движения от его текущей точки (например, 15 километров);
- 6) переход самолета из текущей позиции в некоторый другой коридор или эшелон, или круг запрещается, если новый коридор или круг заданного эшелона:
 - 6.1) в текущий момент занят другим самолетом, или
 - 6.2) имеет пересечение с зоной отчуждения, или
 - 6.3) не предусмотрен топологией аэропорта (см., например, рис. 1).
- 7) процесс планирования, составления расписания и его исполнения управляются событиями;
- 8) время, необходимое многоагентной системе управления для принятия решения о плане и расписании движения самолетов (независимо от типа события, вызвавшего необходимость управления), пренебрежительно мало по сравнению со временем, необходимым самолетам для выполнения маневра перехода или перемещения вдоль коридора или круга ожидания и посадки от точки входа до точки выхода.

2.3. Формальное описание планов перемещения самолетов

Каждый нормальный (незахваченный) самолет должен иметь план своего перемещения в пространстве, что позволит определять возможные конфликты с другими самолетами и координаты в любое заданное время. Представим план перемещения нормального самолета в виде последовательности использования ресурсов рассматриваемого воздушного пространства (коридоров, кругов ожидания, ВПП) на шкале времени. Например, на рис. 2. представлен план движения самолета из коридора 1 до коридора 16 (ВПП):

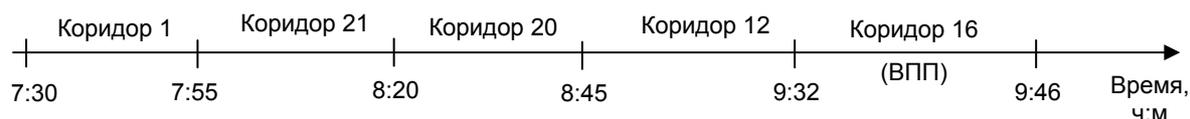


Рис. 2. План перемещения самолета в воздушном пространстве (указано абсолютное время относительно принятого момента начала отсчета).

Таким образом, зная координаты каждого из ресурсов можно определить положение самолета в пространстве в любой момент времени с точностью до отклонений от центральной линии, задающей эталонную траекторию движения самолета внутри коридора, для которой заданы трехмерные координаты точек входа в коридор и выхода из него.

План перемещения захваченного самолета представляется координатами, вектором скорости и временем, когда эти данные были получены. В соответствии с модельными упрощениями (постоянство модуля скорости и неизменности курса захваченного самолета) траектория движения захваченного самолета представляется линейным уравнением вида:

$$x = V_x \times t + x_0$$

$$y = V_y \times t + y_0,$$

$$z = V_z \times t + z_0$$

где V_x , V_y , V_z — компоненты вектора скорости; x_0 , y_0 , z_0 — положение самолета в момент засечки; t — время, прошедшее с моменты засечки. Таким образом, зная траекторию захваченного самолета и координаты всех ресурсов воздушного пространства, можно определить какие ресурсы и когда заняты захваченным самолетом как время пересечения зоны отчуждения вокруг захваченного самолета и центральной линии ресурса пространства.

2.4. Сценарий разрешения конфликтов

После того как в зоне аэропорта появился захваченный самолет, прогнозируется его дальнейшее движение и проверяется нарушение норм безопасных расстояний между самолетами. Сначала определяются коридоры и круги ожидания, которые пересекаются с зоной отчуждения захваченного самолета в момент нахождения на них обычных самолетов (обозначим их как «проблемные самолеты»). Зада состоит в том, чтобы перепланировать движение самолетов так чтобы таких нарушений не было, тем самым обеспечив ненарушение принятых норм безопасных расстояний между самолетами. Концептуально эта задача будет решаться в 2 этапа. На первом этапе, для всех «проблемных самолетов» строятся планы их движения, так чтобы не было конфликтов с захва-

ченным самолетом, что возможно создаст новые конфликты между обычными самолетами. На втором этапе, «разрешаются» все конфликты между обычными самолетами (если это возможно), т.е. корректируются планы для обычных самолетов так, чтобы не было конфликтов ни с захваченным самолетом, ни между обычными.

2.5. Алгоритм разрешения конфликтов

Для начала необходимо формально описать структуру воздушного пространства в области аэродрома, ввести ограничения и определить каким способом самолеты будут осуществлять планирование собственного движения. Разбиение воздушного пространства на конечное множество ресурсов (см. выше) позволяет применить язык сценарных баз знаний для формализации.

2.5.1. Сценарная база знаний

В данной работе для формального описания структуры воздушного пространства в области аэродрома используется понятие «сценарной базы знаний» (СБЗ). Эта база знаний описывает множество допустимых последовательностей действий для достижения той или иной выбранной цели. При этом процесс динамического выбора дальнейшего сценария действий в зависимости от текущего состояния реализуется как вывод в СБЗ [3].

Язык СБЗ, описанный в [4], был адаптирован для исследуемой проблемы и далее представляется адаптированный вариант, хотя все базовые понятия и структура были сохранены, что позволило использовать существующие механизмы вывода в СБЗ. Основным понятием в языке сценарных баз знаний является элементарная модель поведения, она включает в себя:

- 1) начальные или входные данные — элемент множества ресурсов воздушного пространства, в котором находится самолет;
- 2) предусловие задает ограничения на допустимость или возможность выполнения действия. Это условие может быть задано выражением в терминах языка логики предикатов первого порядка. В нашем случае, предусловие выполнено, если:
 - a) результат, т.е. ресурс, не занят или не заблокирован (захваченным самолетом или его зоной отчуждения) в момент входа в него и до выхода самолета;
 - b) самолет имеет достаточный запас топлива для прохождения результирующего коридора (круга).
- 3) действие — переход самолета из одного ресурса (коридор или круг) в другой;
- 4) результат — ресурс воздушного пространства (коридор или круг), в который переходит самолет.

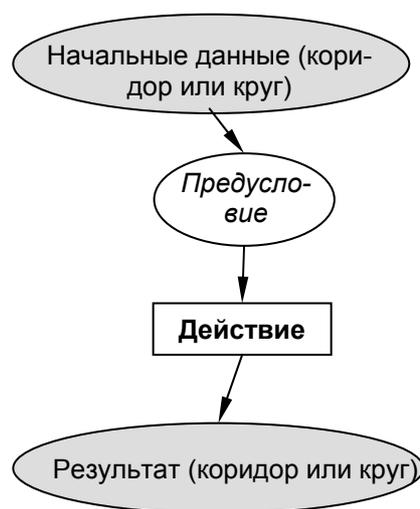


Рис. 3. Графическое представление элементарной модели поведения.

Сценарная база знаний состоит из структурированного множества элементарных моделей поведения, на которых базируется механизм динамического вывода сценария. Пример структуры на множестве элементарных моделей поведения дается графом на рис. 4.

Для организации вывода в СБЗ используются следующие алгоритмы:

- 1) метод «нисходящей волны» («top–down chaining»): отправной точкой здесь являются начальные данные, которые определяют потенциально выполнимые действия; далее, проверяются предусловия выполнения этих действий, и если они удовлетворяются, то считается, что цели этих действий достигнуты. Далее эта схема повторяется с учетом уже достигнутых целей (которые теперь можно рассматривать как начальные данные) до тех пор, пока не будут проанализированы все потенциально выполнимые действия. По завершении этого алгоритма все последовательности действий, приводящие к желаемым целям, соответствуют сценариями достижения цели;
- 2) метод «восходящей волны» («bottom–up chaining»): отправной точкой здесь является желаемый результат (конечная цель), которая определяет действия, ведущие к ней; далее, проверяются предусловия выполнения этих действий, и если они удовлетворяются, то считается, что эти действия могут быть выполнены, и они добавляются к списку достигнутых целей. Далее этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут проанализированы все потенциально выполнимые действия, что соответствует построению сценариев «от конечной цели». По завершении данной процедуры все последовательности действий (в обратном порядке), приводящие к начальным данным, соответствуют возможным сценариями достижения цели;
- 3) метод комбинирования алгоритмов «нисходящей» и «восходящей» волн.

Таким образом, топология воздушного пространства аэродрома, показанная на рис. 1, может быть формализована в терминах СБЗ, а поиск допустимых траекторий движения (планов) самолетов в ней выполняется на основе одного из описанных выше механизмов вывода. Такая сценарная база знаний была построена для топологии зоны в районе аэропорта, показанной на рис. 1 и она далее использовалась в демонстрационном программном прототипе совместно с одним из вышеописанных методов вывода для построения допустимых планов движения самолетов.

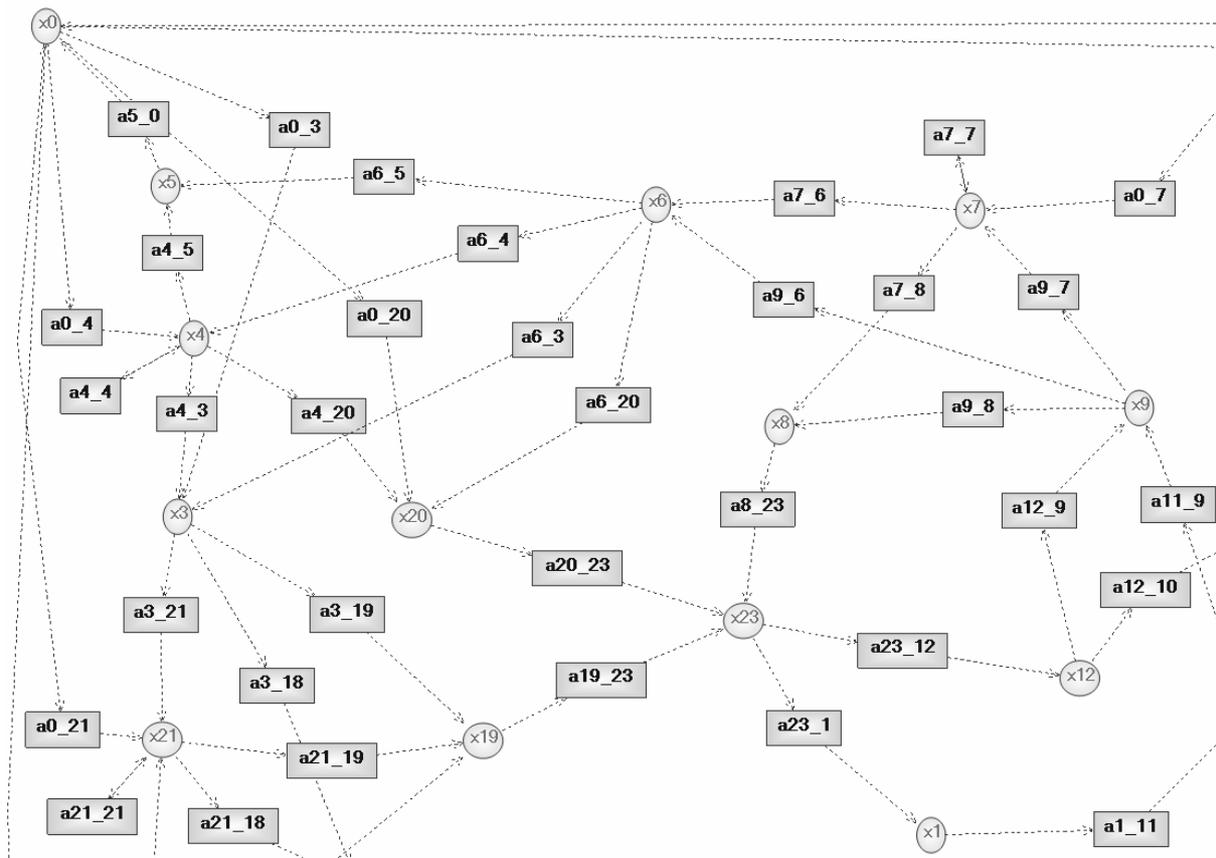


Рис. 4. Графическое представление сценарной базы знаний, как множество связанных элементарных моделей поведения (screenshot редактора сценарных баз знаний).

2.5.2. Алгоритм разрешения конфликтов

Опишем содержательно алгоритм координации коллективного поведения «нормальных» самолетов без указания деталей реализации, связанных с использованием архитектуры многоагентных систем (сценарий получается более сложным при учете распределенного характера его реализации, что является предметом последующего рассмотрения и уточнения).

Исходные данные:

- 1) в воздушном пространстве зоны аэропорта находится N «нормальных» самолетов;
- 2) у каждого самолета есть своя цель (посадка или уход на маршрут) и свой план движения в этом пространстве для достижения цели;
- 3) предполагается, что в начальный момент (до появления захваченного самолета) планы «нормальных» самолетов построены так, что никаких конфликтов по занятию того или иного коридора не существует;
- 4) каждый самолет располагает моделью сценарной базы знаний, которая формально описывает топологию воздушного пространства и допустимые перемещения в ней.

Рассмотрим кратко алгоритм планирования поведения самолетов, имеющих целью посадку или уход из зоны аэропорта при наличии в зоне захваченного самолета, который использован в разработанном демонстрационном прото-

типе. Этот алгоритм не претендует на его практическое использование: его планируется пока использовать только в процессе разработки архитектуры, при проверке основных идей и для отладки демонстрационного прототипа. Поэтому вопросы его оптимизации, обеспечение нужной эффективности и другие, существенные с практической точки зрения аспекты пока оставлены в стороне. Далее дается его краткое описание.

Событием, которое инициирует решение задачи разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве, будет появление в воздушном пространстве аэропорта захваченного самолета. В этот момент задаются координаты и компоненты вектора скорости захваченного самолета (предполагается, что между маневрами, захваченный самолет движется равномерно и прямолинейно). Условия обеспечения безопасности «нормальных» самолетов задаются некоторой зоной вокруг захваченного самолета, которая объявляется запрещенной для «нормальных» самолетов. По текущим координатам и компонентам вектора скорости можно определить вычислить коридоры (ресурсы), которые пересекаются этим самолетом и интервалы времени, когда это имеет место, и далее, по условиям безопасности можно вычислить запрещенные зоны в зависимости от времени.

В начальный момент каждый из нормальных самолетов имеет план достижения своих целей, и все они «бесконфликтны». Описываемый далее алгоритм пока не включает в себя протоколов взаимодействия сущностей, вовлеченных в планирование.

- 1) осуществляется прогноз движения захваченного самолета, и определяются коридоры, попавшие в зону отчуждения. Эти коридоры объявляются запрещенными к использованию на время их пересечения с зоной отчуждения;
- 2) анализируется наличие конфликтов. Множество N «нормальных» самолетов разбивается на два подмножества, N_1 и N_2 , такие, что
 - а) в множество N_1 включаются те самолеты, которые при выполнении имеющихся планов не имеют конфликтов по ресурсам с захваченным самолетом;
 - б) в множество N_2 включаются те самолеты, которые такие конфликты имеют (по отношению к имеющимся планам).
- 3) для каждого самолета $A_i \in N_2$ строится множество «бесконфликтных» (с захваченным самолетом) планов достижения его цели. Это выполняется на основе вывода в сценарной базе знаний (используя механизм вывода в СБЗ). Такие планы могут иметь конфликты с планами самолетов из множества N_1 . Обозначим множество таких планов самолета A_i символом R_i . Если некоторое R_i пусто, то строится новое множество R_i^* для альтернативной цели (уход на соседний аэродром для самолетов, имеющих целью посадку). Если последнее множество также оказывается пустым, то, разрешение ситуации выполняется на основе выбора некоторого нестандартного решения, например, использование эшелона с большими высотами или использование нестандартного коридора (например, выход из зоны аэропорта с последующим возвращением в него);

- 4) для каждого $A_i \in N_1$ выбирается наиболее предпочтительный план (например, оптимальный по расходу топлива) $r_i \in R_i$ или R_i^* . Каждый такой план включает в себя последовательность требуемых ресурсов, для каждого из которых указан интервал времени его использования. Далее, каждый самолет $A_i \in N$ посылает запрос на резервирование ресурсов, которые вовлечены в выбранный план. Специальный агент, ответственный за контроль использования ресурсов, получив запросы от всех самолетов $A_i \in N_1$ и $A_i \in N_2$, детектирует наличие конфликтов. Каждому конфликту j (ресурс, запрашиваемый на пересекающихся интервалах времени разными самолетами с учетом стандартов безопасности) ставится в соответствие список самолетов G_j , вовлеченных в конфликты;
- 5) определяется порядок разрешения конфликтов. Используются следующие эвристические критерии предпочтения при выборе очередной группы, в которой должен разрешаться конфликт:
- а) время наступления конфликта, приоритет равен единице: Чем раньше по времени наступает конфликт, тем выше его приоритет при выборе;
 - б) минимальный запас топлива после достижения цели по всем самолетам, приоритет равен двойке: Чем меньше минимальный запас топлива, тем выше приоритет;
 - в) количество самолетов в группе G_j , приоритет равен тройке: чем больше конфликтующих самолетов в группе, тем выше приоритет.
- 6) решается задача разрешения конфликтов внутри каждой группы G_j . Разрешение конфликтов внутри каждой группы j осуществляется на основании множества эвристик. Используются при этом эвристики, задающие предпочтения на множестве конфликтующих самолетов, таковы:
- а) количество времени, которое самолет может провести в коридорах ожидания на пути к цели (определяется по СБЗ) с учетом топлива, приоритет равен единице: Чем меньше топлива, тем выше приоритет;
 - б) остаток топлива после достижения цели, приоритет равен двойке: Чем меньше топлива, тем выше приоритет.

Предпочтение отдается самолету с помощью некоторого правила, заданного на множестве названных эвристик. Для выбранного самолета резервируется ресурс.

Далее процесс повторяется, начиная с пункта 2, с тем отличием, что некоторый ресурс (коридор) может быть заблокирован захваченным самолетом либо зарезервирован для обычного самолета.

2.5.3. Алгоритм разрешения конфликтов при изменении курса захваченного самолета

Этот алгоритм аналогичен ранее описанному алгоритму для случая появления события, соответствующего появлению захваченного самолета, однако при этом рассматривается новое состояние СБЗ, поскольку при этом «нормальные самолеты занимают уже другие позиции в воздушном пространстве и запрещенные зоны также будут иными. Перед началом работы алгоритма необходимо:

- 1) отменить все предыдущие блокировки ресурсов захваченным самолетом;
- 2) построить оптимальные планы для всех нормальных самолетов из текущих позиций при отсутствии захваченного самолета. Эта операция необходима, так как текущие планы самолетов идут «в обход» ресурсов, ранее заблокированных захваченным самолетом, которые при изменении курса могут оказаться доступными.

3. Проект многоагентной системы

В данной работе проектирование многоагентной системы было произведено в инструментальной среде MASDK (Multi Agent System Development Kit) [5], предназначенной для разработки прикладных многоагентных систем, и которая является объектом исследований и развивается в Санкт-Петербургском институте информатики уже в течении шести лет. MASDK использовалась на практике для разработки прототипов прикладных систем в различных предметных областях и для исследований основных возможностей многоагентной технологии. В качестве основы в MASDK используется подход, описанный в методологии Gaia [6], а также ряд положений, рассматриваемых в проекте разработки языка AUML.

В данном разделе рассматривается уточненный сценарий функционирования системы разрешения конфликтов, который учитывает многоагентную реализацию системы и распределенный характер принимаемых решений. Он описывается в терминах, используемых в методологии Gaia.

3.1. Мета модель многоагентной системы

Мета-модель содержит объявление классов агентов, ролей и протоколов (в соответствии с методологией GAIA, реализованной в MASDK [5]). Указанные здесь концепты будут определены далее.

3.1.1. Роли многоагентной системы

Одним из основных понятий методологии Gaia является роль, которое определяется четырьмя атрибутами: обязанности (задачи выполняемые ролью), полномочия, действия (которые роль может выполнять) и протоколы (в которых роль принимает участие). Для данной проблемной области были определены следующие роли:

- 1) *Pilot (Ассистент пилота: разработка планов)* — в функции ассистента пилота входит проверка текущего плана движения самолета, перепланирование в случае обнаружения конфликтов, участие в переговорах с диспетчером и менеджером ресурсов, оповещение пилота о невозможности бесконфликтного достижения цели;
- 2) *Resource_Owner (Ассистент ресурсов: выявление и структуризация конфликтов)* — на агента ассистента ресурсов возлагается задача по контролю использования ресурсов воздушного пространства и по оповещению агентов-пилотов в случае возникновения конфликтных ситуаций, а также за координацию процесса перепланирования;
- 3) *Dispatcher (Ассистент диспетчера: координация разрешения конфликтов)* — ассистент диспетчера ответственен за оповещение остальных участников системы (агентов пилотов и агентов ресурсов) об обнаружении/изменении курса захваченного самолета и за подтверждения решений, которые сформированы агентами пилотов и агентом ресурсов в процессе планирования. Последнее выдается после симуляции предложенных решений и их оценки диспетчером.

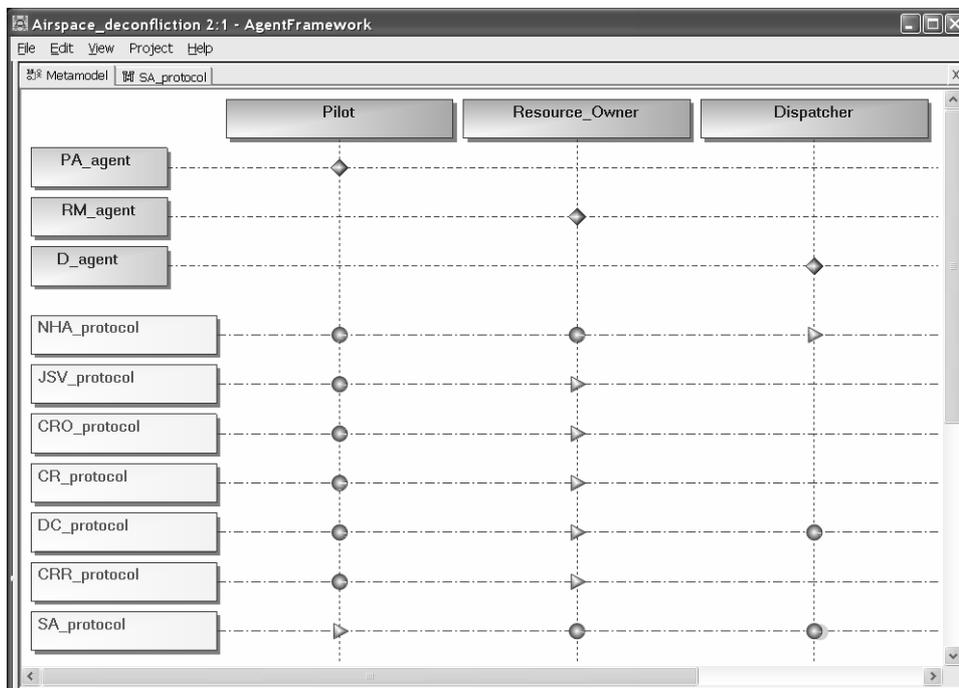


Рис. 5. Мета-модель многоагентной системы разрешения конфликтов, описанная средствами MASDK.

3.1.2. Классы агентов

Класс агентов лучше всего представляется множеством ролей, которые приписываются данному классу агентов. Зачастую, каждой роли сопоставляется свой класс агентов, что было использовано в данной работе:

- 1) *PA_agent (Pilot Assistant agent)* — агент ассистент пилота, исполняющий роль пилота (Pilot) в системе. Количество экземпляров агентов этого класса равно числу нормальных самолетов, присутствующих в воздушном пространстве аэропорта;

- 2) *RM_agent (Resource Management agent)* — агент управляющий ресурсами воздушного пространства, исполняющий роль владельца ресурса (*Resource_Owner*) в системе. В системе должен быть один агент этого класса, который отвечает за управление всеми ресурсами воздушного пространства;
- 3) *D_agent (Dispatcher agent)* — агент-ассистент диспетчера, исполняющий роль диспетчера (*Dispatcher*) в системе. В системе предполагается один агент этого класса.

3.1.3. Протоколы

В контексте методологии Gaia протокол определяет способ взаимодействия роли с другими ролями системы для решения задач стоящих перед системой. Для указанных выше ролей были определены следующие протоколы:

- 1) *NHA_protocol — Notification about hijacked airliner protocol*. Dispatcher инициирует этот протокол, который служит для уведомления пилотов и менеджера ресурсов о появлении в системе захваченного самолета и данные о его положении и скорости. Здесь же, диспетчер передает информацию о том, какие ресурсы воздушного пространства будут заблокированы захваченным самолетом;
- 2) *JSV_protocol — Joint Schedule Verification protocol*. Resource_Owner инициирует этот протокол, который служит для проверки текущих планов обычных самолетов на наличие конфликтов с захваченным или другими, «нормальными», самолетами. Агенты-пилоты оповещают менеджера ресурсов о потребных ресурсах во времени для их резервирования (в соответствии со своими планами)¹;
- 3) *CRO_protocol — Conflict Resolution Ordering protocol*. Менеджер ресурсов в диалоге с агентами-пилотами выбирает из множества конфликтов тот, который будет разрешаться на очередном шаге (в первую очередь на множестве еще не разрешенных конфликтов);
- 4) *CR_protocol — Conflict Resolution protocol*. Для ранее выбранного конфликта определяется самолет, которому будет отдано предпочтение на использование конфликтного ресурса. Это протокол переговоров агентов-пилотов внутри группы G_j конфликтующих самолетов. Менеджер ресурсов здесь выступает как координатор переговоров;
- 5) *DC_protocol — Deconfliction Completion protocol*. После того как все конфликты будут разрешены, диспетчер посылает уведомление всем самолетам об утверждении вновь созданных планов;
- 6) *CRR_protocol — Clear Resource Reservations protocol*. Служит для снятия блокировок ресурсов. Используется при изменении курса захваченного самолета;

¹На первом шаге анализируется только наличие конфликтов с захваченным самолетом, поскольку до захвата самолета планы движения «нормальных» самолетов не содержат конфликтов.

- 7) *SA_protocol* — *Situational Awareness Protocol*. Агенты-пилоты оповещают диспетчера и менеджера ресурсов о переходе самолета из одного коридора (круга ожидания и т.п.) в другой.

4. Описание прототипа и предварительная оценка алгоритма

В целях тестирования и усовершенствования описанного здесь алгоритма разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве в районе аэродрома был создан прототип описанной здесь многоагентной системы. Он был реализован не в форме многоагентной системы, но с сохранением всех указанных концепций (вместо агентов использовались экземпляры соответствующих C++ классов; передача сообщений — вызов методов объектов и т.п.). В инструментарии для работы со СБЗ был реализован метод вывода «нисходящая волна» с оптимизационными доработками. Зона отчуждения вокруг захваченного самолета, определяется шаром вокруг самолета с радиусом 5 км (является параметром алгоритма).

В качестве входных данных приложение принимает следующие файлы в формате xml:

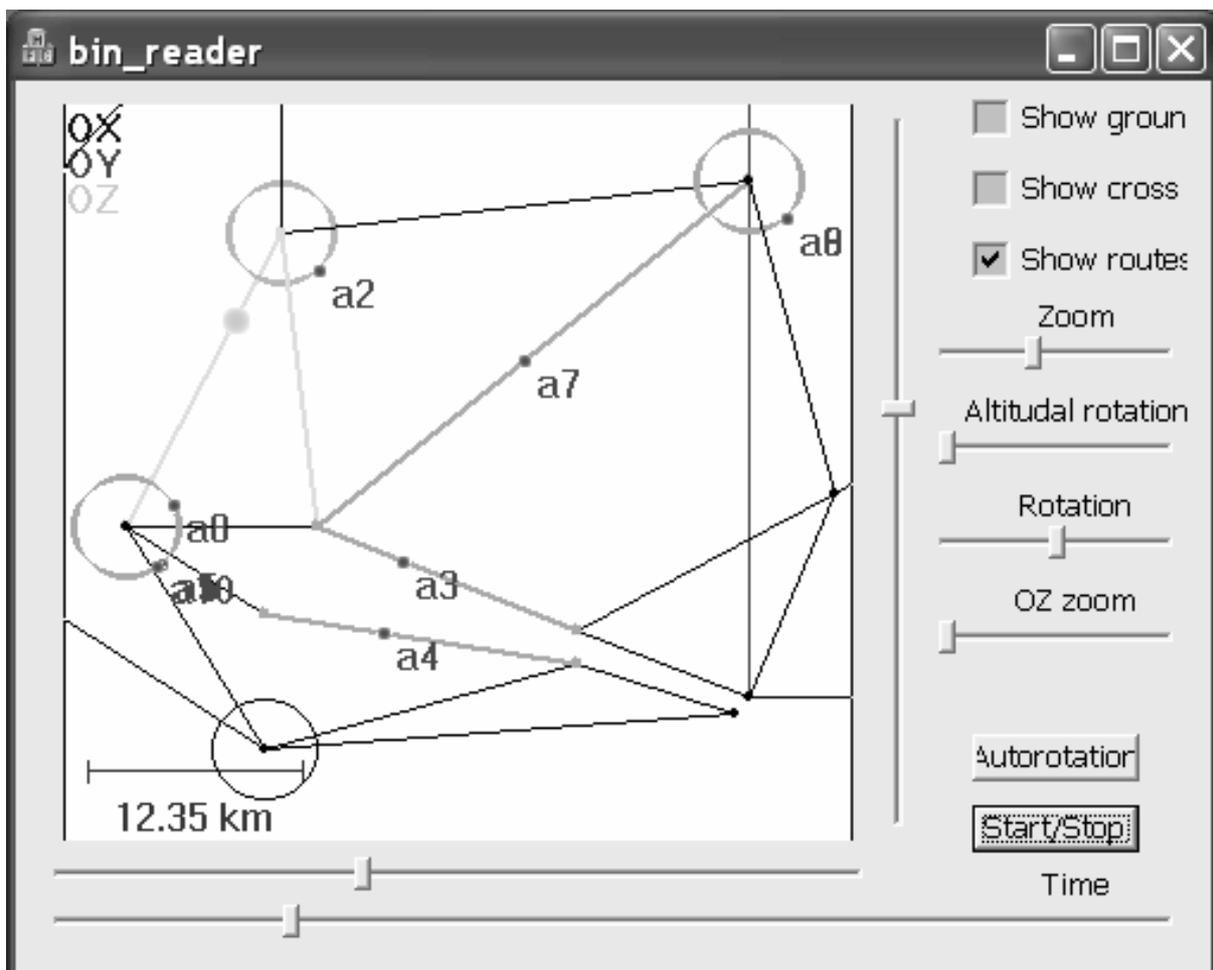


Рис. 6. Визуализация работы алгоритма. Проекция: вид сверху.

- описание СБЗ. Была создана СБЗ для воздушного пространства, представленного на рис. 1;
- описание нормальных самолетов с планами их движения;
- параметры захваченного самолета.

Результат работы приложения — новые бесконфликтные планы движения нормальных самолетов (если таковые построить невозможно, то выдается сообщение).

Кроме того, данное приложение позволяет построить планы движения нормальных самолетов в отсутствие захваченного самолета (так как алгоритм планирования применим к этой задаче практически без изменений).

Реализованный алгоритм был протестирован на нескольких примерах. Примеры различались по количеству обычных самолетов находящих в рассматриваемой области. Сначала алгоритм был отработан на примере малого количества обычных самолетов и по мере тестирования алгоритма и внесения поправок количество самолетов увеличивалось. На рис. 6 показана ситуация с 5 самолетами. Результаты тестирования показали, что ни в одном из случаев алгоритм не заикливался. Количество итераций алгоритма зависит от количества самолетов (для 3 самолетов — 1–2 итерации; для 5 самолетов — 5–6 итераций; для 10 самолетов — 8–10 итераций). Время работы алгоритма сильно зависит от развитости топологии воздушного пространства и в значительно меньшей степени от количества самолетов. Для топологии воздушного пространства, представленного на рис. 1, и 10 обычных самолетов с одним захваченным алгоритм работает порядка минуты.

Для визуализации результата работы алгоритма (файл с планами движениями самолетов) было создано приложение, показывающее в режиме реального времени воздушное пространство вокруг аэродрома. Это позволяет быстро и наглядно оценить результат работы алгоритма.

Программа визуализирует проекцию 3-х мерной картины на плоскость, положение которой можно изменять с помощью регуляторов (есть также возможность изменять увеличение и перемещать регулятор времени в любую позицию). Обычные самолеты обозначены зеленым кружком с подписью имени самолета. Захваченный самолет обозначен красным кружком. Коридор или круг, занятый обычным самолетом подсвечивается зеленым светом, а занятый захваченным — красным. Если обычный самолет и захваченный находятся одновременно на одном коридоре, то он подсвечивается малиновым цветом.

5. Заключение и дальнейшие планы

В этой работе мы представили проект многоагентной системы для разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве. Реализованный прототип такой системы, в котором были реализованы все ключевые алгоритмы, подтверждает жизнеспособность такой системы.

Так же нами был предложен метод формализации (языка сценарных баз знаний) топологии воздушного пространства в районе аэропорта, что позволило нам свести данную проблему к задаче планирования и составления расписания.

Несмотря на то, что мы говорили только о захваченном самолете, метод, предложенный в данной работе, применим и для обычного планирования воздушного трафика и для исключительных ситуаций в воздушном пространстве,

когда необходимо предоставить приоритет одному из самолетов (например, самолет аварийный, несет срочный или опасный груз и т.п.).

В дальнейшем мы планируем отработать алгоритм планирования движения обычного самолета по коридорам с целью улучшения временных и качественных характеристик. Реализовать многоагентную систему, проект которой здесь предложен и провести ряд экспериментов с различным количеством самолетов.

6. Благодарности

Данная работа велась при поддержке EOARD и РАН (программа ОИТВС РАН, проект 2.4).

Выражаем особую благодарность за неоценимую помощь в подготовке материалов и консультации по вопросам управления воздушным движением представителям Академии гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия: В.А. Солодухину и В.В. Кулину.

Литература

1. Топология воздушного пространства аэропорта Быково [Электронный ресурс]: // <<http://www.radioscanner.ru/avia/maps/bykovo.zip>> (по состоянию на 20.11.2005).
2. Топология воздушного пространства аэропорта Пулково [Электронный ресурс]: // <<http://www.radioscanner.ru/avia/maps/pulkovo.zip>> (по состоянию на 20.11.2005).
3. *Городецкий В.И., Тараканов А.О.* Планирование вычислений на основе вывода в атрибутивных КС грамматиках // Математические методы построения и анализа алгоритмов. Л.: Наука, 1990. С. 37–48.
4. *Gorodetsky V., Kotenko I.* Scenarios Knowledge Base: A Framework for Proactive Coordination of Coalition Operations // Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Systems for Coalition Operation (KSCO–04), Florida, USA, 2004 / Eds. Pechoucek M. and Tate A. P. 83–88.
5. *Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Konushy V., Mankov E., and Malyshev A.* Multi-Agent System Development Kit / Chapter in book Unland R., Klusch M., Calisti M. (Eds.) // Software Agent-Based Applications, Platforms and Development Kits, Whitestein Publishers, 2005.
6. *Woldridge M., Jennings N.R., Kinny D.* The *Gaia* Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. 2000. Vol. 3, no. 3. P. 285–312.
7. *Woldridge M.* Agent-based software engineering // IEEE Proc. Software Eng. 1997. 144(1). P. 26–37.
8. *Nguyen-Duc M., Briot J.-P., Drogoul A.* An application of Multi-Agent Coordination Techniques in Air Traffic Management // Proceedings IEEE/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology 2003. P. 622–625.
9. *Кизько В. Г.* Технологические процессы управления воздушным движением. Л., 1990. 88 с.