

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЙОНА УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ И ЗАДАЧА ЕГО СЕКТОРИЗАЦИИ***М. О. Орехов, В. Н. Минаенко, В. И. Кухтенко (Москва)**

Актуальность задачи планирования воздушного пространства (ВП) районного центра (РЦ) системы организации воздушного движения (ОрВД), а именно, задачи деления ВП района на отдельные сектора диспетчерского управления, связана с начавшейся реорганизацией системы ОрВД РФ и необходимостью обеспечить как безопасность, так и экономическую эффективность системы. В связи со сложностью и переменным характером влияющих факторов существует практическая необходимость в разработке методов автоматизированного решения задачи секторизации с применением имитационного моделирования на ЭВМ. В настоящем докладе такие методы рассматриваются на основе математической модели района управления воздушным движением (УВД), программная реализация которой осуществлена в качестве модуля в составе Комплекса имитационного моделирования (КИМ) ОрВД в Российской Федерации, разработанного во ФГУП «ГосНИИАС».

Содержательная сторона постановки задачи оптимальной секторизации ВП района УВД состоит в следующем. На этапе предтактического планирования требуется по известному плану полетов воздушных судов (ВС) на короткий временной интервал (например, на предстоящие сутки) составить такой пространственно-временной график разбиения ВП района УВД на сектора управления, подконтрольные каждому своему авиадиспетчеру, чтобы количество этих секторов было минимальным, но при этом загрузка каждого из них потоком ВС не превышала бы его пропускную способность (ПС).

Норматив пропускной способности сектора, подконтрольного одному авиадиспетчеру районного центра, определяется как максимальное количество воздушных судов, которые могут войти в ВП этого сектора за один календарный час, не вызвав при этом превышения допустимого значения показателя загруженности диспетчера. Этот показатель загруженности равен отношению суммарного времени занятости диспетчера к интервалу времени, на котором оценивается загрузка диспетчера. На основе опыта работы системы УВД было установлено, что допустимое значение этого показателя загруженности составляет 0,55.

Вариант секторизации ВП района УВД должен также удовлетворять ряду ограничений. Эти ограничения можно разделить на три группы.

Первая – требования безопасности полетов, а именно: загрузка каждого сектора потоком ВС не должна превышать его пропускную способность. Это минимизирует вероятность ошибочных действий диспетчера.

Вторая – геометрические характеристики секторов, а именно, выпуклость их относительно маршрутов ВС.

Третья – ограничения на минимальную длину полета в рамках сектора.

Оптимизируемыми характеристиками в данной задаче секторизации являются количество секторов и конфигурация их границ в каждый календарный час.

С учетом эргономических факторов целесообразно применение следующей двухэтапной схемы решения задачи оптимальной секторизации.

На первом этапе ВП района делится на отдельные «стабильные» объемы ВП (фрагменты ВП) со стабильными границами. При этом учитывается то, что конфигурирование секторов из этих объемов должно обеспечить ПС района, достаточную для обслуживания потока ВД при любом возможном (прогнозируемом при синтезе) варианте

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 07-08-12246).

интенсивности и структуры ВД. В конкретной конфигурации каждый такой объем ВП может быть адекватен полному объему ВП сектора (простой сектор), либо являться частью сектора, состоящего из нескольких объемов (составной сектор). В любом случае дальнейшее изменение размера и границ такого объема не допускается.

На втором этапе дальнейшие действия по управлению ВП района заключаются в адаптации границ секторов к ожидаемому потоку ВД. В качестве мер адаптации рассматриваются объединение двух или более элементарных секторов или секторов управления в один составной сектор управления, разделение сектора управления на два или более, передача элементарного сектора от одного сектора управления другому. Таким образом, задачей второго этапа секторизации является определение требуемых секторных конфигураций района и графика их работы в течение суток.

В представляемом докладе рассматривается методический и математический аппарат, а также средства имитационного моделирования полностью автоматизированного процесса такой двухэтапной секторизации ВП района УВД. Предлагаемый авторами автоматический способ формирования фрагментов (первый этап секторизации) заключается в последовательном решении двух задач.

Решение первой задачи обеспечивает дискретизацию ВП района на объемные кванты. Авторами доклада предложен конструктивный и быстродействующий геометрический алгоритм, однозначным образом решающий эту задачу. Кванты представляют собой области ВП района УВД, содержащие в себе все свойства фрагментов. В то же время их можно рассматривать как минимальные объемы ВП с точки зрения описания его загрузки потоками ВС. Данное определение квантов позволяет формировать такие области ВП, как фрагменты и сектора, путем объединения квантов в связные группы и дает возможность производить поиск оптимальных фрагментов и секторов на конечном множестве возможных их вариантов (а не на бесконечном, как в случае произвольного выбора границ этих областей ВП района УВД).

Реализация в рамках КИМ ОрВД решения задачи квантования ВП района УВД осуществляется следующим образом. Район УВД задается своими границами и проходящими через него участками воздушных трасс (ВТ). Границы района УВД представляют собой боковые грани вертикальной призмы и задаются географическими координатами вершин ее опорного многоугольника. Участки ВТ описываются географическими координатами своих начальной и конечной точек, а также высотами эшелонов, по которым осуществляется воздушное движение на этих участках ВТ. Вся эта информация хранится в таблицах базы данных (БД), которую использует КИМ ОрВД. Комплекс предоставляет широкие возможности визуализации всех элементов, связанных с воздушным движением.

Полученные кванты ВП заносятся в таблицы БД в виде информации о своих границах (которые, так же как и границы ВП района ОрВД, представляют собой боковые грани вертикальных призм) и о связи этих квантов участками ВТ. Интерфейсные средства КИМ ОрВД позволяют отображать границы квантов на карте района УВД. Дополнительно Комплекс предоставляет возможность редактирования границ квантов путем перемещения вершин образующих их многоугольников.

На втором этапе решения задачи фрагментации ВП района УВД из полученных квантов формируются объемные фрагменты так, чтобы минимизировать значение критерия при одновременном выполнении всех принимаемых во внимание ограничений.

Задача фрагментации ВП района УВД решается с использованием генетического алгоритма, основанного на применении эволюционных подходов и созданного для решения оптимизационных задач. Генетический алгоритм производит итерационную обработку некоторого множества элементов пространства возможных решений задачи. Он является методом нулевого порядка и производит псевдослучайный поиск глобаль-

ного экстремума, учитывая свою предысторию, и применяется, например, в тех случаях, когда найти точное решение возможно только путем перебора неприемлемо большого количества вариантов. Например, решаемая задача фрагментации является задачей объединения квантов ВП, на которые разбит район УВД, в связные группы. На языке теории графов такая задача интерпретируется как задача оптимального разбиения связного неориентированного простого графа на связные подграфы. Эта же теория утверждает, что такая задача является NP-полной, т. е. невозможно найти точного ее решения способом, отличным от полного перебора множества всевозможных вариантов ее решения. ВП объединенного Дальневосточного района УВД разделяется на 237 квантов. Вычисления показали, что количество всевозможных вариантов фрагментации с учетом вертикального деления ВП в этом случае будет больше, чем 10^{100} . Полностью перебрать такое количество вариантов фрагментации не представляется возможным. Принимая это во внимание, а также учитывая вышеперечисленные достоинства генетического алгоритма, авторы доклада приняли решение использовать именно этот алгоритм и разработали способ применения генетического алгоритма для решения рассматриваемой пространственной задачи объединения квантов ВП в связные группы – фрагменты.

Принцип действия генетического алгоритма был позаимствован у живой природы. Было установлено, что именно по такой схеме природа решает задачу формирования облика и характеристик живых существ, максимально приспособленных для их среды обитания. Такое приспособление того или иного вида живых существ осуществляется путем эволюции от поколения к поколению и реализовано природой при помощи механизмов скрещивания особей, их мутации и наследования особями-потомками признаков их родителей. В природе устроено так, что чем более приспособленной является особь, тем больше потомков она воспроизведет. А особи-потомки, в свою очередь, унаследуют характеристики приспособленности от своих особей-родителей. Некоторые особи-потомки вследствие мутации приобретут и новые признаки, не существовавшие у их родителей. Таким образом суммарная приспособленность вида особей от поколения к поколению увеличивается.

При описании генетических алгоритмов принята биологическая терминология. Так, элемент пространства возможных решений называется особью. Множество возможных решений, рассматриваемой на одной итерации, называется поколением. Оператор, ставящий в соответствие двум возможным решениям два новых решения с наследованием их характеристик, называется скрещиванием. Оператор, незначительно изменяющий получившееся новое возможное решение, называется оператором мутации. Значение критерия качества возможного решения называется мерой приспособленности особи.

Для решения той или иной оптимизационной задачи генетическим алгоритмом необходимы способ кодирования возможного решения в виде битовых массивов, а также метод вычисления значений характеристик этого возможного решения – значений критерия и меры невыполнения ограничений.

Решение задачи кодирования варианта объединения квантов ВП во фрагменты представляет собой набор двух массивов. В первый заносится информация о том, какие кванты являются «ядрами» фрагментов, а также высоты деления фрагментов по вертикали (в случае, если конкретный фрагмент по вертикали не делится, то записывается нулевая высота). Во второй массив помещаются данные о принадлежности остальных квантов фрагментам.

Для вычислительной обработки каждого возможного варианта фрагментации, рассматриваемого применяемым генетическим алгоритмом, используется имитацион-

ное моделирование процесса загрузки авиадиспетчеров потоками воздушных судов, проходящих через фрагменты (сектора), которые контролируют эти авиадиспетчеры. Модельная выборка полетных планов составляется на основе прогнозов выполнения полетов на весь срок стратегического планирования и выбирается из библиотечных таблиц БД КИМ ОрВД. Комплекс имеет возможность предоставлять всю справочную информацию о каждом рейсе, занесенном в таблицы БД, в том числе можно отобразить на карте района УВД траекторию полета ВС профиль этого полета. Таким способом при помощи имитации полетов ВС в ВП района УВД для каждого возможного варианта фрагментации вычисляется доставляемое им значение критерия оптимальности, а также значения меры невыполнения им заданных ограничений.

Процесс решения задачи фрагментации ВП района УВД при помощи генетического алгоритма реализован в рамках КИМ ОрВД. Найденные в результате работы генетического алгоритма оптимизации фрагменты ВП (сектора ВП) заносятся в таблицы БД в виде информации о своих границах, а также о высотах (эшелонах), которые охватывает каждый фрагмент. Интерфейс КИМ ОрВД позволяет отображать границы полученных секторов ВП на карте района УВД. Дополнительно Комплекс предоставляет возможность редактирования границ секторов путем перемещения вершин образующих их многоугольников, а также изменять секторам их диапазон высот.

Результаты моделирования предлагаемого авторами доклада алгоритма оптимальной секторизации применительно к ВП районов УВД РФ показали достаточную эффективность и приемлемое быстродействие. Например, была использована имитационная модель ВП объединенного Дальневосточного района УВД. В будущем этот район будет представлять собой объединение нынешних шести районов УВД, расположенных на Дальнем Востоке. Был проведен сравнительный анализ моделей загрузки прогнозируемым потоком ВС существующих вариантов секторизации этих районов и полученного авторами доклада варианта секторизации ВП объединенного Дальневосточного района УВД. Результаты этого сравнительного анализа были в пользу полученного варианта секторизации Дальневосточного района УВД как по количеству секторов, так и по распределению загрузки диспетчеров. Если просуммировать все сектора у существующих шести районов УВД, то получится двенадцать секторов, а в полученном варианте секторизации Дальневосточного района УВД этих секторов десять. Прогнозируемый поток ВС не перегружает ни один сектор Дальневосточного района УВД, в то время как в некоторых секторах существующего варианта районирования наблюдается перегрузка.

В докладе демонстрируются особенности решения задачи секторизации, выполняемой в рамках КИМ ОрВД; приведены и анализируются результаты проведенного синтеза. Результаты демонстрируют эффективность разработанных процедур. Весь цикл секторизации таких больших объединенных районов ОрВД, как объединенный Дальневосточный район, требует менее часа.

Анализ результатов показал, что разработанная методика способна полностью автоматизировать процесс секторизации ВП района УВД и может являться основой для алгоритма оптимальной секторизации, учитывающего все особенности этой задачи.

Литература

1. Сарычев В. М., Антипов В. Ю., Карпов В. А. Концепция и основные подходы в определении нормативов пропускной способности воздушного пространства в России//Новости авионавигации. 2003. № 6.
2. Минкин Ю. И., Петров А. И. Самоорганизующийся генетический алгоритм. М.: МАИ, 2001.

3. **Delahaye D., Alliot J. M., Schoenauer M., Farges J. L.** Genetic Algorithms for automatic regroupement of Air Traffic Control sectors.

<http://www.recherche.enac.fr/opti/papers/notice.html?todo=abstract&type=articles&file=ep95.txt4>.

Delahaye D., Schoenauer M., Alliot J. M. Airspace Sectoring by Evolutionary Computation.

<http://www.recherche.enac.fr/opti/papers/notice.html?todo=abstract&type=articles&file=icec98.txt>

5. **Goemans M. X., Williamson D. P.** Improved approximation algorithms for maximum cut and satisfiability problems using semidifinite programming//Proceedings of the 26-th Symposium on the Theory of Computing, 1994.