

Моделирование пассажиропотоков региональной сети аэропортов

Я.М. Далингер

Кафедра прикладной математики

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: iakovdalingер@gmail.com

Аннотация¹

В статье представлена математическая модель пассажиропотоков для расчета параметров при заданной структуре региональной сети аэропортов. Данная модель позволяет сравнивать различные структуры сети, определять «узкие» места в сети. Приведенные результаты работы могут быть полезны при анализе и оптимизации структур региональных сетей аэропортов

1. Введение

Одними из основных параметров работы региональной сети аэропортов являются интенсивности пассажиропотоков между аэропортами, поскольку они оказывают сильное влияние на характеристики работы сети (загрузка аэропортов, загрузка авиарейсов, затраты на перевозки, получаемая прибыль и т.д.), а также на решения по организации работы аэропортов.

2. Постановка задачи

Пассажиропотоки целесообразно разделять на планируемые и фактические.

Планируемые потоки определяются, в основном, текущими и прогнозируемыми потребностями населения региона в перемещении пассажиров по региону и за его пределы, которые меняются в зависимости от многих факторов (сезон, метеосостояние, время суток, миграция внутри региона, социально экономические факторы и т.д.). Интенсивность планируемых потоков определяется путем статистических исследований, прогнозов развития региона, анализа прошедших периодов и т.д. Планируемые потоки являются основой для составления маршрутов и расписаний движения авиасудов на определенный период времени [1, 2].

Интенсивность фактических потоков определяются осуществляемыми авиарейсами между аэропортами,

и прямо зависит от маршрутов и расписания авиарейсов, используемых авиасудов и их загрузки, а также от принимаемых решений по управлению сетью и отдельными аэропортами при воздействии внешних факторов.

Большое влияние на показатели качества работы сети и отдельных аэропортов имеют также интенсивности прямых и транзитных пассажиропотоков между аэропортами определяемые установленными маршрутами авиаперевозок в регионе.

Интенсивность планируемых пассажиропотоков между аэропортами i и j в момент времени t обозначим $\lambda_{ij}(t)$, где $i, j = 1, 2, \dots, N$. Здесь N – число аэропортов региона (обслуживающих пассажиропотоки региона), сюда могут входить как аэропорты региона, так и внешние аэропорты, которые обслуживают авиаперевозки с региональными аэропортами.

Решения по организации работы аэропорта принимаются на основе анализа планируемых потоков и составленных на этой основе маршрутов и расписаний перелетов, и корректируются в соответствии с параметрами фактических потоков, обслуживаемых аэропортом.

3. Модель пассажиропотока

Планируемый пассажиропоток между аэропортами региона i и j – это поток пассажиров, которым требуется осуществить перелет из аэропорта i в аэропорт j , и эти аэропорты являются начальным и конечным пунктами перемещения пассажиров этого потока.

Из интенсивностей λ_{ij} можно составить матрицу интенсивностей планируемых пассажиропотоков между аэропортами региона – $\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$, $i, j = 1, 2, \dots, N$.

Каждый аэропорт i ($i = 1, 2, \dots, N$) обслуживает пассажиропотоки трех типов:

Труды четвертой международной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 17 - 19 мая, Уфа, Россия, 2016

- поток пассажиров, для которых аэропорт является конечным пунктом перемещения, интенсивность

$$A_{0i} = \sum_{j=1}^N \lambda_{ji};$$

- поток транзитных пассажиров, для которых аэропорт является пунктом пересадки, интенсивность A_{1i} ;

- поток отбывающих пассажиров, для которых аэропорт является начальным пунктом перемещения, интенсивность $A_{2i} = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}$.

Суммарный пассажиропоток, включающий пассажиропотоки всех трех типов – полный пассажиропоток, обслуживаемый аэропортом i . Интенсивность полного пассажиропотока вычисляется по формуле: $A_i = A_{0i} + A_{1i} + A_{2i}$.

Справедливы равенства: $\sum_{i=1}^N A_{0i} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}$,

$$\sum_{i=1}^N A_{2i} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}, \quad \sum_{i=1}^N A_{0i} = \sum_{i=1}^N A_{2i}.$$

При этом $A_i = \sum_{i=1}^N A_i - \sum_{i \in \Gamma_j} \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}$ это суммарная интенсивность транзитных пассажиропотоков в региональных авиаперевозках.

Пусть известен граф прямых перелетов между аэропортами региона $G(X, R)$. Множеству вершин графа $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ соответствуют аэропорты, а множеству ребер R прямые маршруты между аэропортами. Матрица $\mathbf{R} = \|r_{ij}\|$, является матрицей смежности графа $G(X, R)$, где $r_{ij} = 1$, если существует прямой перелет (прямой маршрут) от аэропорта i до аэропорта j и $r_{ij} = 0$, если не существует прямого маршрута от аэропорта i до аэропорта j ($i, j = 1, 2, \dots, N$) [3].

Для возможности перелетов между любыми двумя аэропортами необходимо, чтобы граф был связным [3].

На основе этой матрицы $\mathbf{R}$ можно определить маршруты перелетов.

Считаем, что между любыми двумя аэропортами существует один маршрут. Маршрут однозначно задается порядком перелетов между аэропортами. Для этого маршруту от аэропорта i до аэропорта j ($i, j = 1, 2, \dots, N$) ставится в соответствие вектор маршрута $\mathbf{z}_{ij} = (z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijN})$, где z_{ijk} – номер аэропорта, который на маршруте будет k -м по счету.

Здесь $z_{ij1} = i$, $z_{ijn} = j$ и $z_{ijr} = 0$, $r = n+1, \dots, N$, если аэропорт j будет n -м на данном маршруте ($N \geq n > i$). Применение вектора $\mathbf{z}_{ij}$ на практике не всегда удобно, поэтому маршрут перелетов от аэропорта i до аэропорта j можно описать маршрутным вектором $\mathbf{m}_{ij} = (m_{ij1}, m_{ij2}, \dots, m_{ijN})$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$), где $m_{ijk} = 1$, если аэропорт k входит в маршрут между аэропортами i и j и $m_{ijk} = 0$, если аэропорт k не входит в маршрут между аэропортами i и j . Здесь $m_{ji} = m_{ij} = 1$, так как это начальная и конечная точки маршрута между аэропортами i и j . Однако данный вектор не однозначно определяет маршрут.

Имеется соответствие между векторами $\mathbf{z}_{ij} = (z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijN})$ и $\mathbf{m}_{ij} = (m_{ij1}, m_{ij2}, \dots, m_{ijN})$, так $m_{ijk} = 1$, если существует компонента вектора $z_{ijn} = k$ ($n = 1, 2, \dots, N$). Таким образом, для заданного вектора маршрута $\mathbf{z}_{ij} = (z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijN})$ можно построить соответствующий маршрутный вектор $\mathbf{m}_{ij} = (m_{ij1}, m_{ij2}, \dots, m_{ijN})$, но обратное утверждение не верно.

Число транзитных аэропортов для заданного маршрута при перелете от аэропорта i до аэропорта j – $t_{ij} = (\sum_{k=1}^N m_{ijk} - 2)$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$).

Здесь не учитываются начальный и конечный аэропорты маршрута.

Для каждого вектора $\mathbf{m}_{ij}$:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N m_{ijk} m_{ijn} r_{kn} = (\sum_{k=1}^N m_{ijk} - 1) \quad (i, j = 1, 2, \dots, N).$$

4. Расчет параметров модели

Для вычисления суммарных фактических транзитных потоков авиапассажиров, обслуживаемых аэропортом k , можно воспользоваться маршрутными векторами. Так, аэропорт k обслуживает транзитный поток пассажиров, следующих из аэропорта i в аэропорт j , только если $m_{ijk} = 1$ и интенсивность этого транзитного потока равна: $\beta_{1kij} = m_{ijk} \lambda_{ij}$, где $k \neq i$, $k \neq j$.

Величина суммарной интенсивности всех фактических транзитных потоков, обслуживаемых аэропортом k , может быть вычислена по формуле:

$$A_{1k} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{1kij} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\lambda_{ij} m_{ijk} - \lambda_{kj} m_{kjk} - \lambda_{ik} m_{ikk}),$$

$$k = 1, 2, \dots, N.$$

Значение величины суммарной интенсивности потока авиапассажиров, обслуживаемого аэропортом k :

$$A_k = \sum_{j=1}^N \lambda_{jk} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\lambda_{ij} m_{ijk} - \lambda_{kj} m_{kjk} - \lambda_{ik} m_{ikk}) + \sum_{j=1}^N \lambda_{kj},$$

$$k = 1, 2, \dots, N.$$

Формула дает возможность определить количественное значение параметров аэропортов региона при заданных параметрах планируемых потоков авиапассажиров, заданном графе прямых перелетов и заданных маршрутах.

Более тонкий анализ пассажиропотоков можно провести, если знать вклад каждого аэропорта в фактические пассажиропотоки.

Полный пассажиропоток от аэропорта j до аэропорта i – это все пассажиры, прибывающие из аэропорта j в аэропорт i . Интенсивность полного пассажиропотока β_{ji} ($i, j = 1, 2, \dots, N$) зависит от маршрутов авиаперевозок в регионе. Очевидно, что

$$A_i = \sum_{j=1}^N \beta_{ji} + \sum_{j=1}^N \beta_{ij}.$$

Полный пассажиропоток между аэропортами j и i разделяется на два потока:

- прямой пассажиропоток интенсивности β_{0ji} ($\beta_{0ji} \geq 0$), когда аэропорт i является конечным пунктом перемещения авиапассажиров, отбывающих из аэропорта j ;

- транзитный пассажиропоток интенсивности β_{1ji} ($\beta_{1ji} \geq 0$), когда аэропорт i является пунктом пересадки для пассажиров, прибывающих из аэропорта j .

Для всех $i, j = 1, 2, \dots, N$: $\beta_{ji} = \beta_{0ji} + \beta_{1ji}$.

Справедливы также равенства: $A_{0i} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \beta_{0ji}$ и

$$A_{1i} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \beta_{1ji} \quad (i = 1, 2, \dots, N).$$

Значение интенсивности β_{0ji} вычисляется как сумма интенсивностей пассажиропотоков из всех аэропортов до аэропорта i , для которых аэропорт i является конечным пунктом маршрута, а аэропорт j является либо начальным пунктом маршрута, либо

транзитным. Так, что $\beta_{0ji} = \sum_{k=1}^N \lambda_{ki} m_{kij} m_{kii}$.

Значение величины β_{1ji} складывается из интенсивностей всех потоков, проходящих из аэропорта j в аэропорт i , и являющихся транзитными для этих аэропортов, и интенсивности потоков, для

которых аэропорт j является начальным пунктом маршрута, а аэропорт i транзитным. Так, что

$$\beta_{1ji} = \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^N \lambda_{k^*n^*} m_{k^*n^*j} m_{k^*n^*i} + \sum_{k=1}^N \lambda_{jk} m_{jki} - \lambda_{ji} m_{jii}$$

, где для любой пары (k^*, n^*) существуют $1 \leq r, m < N$, такие, что $z_{k^*n^*r} = j$, $z_{k^*n^*m} = i$, $r < m$ и $z_{k^*n^*(m+1)} \neq 0$.

Величины β_{0ji} , β_{1ji} , β_{ji} можно объединить в матрицы

$$\mathbf{B}_0 = \|\beta_{0ij}\|, \quad \mathbf{B}_1 = \|\beta_{1ij}\| \quad \text{и} \quad \mathbf{B} = \|\beta_{ij}\| \quad (i, j = 1, 2, \dots, N).$$

При этом: $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1$.

Полученные формулы дают возможность вычислить интенсивности потоков авиапассажиров, пребывающих в аэропорт i из аэропорта j , что позволяет планировать работу аэропорта i по обслуживанию пассажиропотока из аэропорта j .

Маршрутной сетью региона будем называть множество маршрутов прямых перелетов между аэропортами региона, маршрутную сеть можно задать графом прямых перелетов. От организации маршрутной сети зависит загрузка аэропортов и авиасудов, качество обслуживания авиапассажиров.

Пусть известен граф прямых перелетов между аэропортами региона $G(X, R)$, соответствующая ему матрица смежности $\mathbf{R}$. Используя матрицы $\mathbf{B}$, $\mathbf{B}_0$, $\mathbf{B}_1$ и матрицу $\mathbf{R}$ можно определить значения интенсивностей пассажиропотоков на прямых перелетах между аэропортами.

Так, матрица интенсивностей полных пассажиропотоков между аэропортами, которые связаны прямыми перелетами, $\mathbf{W} = \|w_{ij}\|$

($i, j = 1, 2, \dots, N$), вычисляется следующим образом:

$w_{ij} = \beta_{ij} r_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$). Матрица интенсивностей

прямых пассажиропотоков между аэропортами, которые связаны прямыми перелетами, $\mathbf{W}_0 = \|w_{0ij}\|$

($i, j = 1, 2, \dots, N$), вычисляется следующим образом:

$w_{0ij} = \beta_{0ij} r_{ij}$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$). Матрица

интенсивностей транзитных пассажиропотоков между аэропортами, которые связаны прямыми

перелетами, $\mathbf{W}_1 = \|w_{1ij}\|$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$), вычисляется

следующим образом: $w_{1ij} = \beta_{1ij} r_{ij}$

($i, j = 1, 2, \dots, N$).

Используя матрицы $\mathbf{W}$, $\mathbf{W}_0$, $\mathbf{W}_1$ можно определить

количество авиационной техники различных типов,

необходимой для прямых перевозок пассажиров,

между аэропортами, составить расписание для

аэропортов.

Полученные формулы позволяют проводить

системный анализ работы аэропортов, решать задачи

оптимизации сети региональных авиаперевозок и ее элементов.

Результаты вычислений можно использовать для расчета эффективности организации перелетов и маршрутной сети.

5. Заключение

Установлена зависимость параметров пассажиропотоков аэропортов региона от маршрутов авиаперевозок и получены формулы для проведения расчетов с учетом этой зависимости.

Показано, что параметры пассажиропотоков аэропортов региона являются взаимозависимыми, что требует рассмотрения региональной сети аэропортов как единой системы.

Полученные результаты позволяют решать задачи оптимизации маршрутов, параметров аэропортов и всей системы региональных авиаперевозок.

Список используемых источников

1. Коростелева Н.Г. “Применение математических методов в планировании пассажирских перевозок”. Транспорт, Москва, 1982.
2. Леонтьев Р.Г. “Прогнозирование авиাপотоков и оптимизация управления воздушной транспортной системой”. Наука, Москва, 1984.
3. Кристофидес Н. “Теория графов. Алгоритмический подход”. Мир, Москва, 1978.