

Метод оценки влияния топологии SID/STAR на пропускную способность аэропорта

Филонова А.А.

Московский государственный технический университет гражданской авиации,

МГТУ ГА, Кронштадтский бульвар, 20, Москва, 125993, Россия

e-mail: canjawarda@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрен подход к задаче оценки влияния топологии воздушного пространства аэропорта на его пропускную способность. Предложена унифицированная модель представления аэродромной воздушной зоны и на ее основе сформулирована задача по оценке пропускной способности. Приводятся и обсуждаются результаты расчета пропускной способности для аэропортов МАУ.

Ключевые слова: пропускная способность аэропорта, квантовая модель воздушной обстановки, топология аэродромного воздушного пространства

Введение

Согласно прогнозам ведущих авиаперевозчиков интенсивность использования воздушного пространства к 2025 году возрастет примерно в 2-3 раза [1]. В связи с этим актуальным становится вопрос о совершенствовании системы организации воздушного движения (ОРВД), которая на сегодняшний день функционирует близко

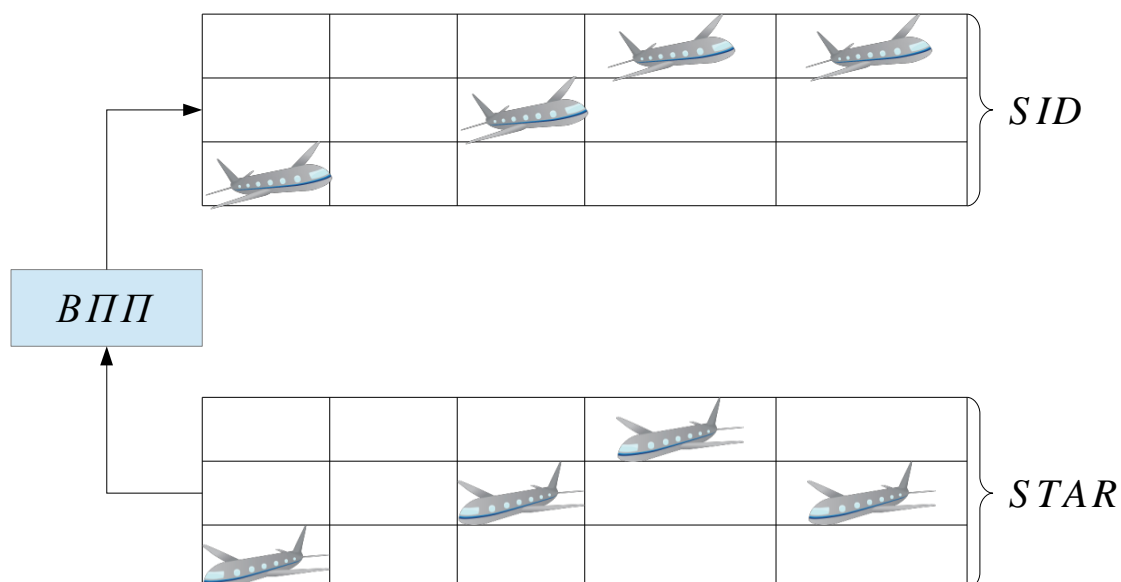
к пику своих возможностей [2]. Для обеспечения возрастающего спроса на обслуживание воздушного движения были созданы программы развития систем ОрВД такие как SESAR и NextGEN. Основной целью этих программ является увеличение эффективности использования воздушного пространства (ВП) при повышении уровней безопасности полетов, например, в рамках SESAR предполагается трехкратное увеличение пропускной способности ВП при десятикратном повышении безопасности его эксплуатации [3].

Для достижения описанных выше целей, необходимо провести анализ элементов системы ОрВД с целью определения факторов, лимитирующих пропускную способность. Согласно ИКАО пропускная способность органов ОрВД выражается как максимальное число воздушных судов (ВС), которые могут быть приняты под управление за определенный период в данном воздушном пространстве или на соответствующем аэродроме [4]. Одной из наиболее актуальных задач является расчет пропускной способности аэропорта, которая диктует ограничения на количество обслуживаемых самолетов во всей системе.

На сегодняшний день имеется большое количество методик для решения данной проблемы. Критический обзор существующих моделей [5] показывает, что большая их часть основана на методах имитационного моделирования, которые, стремясь максимально точно скопировать систему ОрВД в зоне аэродрома, позволяют выработать лишь определенные, возможно, очень важные рекомендации по обслуживанию потоков ВС. При этом они не дают предельной оценки величины пропускной способности аэропорта и не выявляют узкие места, которые фактически лимитируют производительность всей системы ОрВД.

Аналитические модели, как правило, используют систему упрощений, основанную на представлении траекторий самолетов на плоскости. Это может привести к занижению расчетной величины пропускной способности, так как при моделировании конфигурации ВС в аэродромной зоне не учитываются маневры ухода от столкновений в трёхмерном пространстве. По этой причине некоторые реализации воздушной обстановки могут быть ложно классифицированы как конфликтные. С другой стороны при подобном подходе не рассматривается эшелонирование ВС по трем измерениям, что потенциально влечет за собой нарушение норм безопасности полетов, а, следовательно, необоснованное завышение величины пропускной способности. В большинстве работ аппаратом аналитического моделирования воздушного движения является теория массового обслуживания, что приводит к серьезным трудностям, поскольку необходимо проводить анализ моделей, в которых входные и выходные потоки не подчиняются пуассоновскому распределению.

Одним из факторов, влияющих на пропускную способность аэропорта, является топология SID/STAR[4]. При пересечении воздушных трасс возникают дополнительные ограничения на эшелонирование ВС, которые не позволяют выстроить максимально плотные потоки на взлет и на посадку, что в свою очередь приводит к простоям взлетно-посадочной полосы (ВПП). Таким образом, требования по безопасности полетов не позволяют положить пропускную способность аэродрома равной пропускной способности ВПП. В связи с этим возникает потребность в методах, позволяющих оценить степень влияния топологии ВП аэродрома на исследуемую систему. Более того при построении структуры



исследование основано на квантовой модели представления аэродромной зоны, изложенной в работах [6-8]. Они базируются на допущении о том, что траектории всех ВС строго соответствуют *SID/STAR*, векторение отсутствует. Первым шагом построения трехмерной топологии ВП является представление ВТ в путевых координатах, которые отсчитываются вдоль *SID/STAR* начиная от взлетно-посадочной полосы и заканчивая наиболее удаленным от нее пересечением. Воздушные трассы, имеющие меньшую протяженность, продлеваются, при этом предполагается отсутствие влияния подобных участков на встречный поток ВС.

Для согласования модели с концепцией безопасности ИКАО[9], вводится понятие квантового состояния, под ним подразумевается область воздушного пространства, в которой может находиться не более одного ВС при условии соблюдения норм безопасности полетов. Физически квантовое состояние представляет собой параллелепипед, геометрические размеры которого соответствуют минимумами эшелонирования. Очевидно, что появление второго ВС в квантовом состоянии неизбежно приведет к возникновению потенциально конфликтной ситуации или опасного сближения [7]. По аналогии с квантовой

теорией, ВС подобны фермионам, для которых выполняется принцип запрета Паули [6] – два фермиона не могут одновременно находиться в одном квантовом состоянии.

Нормы эшелонирования предлагается смоделировать следующим образом: каждое воздушное судно, которое можно рассматривать как материальную точку, погружается в центр параллелепипеда измерения которого по высоте и ширине определяются нормами эшелонирования для рассматриваемого типа ВС. На следующем шаге моделирования предлагается провести переход в дискретное время, где в качестве шага разбиения принимается τ , определяемое из (1):

$$\tau = \max\left(\tau^-, \tau^+, \frac{L_1}{V_1}, \dots, \frac{L_N}{V_N}\right), \quad (1)$$

здесь τ^- , τ^+ – времена занятости ВПП при взлете и посадке, L_k – значения минимумов продольного эшелонирования для SID/STAR, а V_k – плановая скорость ВС на соответствующем участке траектории. При таком выборе такта времени продольное измерение квантовых состояний будет определяться как τV_k .

Ситуация когда внутри одного параллелепипеда находится сразу два ВС является нарушением норм эшелонирования и называется конфликтной. В качестве одного из положений модели принимается отсутствие конфликтных ситуаций в рассматриваемой системе. В качестве приближения предлагается рассматривать ВС одинакового класса, нормы эшелонирования и измерения параллелепипедов для них равны. Очевидно, что максимальное число операций взлет/посадка достигается путем наиболее плотного расположения ВС на SID/STAR, которое при этом не приводит к возникновению конфликтной ситуации. Описанный прием фактически

можно представить как пространственно-временную дискретизацию воздушных трасс.

Предложенное представление воздушной обстановки вместо движения ВС позволяет рассматривать дискретные переходы столбцов квантовых состояний для каждой ВТ $\vec{\psi} = \vec{\psi}(t_p, \rho_k)$ в построенной системе, где t_p – момент времени, ρ_k – расстояние от ВПП в путевых координатах, $k = \overline{1, N}$ – номер участка траектории. Элементы вектора $\vec{\psi}(t_p, \rho_k)$ равны нулю при отсутствии ВС в квантовом состоянии или единице при его наличии. При переходе от одного дискретного момента времени t_p к следующему t_{p+1} вектор $\vec{\psi}(t_p, \rho_k)$ может измениться вследствие перехода ВС с одного эшелона полета на другой, например, следующим образом: $\vec{\psi}(t_p, \rho_k) = (0, 1, 0, \dots, 0)^T \rightarrow \vec{\psi}(t_{p+1}, \rho_{k-1}) = (1, 0, 0, \dots, 0)^T$. Необходимо отметить, что в сопровождающей системе отсчета, движущейся вместе с выделенным столбцом квантовых состояний, $|\vec{\psi}(t_p, \rho_k)| = const$ и не может меняться со временем. Причиной является то, что ВС, следующие по траекториям взлета и посадки с максимальной разрешенной скоростью, не могут обгонять друг друга. Отсюда можно заключить, что $|\vec{\psi}(t_p, \rho_k)| \leq 1 \quad \forall p, k$, так как два и более ВС не могут одновременно совершить взлет или посадку, если они движутся по одной траектории.

В терминах квантовой модели воздушную обстановку на каждой SID/STAR можно описать с помощью матрицы, которая является набором столбцов квантовых состояний. Для i -й SID в момент времени t_p она будет иметь следующий вид:

$$\Psi_i^-(t_p) = (\vec{\psi}(t_p, \rho_1), \dots, \vec{\psi}(t_p, \rho_N)), \quad (2)$$

здесь N – количество продольных сечений. Пусть M^- – число SID, а M^+ – STAR, тогда текущая воздушная обстановка в аэродромной зоне представляет собой пару множеств подобных матриц $\{\Psi_i^-(t_p)\}_{i=1}^{M^-}$, $\{\Psi_j^+(t_p)\}_{j=1}^{M^+}$, где i, j – номера ВТ, и дает описание заполнения квантовых состояний – распределение взлетающих и заходящих на посадку ВС в воздушном пространстве аэродрома. В результате проведенной декомпозиции исследуемой системы получен универсальный метод представления аэродромного воздушного пространства, который позволяет учесть любое количество SID/STAR, их различную протяженность, а так же множество эшелонов полета. Стоит отметить, что при таком построении теряется информация о пересечениях ВТ, которые в свою очередь потенциально могут уменьшить количество возможных реализаций воздушной обстановки и информация о наличии пересечений воздушных трасс.

На пересечениях ВТ происходит наложение параллелепипедов, внутри которых запрещено одновременно находиться ВС из потока взлетающих и заходящих на посадку (рис. 3). На рис. 3 пунктирными линиями соединены связанные квантовые состояния. Наклон этих линий отображает ситуацию, когда точки пересечения SID и STAR расположены на разных путевых расстояниях от ВПП.

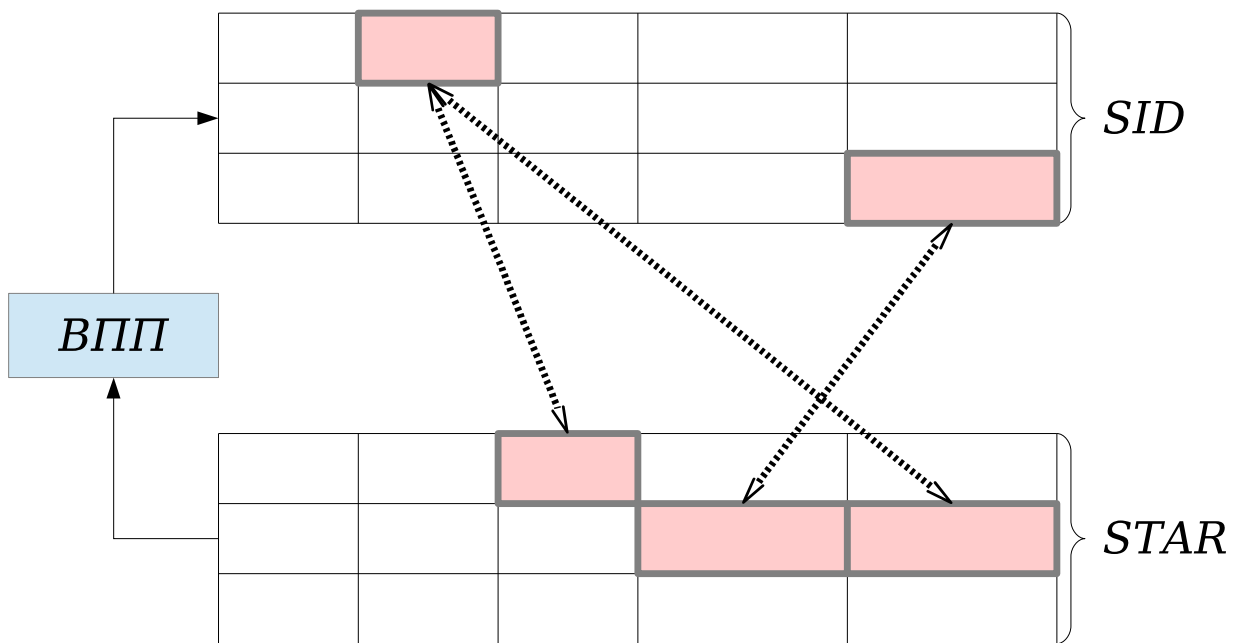


Рисунок 3. Представление связанных состояний

Для того чтобы определить, какие конфигурации ВС являются допустимыми с точки зрения безопасности полетов, вводится множество матричных операторов $\{\hat{R}_i^j\}$, с помощью которых можно произвести пересчет квантовых состояний SID в STAR. Если для i -й SID и j -й STAR имеет место наложение квантовых состояний, находящихся на удалении от ВПП k и m , на эшелонах полета l , n , то соответствующий элемент матрицы $r_{i,k,l}^{j,m,n}$ равен единице, в противном случае он равен нулю. Явный вид указанных операторов определяется топологией ВТ в зоне аэродрома. Взлетающие ВС блокируют связанные квантовые состояния и создают препятствие для потока заходящих на посадку, которое можно описать с помощью некоторого зависящего от времени поля в пространстве путевых координат (3). Далее в работе данное поле будет называться «минным».

$$\Phi_j(t_p) = \sum_i \hat{R}_i^j \Psi_i^-(t_p) \quad \forall i, j \quad (3)$$

Воздушная обстановка удовлетворяет ограничениям модели, если для нее справедливо (4), иначе она исключается из рассмотрения.

$$\sum_{i,j} \Psi_j^+(t_p) \hat{R}_i^j \Psi_i^-(t_p) = 0 \quad (4)$$

Подобный подход позволяет учесть влияние норм эшелонирования по всем трем измерениям и представить сложную топологию ВТ в аэродромной зоне в виде квантовой системы. В данной работе предлагается перейти от детального изучения динамики системы квантовых состояний к изучению макрохарактеристик, на основе чего предложен метод оценки влияния топологии аэродромного пространства на пропускную способность аэропорта.

2. Исследование квантовой модели на основе макрохарактеристик

Описанная выше квантовая модель аэродромной зоны позволяет в унифицированном виде представить воздушную обстановку для произвольного аэропорта и проследить изменение положения каждого ВС за один такт времени. Однако попытка исследовать динамику всей системы приводит к задаче с большой размерностью, которая растет с увеличением числа рассматриваемых квантовых состояний как $O(N!)$, где N – число квантовых состояний в системе [10]. Исходя из того что целью работы является описание зависимости пропускной способности от структуры ВТ, а недетальное исследование траекторий движения ВС, логичным видится применение следующего приема. Для решения поставленной задачи необходимо абстрагироваться от функционирования системы на микроуровне и перейти к рассмотрению макрохарактеристик – глобальных

параметров, описывающих ее поведение в целом. Далее будет описан пример построения подобной модели для аэропорта с одной парой SID/STAR и двумя независимыми ВПП, одна из которых работает только на взлет ВС, а другая – на посадку.

Первая характеристика, описывающая текущее состояние системы, может быть представлена как пара чисел (i, j) , i – число ВС, находящихся на SID, а j – на STAR. При таком подходе множество всех состояний случайного процесса определяется как $S = \{0, \dots, N\} \times \{0, \dots, N\}$, $|S| = (N + 1)^2$, а пространство состояний рассматриваемой системы можно определить как вероятностную меру на S .

Вторая макрохарактеристика называется «сложностью топологии» κ и описывает степень влияния связанных квантовых состояний на вероятность возникновения конфликтной ситуации. Она определяется для двух ВТ противоположного направления как вероятность возникновения конфликтной ситуаций при полном заполнении ВС всех продольных сечений. Основное преимущество использования данной характеристики заключается в том, что она может быть оценена на основе информации о структуре ВП, что делает ее величиной постоянной для любого положения ВС в аэродромной зоне. Для вычисления κ необходимо сначала определить вероятность возникновения конфликтной ситуации. В предположении о равномерном распределении ВС по высоте в пределах одного столбца квантовых состояний, для пересечения SID и STAR вероятность конфликта можно записать в виде (5), где (l, k) – пара номеров связанных продольных сечений (рис. 4).

$$P_{(l,k)} = \frac{|H_l^+ \cap H_k^-|}{|H_l^+| \cdot |H_k^-|}, \quad (5)$$

здесь H_i^\pm – множество допустимых эшелонов по высоте. Важным моментом расчёта является то, что информация о разрешенных эшелонах полета непосредственно определяет значение $p_{(l,k)}$, это позволяет дифференцировать влияние пересечений, расположенных на различном расстоянии от ВПП. Как правило, при удалении от взлетно-посадочной полосы растёт число доступных эшелонов по высоте.

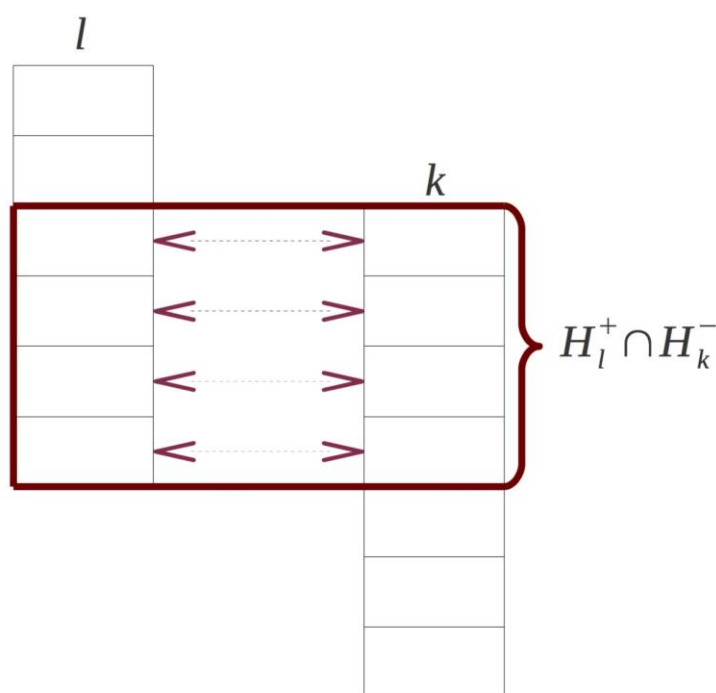


Рисунок 4. Пересечение SID и STAR

Перенумеруем полученные в соответствии с (5) $p_i = p_{(l,k)}$ для всех связанных l и $k, i = \overline{1, M}$ – номер пересечения ВТ.

Далее, принимая в качестве рабочего приближения предположение о том, что в один такт времени в аэродромной зоне может произойти не более одной конфликтной ситуации, можно записать вероятность ее возникновения (6).

$$K = K_1 = \overline{p_1 p_2 \cdots p_M} + \overline{p_1 p_2 \cdots p_M} + \cdots + \overline{p_1 p_2 \cdots p_M}, \quad (6)$$

здесь $\overline{p_i} = 1 - p_i$. Из (6) можно заключить, что в величине κ_1 сконцентрирована вся информация о пересечениях SID/STAR.

При возникновении конфликтной ситуации необходимо принимать решение, из какого потока будет удалено ВС – взлетающих или заходящих на посадку. Для описания этого выбора вводится величина a_i – приоритет потока заходящих на посадку для i -го пересечения SID/STAR. При возникновении конфликта ВС из потока взлетающих будет удалено из системы с вероятностью α_i , а из потока заходящих на посадку $-(1 - \alpha_i)$. Очевидно, что физически подобное исключение из потока означает, что ВС должно было остаться на один такт времени на аэродроме или в зоне ожидания.

$$\alpha_i p_i = \alpha = const \quad (7)$$

Исходя из определения приоритета потока (7) реализации SID и STAR будут равновероятны. При удалении ВС из потока образуется «дырка», приводящие к простоя ВПП. Вероятность простоя ВПП в текущий момент времени равна вероятности того, что в предыдущий момент времени на крайнем сечении SID или STAR находилась «дырка». Выражение для этой вероятности можно получить комбинаторно для STAR:

$$P^+ = \frac{C_{N-1}^i}{C_N^i} = \frac{N-i}{N} \quad (8)$$

и аналогично для SID:

$$P^- = \frac{N-j}{N} \quad (9)$$

Учитывая то, что события связанные с возникновением конфликтов и уходов дырок, являются попарно независимыми, эволюцию заполнения SID и STAR можно

рассматривать как марковскую цепь. Для максимизации пропускной способности аэропорта необходимо, чтобы поток поступающих в систему ВС был стационарен и плотен.

На рис. 4 представлены все возможные переходы из состояния (i, j) . Для определения вероятностей этих переходов, необходимо выделить элементарные события, которые могут происходить в данной системе. В первую очередь необходимо рассмотреть событие, связанное с возникновением конфликтной ситуации, вероятность возникновения которого P_c пропорциональна долям заполнения воздушными судами $SID \frac{i}{N}$ и $STAR \frac{j}{N}$. В качестве коэффициента пропорциональности используется сложность топологии κ .

$$P_c = \kappa \frac{i}{N} \frac{j}{N} \quad (10)$$

При возникновении конфликтной ситуации необходимо устранить одно из ВС из потока. Выбор соответствующего ВС происходит на основе величины α – приоритета потока взлетающих ВС по сравнению с потоком заходящих на посадку. В этом случае вероятность исключения ВС из потока взлетающих равна $(1 - \alpha)P_c$, а из потока заходящих на посадку – αP_c .

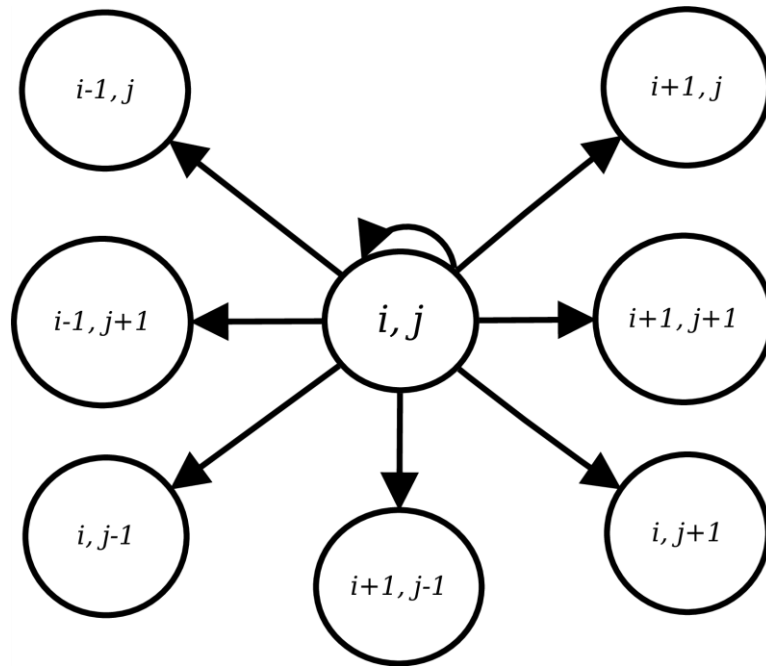


Рисунок 5. Переходы из состояния (i, j)

Таким образом могут быть получены вероятности для следующих элементарных событий:

- при конфликте было устранено ВС со STAR $(1-\alpha)P_c$
- при конфликте было устранено ВС с SID αP_c ,
- заполнение SID увеличилось на единицу P^- ,
- заполнение STAR увеличилось на единицу P^+ .

Обозначив вероятности дополненных событий как $Q_c = 1 - P_c$, $Q^- = 1 - P^-$, $Q^+ = 1 - P^+$, условные вероятности переходов в марковской цепи можно записать на основе вероятностей элементарных событий P_c , P^- , P^+ следующим образом

,

$$\begin{aligned}
P[(i-1, j)|(i, j)] &= \alpha P_c Q^- Q^+, \\
P[(i, j-1)|(i, j)] &= (1-\alpha) P_c Q^- Q^+, \\
P[(i-1, j+1)|(i, j)] &= \alpha P_c Q^- P^+, \\
P[(i+1, j)|(i, j)] &= Q_c P^- Q^+ + (1-\alpha) P_c P^- P^+, \\
P[(i, j+1)|(i, j)] &= Q_c Q^- P^+ + \alpha P_c P^- P^+, \\
P[(i+1, j+1)|(i, j)] &= Q_c P^- P^+,
\end{aligned} \tag{10}$$

Вероятность остаться в том же состоянии $P[(i, j)|(i, j)]$ определяется из условия нормировки.

Уравнение эволюции данной системы можно представить в виде (11).

$$\vec{P}(t_{k+1}) = \Lambda \vec{P}(t_k) \tag{11}$$

Здесь $\vec{P}(t_k)$ – вектор вероятностей нахождения системы в одном из состояний. Λ формируется на основе вероятностей условных переходов марковской цепи, определённых выше.

Стационарное решение при $\vec{P}(t_{k+1}) = \vec{P}(t_k) = \vec{P}$ получается из решения следующего уравнения

$$(I - \Lambda) \vec{P} = 0 \tag{12}$$

где I – единичная матрица. Будучи дополнено условием нормировки (13)

$$\sum_{i,j} P(i, j) = 1 \tag{13}$$

уравнение (10) становится неоднородным и может быть легко решено методом Гаусса с выделением главного элемента.

На основе стационарных вероятностей \vec{P} можно определить пропускную способность аэропорта. Под пропускной способностью в данном представлении понимается разность пропускной способности ВПП и среднего числа ВС, удаленных

из системы по причине возникновения конфликтных ситуаций. Таким образом вычисление пропускной способности сводится к вычислению среднего числа ВС, находящихся в системе квантовых состояний

$$C = \sum_{i,j} (i + j) P_{i,j} \quad (14)$$

Для того чтобы определить, насколько наличие пересечения воздушных трасс в зоне аэродрома может повлиять на теоретическую оценку пропускной способности, следует сравнить результат, полученный выше с пропускной способностью ВПП C_{AAR} . Последняя определяется исходя из того, что в системе отсутствуют «дырки», и каждую единицу времени происходит операция взлета и посадки. В этом случае выражение для пропускной способности ВПП имеет простой вид:

$$C_{AAR} = 2N \quad (15)$$

В случае отсутствия пресечений ВТ $k = 0$ (14) переходит в (15).

На основе предложенной модели была построена зависимость пропускной способности нормированной на пропускную способность ВПП от сложности топологии (рис. 6).

Стоит отметить, что данная зависимость имеет нелинейный характер и при максимальном значении $k = 1$ достигает значений 0.75. По предварительным оценкам величина k для реальных топологий ВТ не будет превышать значения 0.3, но даже в этом случае пропускная способность с учетом потенциальных конфликтов может отличаться от пропускной способности ВПП на 10%. Данный результат показывает, что необходимо учитывать потенциальное влияние пересечения ВТ на искомую величину для точной оценки пропускной способности аэродромной

воздушной зоны.

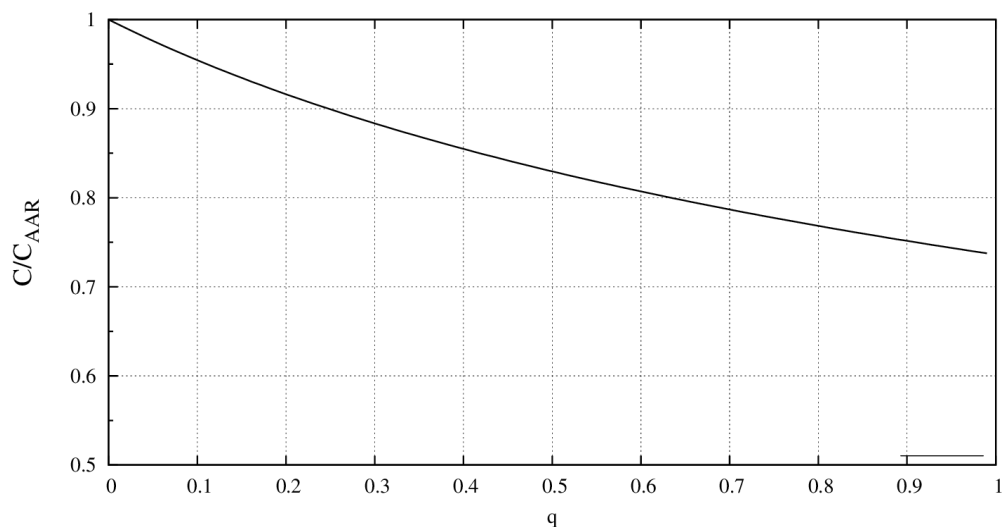


Рисунок 6. Зависимость нормированной пропускной способности аэродрома от сложности топологии.

Данная зависимость является универсальной в том смысле, что ограничение пропускной способности для произвольной пары SID/STAR может быть получено как точка на приведенном выше графике.

3. Вычисление зависимости пропускной способности аэропорта от сложности топологии аэродромной зоны для Московского авиаузла

На основе аэронавигационных карт были подготовлены входные данные для описанной выше модели. Они включают в себя

- список SID/STAR для заданного аэродрома для различной розы ветров
- каждая воздушная трасса характеризуется координатами своих ППМ – точки пролета, заданными в системе координат WGS84
- для каждого участка ВТ определены максимальные скорость движения и

высота полета

Была разработана программная реализация предлагаемой модели, на вход которой подаются описанные выше исходные данные и реализуются следующие этапы обработки:

1. Все координаты переводятся в декартову систему координат на основе проекции Меркатора [11]
2. Для каждой воздушной трассы строится ее непрерывная аппроксимация с учетом линейного упреждения разворота
3. Непрерывные траектории ВТ преобразуются в систему квантовых состояний с учетом заданных норм продольного эшелонирования и эшелонирования по высоте
4. Для различных значений норм эшелонирования в зависимости от типа ВС определяются связанные состояния для каждой пары SID/STAR
5. В соответствии с методикой, описанной в предыдущем разделе для каждой пары вычисляется ее теоретическая пропускная способность
6. Пропускная способность аэропорта оценивается как математическое ожидание пропускных способностей всех пар SID/STAR при использовании гипотезы о равномерном распределении потоков взлетающих и заходящих на посадку ВС по ВТ.

Были получены оценки пропускных способностей для аэропортов Домодедово(DME), Шереметьево(SVO), Внуково(VKO) с учетом различных рабочих полос для значений норм эшелонирования(r_{min})соответствующих различным классам ВС. Результаты представлены на рис. 7.

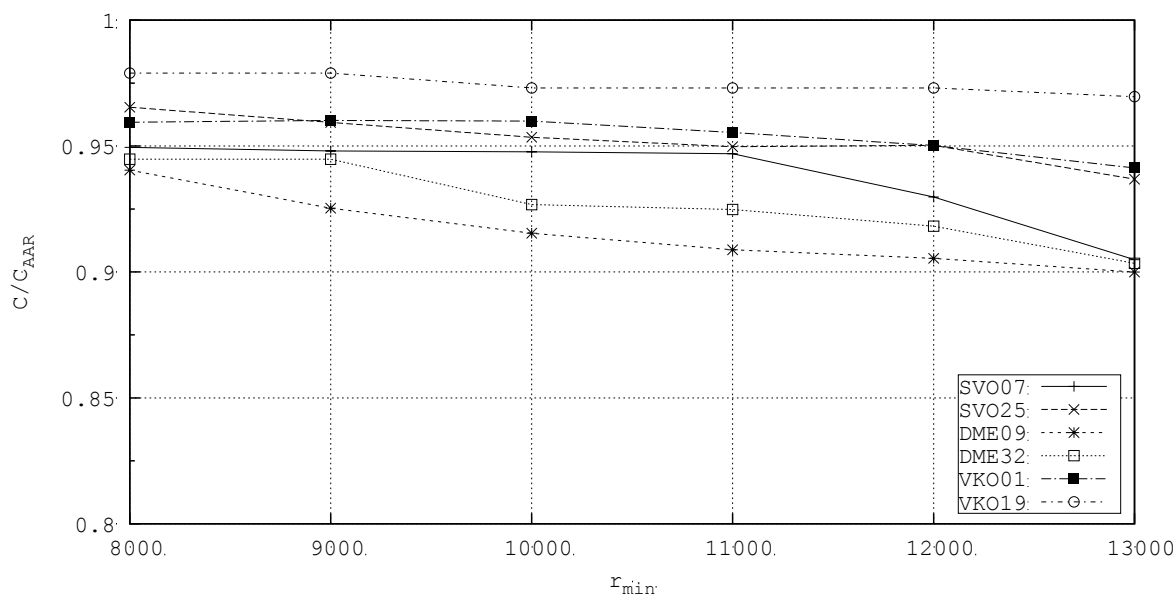


Рисунок 7. Значения пропускных способностей при различных значениях норм эшелонирования

Анализируя полученные данные можно заключить, что влияние пересечений ВТ на пропускную способность аэродрома снижает последнюю относительно пропускной способности ВПП на величину порядка 2-10%. При этом этот эффект наблюдается для разных значений норм эшелонирования. Интересно отметить, что для графиков соответствующих SVO07, DME32, DME09 заметно сильное влияние норм эшелонирования на пропускную способность. Для VKO видно, что рабочая полоса VKO19 является более предпочтительной по сравнению с VKO01. Наиболее сильное влияние из всех рассмотренных случаев наблюдается для DME при рабочей полосе DME09, что можно объяснить достаточной сложной топологией структуры ВП для данного аэродрома.

Заключение

Предложена унифицированная модель пропускной способности аэродрома с учетом

ограничений, накладываемых структурой топологий ВТ. В рамках данной модели получены теоретические оценки влияния топологии ВТ на пропускную способность аэродрома. Предложенный подход к исследованию на основе макрохарактеристик позволяет легко сравнить между собой различные топологии ВТ по критерию максимальной пропускной способности. Данные результаты могут быть применены как при проектировании новых аэродромов, так и для совершенствования структуры ВТ уже существующих. На примере аэропортов МАУ были получены и проанализированы результаты расчетов на основе предложенного подхода.

Автор выражает благодарность профессору В.Л. Кузнецову и профессору А.В. Пантелееву за рекомендации по постановке задачи и полезные дискуссии.

Библиографический список

1. Программа SESAR / Общие сведения. ЦАГИ им. Жуковского
[URL:http://www.tsagi.ru/ncp/sesar/main/](http://www.tsagi.ru/ncp/sesar/main/) (дата обращения: 21.03.2015).
2. Этап определения проекта SESAR. Отчет D2: Структура воздушного транспорта. Целевые характеристики // ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»,
[URL:http://dspk.cs.gkovd.ru/library/data/D2_struktura_vozdushnogo_transporta_tselevye_harakteristiki.pdf](http://dspk.cs.gkovd.ru/library/data/D2_struktura_vozdushnogo_transporta_tselevye_harakteristiki.pdf) (дата обращения: 02.12.2015).
3. Программа развития систем организация воздушного движения Европы и США SESAR и NextGen / Под ред. Е.А. Феодосова. – М.: ГосНИИАС, 2011. – 256 с.
4. ИКАО Doc 4444. Правила аэронавигационного обслуживания "Организация

- воздушного движения"(PANS-ATM). Издание пятнадцатое. 2007. 474 с.
5. Odoni A., Deyst J., Feron E., Hansman R., Khan K., Kuchar J., Simpson R. Terminal airspace Capacity Model // Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and concepts, Vol. 1, 1997, PP. 253-260.
 6. Кузнецов В.Л., Чепурина А.А. Об одной аналитической модели пропускной способности аэропорта // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 169. С. 94-98.
 7. Кузнецов В.Л., Филонов П.В., Чепурина А.А. Задача о пропускной способности аэропорта в формализме ферми-систем // Труды научно-технического семинара «Состояние и перспективы развития автоматизированных систем планирования использования воздушного пространства в РФ». Москва, ГосНИИАС, 2011. С. 230–234.
 8. Кузнецов В.Л., Филонов П.В., Чепурина А.А. Метод построения системы квантовых состояний в модели расчета пропускной способности аэропорта // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 184. С. 23–28.
 9. ICAO Circular 319 Methodology for the Determination of Separation Minima (Doc 9689), 2009, С. 60.
 10. Филонов П.В., Филонова А.А. Уравнение эволюции в квантовой модели аэродромной воздушной зоны в терминах марковской цепи // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 195. С. 58-64.
 11. В. Hofmann-Wellenhof H. Lichtenegger J. Collins. Global Positioning System. Theory and Practice. Wien, New York: Springer-Verlag., 1992, P. 343.