

УДК 629.735.051:004.7 (043.3)

Водопьянов С. В., аспирант. Тел +380 (67) 408 81 30. E-mail : s.vodopianov@abris-print.com
(Национальный авиационный университет, г. Киев)

КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ АЭРОУЗЛА В ЗАДАЧЕ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

Vodop'yanov S. V. A correlation-regressive analysis of the key performance indicators of aeroknot communication network in the task of air traffic organization. The analysis and grounding of the system of the key performance indicators (KPI) for the estimation the state and control quality of service of modern network infrastructure of large air cluster is executed. Based on the methods of stepwise regression the methodology of current estimation and prognosis of network parameters and state, and their impact on final efficiency of air traffic service is developed. The results of calculations of correlation matrix of key performance indicators are resulted and statistical dependence between basic parameters are analysed. When those parameters are supported the optimal air traffic management is provided. Using the key performance indicators of information-computer network as a complex system with the delays of signal and controls information it is possible to provide the prediction of its state and decide the tasks of quality of service management in a real time.

Keywords: air traffic management, integer optimisation, information, calculation and control network, key performance indicators, stepwise regression

Водоп'янов С. В. Кореляційно-регресійний аналіз ключових параметрів ефективності комунікаційної мережі аероузла в задачі організації повітряного руху. Виконаний аналіз і обґрунтування системи ключових показників ефективності (КПЕ) для оцінки стану і управління якістю сервісу сучасної мережевої інфраструктури крупного аероузла. Із застосуванням методів покрокової регресії розроблена методика поточного оцінювання і прогнозу параметрів і стану мережі. Розглянута задача зміни наборів КПЕ в процесі зміни умов повітряного руху. Приведені результати розрахунків кореляційної матриці ключових показників ефективності і проаналізовані статистичні зв'язки між основними параметрами, від яких залежить продуктивність мережі і якість сервісу. При дотриманні даних параметрів забезпечується оптимальна організація повітряного руху.

Ключові слова: повітряний рух, цілочисельна оптимізація, інформаційно-обчислювальна і управляюча мережа, ключові показники ефективності, покрокова регресія

Водопьянов С. В. Корреляционно-регрессионный анализ ключевых параметров эффективности коммуникационной сети аэроузла в задаче организации воздушного движения. Выполнен анализ и обоснование системы ключевых показателей эффективности (КПЭ) для оценки состояния и управления качеством сервиса современной сетевой инфраструктуры крупного аэроузла. С применением методов пошаговой регрессии разработана методика текущего оценивания и прогноза параметров и состояния сети. Рассмотрена задача изменения наборов КПЭ в процессе изменения условий воздушного движения. Приведены результаты расчетов корреляционной матрицы ключевых показателей эффективности и проанализированы статистические связи между основными параметрами, от которых зависит производительность сети и качество сервиса. При выдерживании данных параметров обеспечивается оптимальная организация воздушного движения.

Ключевые слова: воздушное движение, целочисленная оптимизация, информационно-вычислительная и управляющая сеть, ключевые показатели эффективности, пошаговая регрессия

I. Введение.

В настоящее время на основе использования современных технических средств реализуется концепция гибкой организационной структуры воздушного пространства, что позволяет оперативно изменять границы секторов управления воздушным движением (УВД) в зависимости от складывающейся воздушной обстановки. Осуществляется оптимизация воздушного пространства, обеспечивающая заданный

уровень безопасности воздушного движения, метод обслуживания воздушного движения "от перрона до перрона" и использование технологии зональной навигации (так называемый метод "свободных полетов").

Рассмотрим современные тенденции и перспективы развития систем организации воздушного движения (ОрВД) до 2025 г. [1].

1. Ожидаемое трехкратное повышение интенсивности полетов в воздушном пространстве Европы.
2. Десятикратное улучшение фактора безопасности полетов.
3. Уменьшение влияния климатических условий на безопасность полетов не менее чем на 10%.
4. Уменьшение стоимости операций по управлению воздушным движением не менее чем в два раза.
5. Расширение номенклатуры сервисов, от услуг УВД к услугам связи пассажиров воздушных судов (ВС).
6. УВД будет полностью базироваться на обмене данными. (Имеется в виду максимально возможное применение сетевой организации обмена данными; голосовая связь будет использоваться в нестандартных и аварийных ситуациях.)
7. Расширение полосы частот для задач полетов за маршрутами и для вспомогательных задач.
8. Развитие рынка обслуживания пассажиров.
9. Новые радиосистемы.
10. Снижение расходов на перевозку больших и негабаритных грузов.
11. Эволюция комплексной сетевой архитектуры в направлении сервис-ориентированной архитектуры (SOA).
12. Насыщение каналов связи в результате роста интенсивности воздушного движения.

В соответствии с приведенными соображениями относительно перспектив развития Европейской системы воздушного транспорта можно обосновать требования к информационно-вычислительным и управляющим системам (ИУС) ОрВД:

- улучшение информационного обеспечения экипажей ВС, включая повышение качества обмена информацией между ВС в , между ВС и системами УВД, визуализации навигационной информации с использованием цифровых карт, диаграмм и др.;
- повышение пропускной способности ИУС аэропортов для удовлетворения растущих потребностей перевозчиков в использовании ресурсов аэропорта;
- обслуживание ВД базируется на надежных системах коммуникаций;
- увеличение объема трафика данных для эффективного управления на маршрутах (авиатрассах);
- дальнейшее развитие коммуникационных сервисов для пассажиров в направлениях повышения стабильности, надежности и возможной реконфигурации;
- бортовая сетевая архитектура для подключения каждого пассажирского кресла и пилотских терминалов должна соответствовать стандартным протоколам и интерфейсам;
- стопроцентная изоляция бортовых развлекательных центров от коммуникационных, навигационных и управляющих систем самолета в рамках общей стратегии защиты сетевой и коммуникационной инфраструктуры от несанкционированных вторжений;
- информация о нештатных ситуациях, авиационных событиях, предпосылках к летным происшествиям должна передаваться на наземные пункты управления по специально выделенным надежным, многократно резервированным каналам с такой высокой пропускной способностью, при которой обеспечиваются связь и управление в реальном

времени. Это необходимо для гарантий того, что информация будет своевременно получена и правильно интерпретирована.

Отсюда следует однозначный и вполне ожидаемый вывод, что задача оптимизации ОрВД базируется в т.ч. и на оптимизации ИУС аэропортов и аэроузлов. Для построения математических моделей и методов количественного обоснования взаимосвязи задач ОрВД и ИУС аэроузла предлагается использовать систему так называемых ключевых показателей эффективности (*Key Performance Indicators – KPIs*) [2-4].

Общее число показателей эффективности и результативности работы системы ОрВД весьма велико, поэтому необходимо отобрать такие ключевые показатели [5, 6], которые непосредственно связаны с качеством работы информационно-вычислительной сети как неотъемлемого элемента системы ОрВД. Кроме того, необходимо учитывать, что в процессе текущей ОрВД приоритеты тех или иных ключевых показателей эффективности (КПЭ) могут меняться, следовательно, необходимо предусмотреть возможности текущей приоритизации КПЭ.

Наконец, для обеспечения безопасности полетов, исключения перегрузок отдельных аэроузлов или трасс полетов в выделенных региональных зонах необходимо решать задачи текущего прогноза состояния этих аэроузлов (региональных зон, трасс). Детальному анализу методов решения данных задач и посвящена данная статья.

II. Основные направления развития сетевой авиационной инфраструктуры

В соответствии с рассмотренными выше тенденциями развития систем ОрВД можно предположить, что перспективная информационно-коммуникационная сеть государственной авиационной администрации (ИКОМ ГАА) будет базироваться на многослойной структуре с несколькими уровнями иерархии. Основным автономным элементом авиатранспортной инфраструктуры является аэроузел – близко расположенные аэродромы, организация и выполнение полетов с которых требуют специального согласования и координирования. Другими словами, обслуживание воздушного движения (ОВД), управление воздушным движением (УВД) в зоне аэроузла, предоставление пассажирских сервисов и т.п. должны выполняться совместно в рамках единой задачи ОрВД. Важнейшей и неотъемлемой частью задачи ОрВД является обеспечение безопасности полетов (БП).

Основным звеном сетевой инфраструктуры является совокупность сетей авиационной электросвязи, локальных компьютерных сетей центров УВД, других сетей, объединенных в корпоративную сеть системы ОрВД.

Наивысшим уровнем в иерархии является уровень обмена данными государственной авиационной администрации с зональными аэроузлами, которые расположены на трассах полетов в выделенных региональных зонах. Обмен данными осуществляется в пределах страны в целом. На этом уровне собираются данные об общем состоянии, параметрах загруженности воздушного пространства, безопасности полетов, согласования воздушного движения (ВД) гражданской, военной, специальной, малой авиации и т.д. По текущим данным, которые доставляются непрерывно в реальном времени, решаются задачи ОрВД в аэроузловых зонах.

На втором уровне иерархии находятся информационно-коммуникационные и вычислительные сегменты отдельных аэроузлов. В каждом из таких сегментов осуществляется обмен данными между отдельными аэродромами и авиакомпаниями. По существу, второй уровень сетевой иерархии является уровнем ОрВД в пределах отдельного аэроузла.

Следующие уровни иерархии строятся в соответствии с многоуровневой структурой, приведенной на Рис. 1.

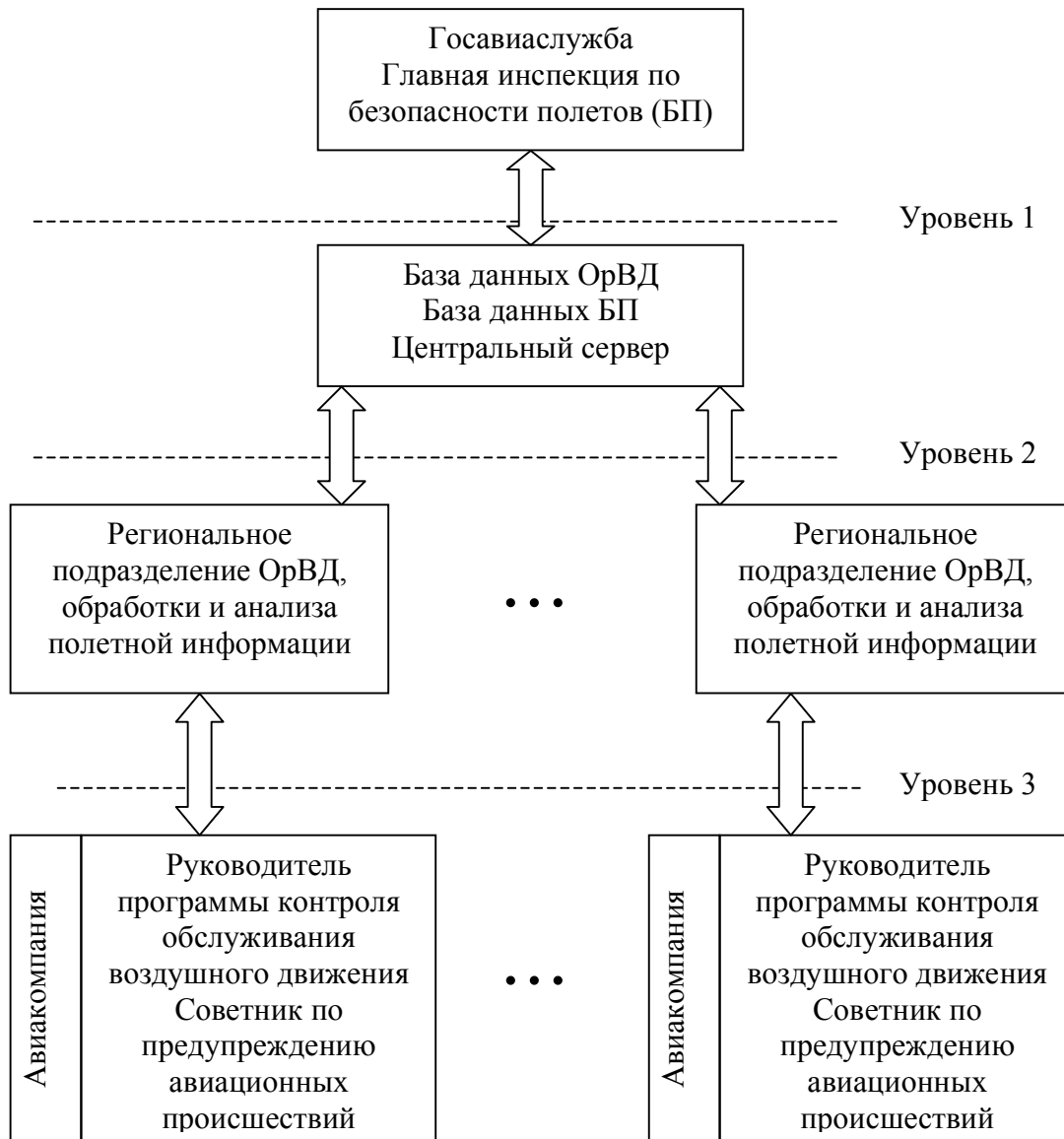


Рис. 1. Структура перспективной системы информационно-коммуникационного обеспечения авиационной администрации масштаба государства

Задача организации полетов в зоне крупного аэроузла представляет собой совокупность процессов управления в системе организации воздушного движения (ОрВД) и формально сводится к целочисленной оптимизации в реальном времени [7]. Рассмотрим математическую формулировку задачи.

III. Задача оптимальной организации воздушного движения с ограничениями

Основой модели целочисленного комбинаторного программирования, которая применяется для маршрута полета, является классическая задача минимизации, которая относится к классу стандартных задач размещения с ограничениями:

$$\min \left(\sum_{j=1}^m c_j y_j + \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i \frac{1}{r_{ij}} x_{ij} \right) \quad (1)$$

при условии нормировки

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i \in I \quad (2)$$

и дополнительных ограничений

$$x_{ij} \leq y_j; \quad x_{ij}, y_j \in \{0;1\}; \quad i \in I, j \in M. \quad (3)$$

Первое слагаемое в целевой функции соответствует общей стоимости полета от аэропорта вылета до аэропорта прибытия или конечного пункта маршрута (КПМ) через m смежных секторов маршрута. Здесь c_j – весовые коэффициенты, выбираемые, исходя из конкретных характеристик и условий работы аэроузла;

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если ППМ установлен в } j\text{-й точке;} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad \text{для всех } j \in M;$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й ППМ связан с } j\text{-м КПМ;} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad \text{для всех } i \in I \text{ и } j \in M.$$

Так как $1/r_{ij}$ пропорциональна стоимости полета от i -го сектора, связанного с j -м аэропортом прибытия, вторым слагаемым описывается искомый промежуточный пункт маршрута (ППМ), для которого общая задержка полета минимальна. Поскольку критерии поиска минимума по обоим слагаемым противоречивы, вводится некоторый коэффициент компромисса $\mu \geq 0$. Условие (2) является гарантией, что каждый i -й ППМ ассоциируется с единственным КПМ. Ограничивающее условие (3) означает, что ППМ заданы только для тех точек, от которых гарантировано прибытие в КПМ. Отметим, что, поскольку переменные x_{ij} являются бинарными, в каждом допустимом решении все активные рейсы могут быть отнесены только к одному ППМ.

Введем дополнительные бинарные переменные, которыми определяются промежуточные решения:

$$w_{j,t}^f = \begin{cases} 1, & \text{если рейс } f \text{ прибывает в сектор } j \text{ к моменту времени } t; \\ 0, & \text{в ином случае.} \end{cases}$$

Это определение решающих переменных с использованием термина «к моменту» вместо термина «в момент» является критичным для понимания формулировки. Переменные определяются только для того набора секторов, через которые может пролетать воздушное судно (ВС) по маршруту к аэропорту назначения. Вдобавок, переменные используются для аэропортов вылета и назначения, чтобы определить оптимальные моменты времени для вылета и прибытия соответственно. Поскольку мы не рассматриваем отмены полетов, для каждого рейса можно априори зафиксировать, по крайней мере, две переменных: каждый самолет должен вылететь в конце отведенного интервала (временного слота) и, соответственно, приземлиться в течение отведенного временного слота, который определяется временем вылета.

Модифицируем составляющие целевой функции в соответствии с введением дополнительных решающих переменных. Дополнительный аддитивный компонент целевой функции (ЦФ) – комбинация текущих стоимостей задержки в полете d_{AH} (*airborne-holding delay*) и задержки на земле d_{GH} (*ground-holding delay*). Здесь под стоимостью понимают не только финансовые затраты, но и в более широком смысле – имиджевые потери

авиакомпаний, снижение доверия пассажиров и др., и, в первую очередь – снижение уровня БП (увеличение рисков авиационных событий).

Очевидно, что средняя задержка в воздухе \bar{d}_{AH} за единицу времени имеет более высокую стоимость, чем средняя задержка на земле \bar{d}_{GH} : $\bar{d}_{AH} > \bar{d}_{GH}$.

Для объективного установления стоимостей используем весовые коэффициенты, которые являются т.н. ультралинейными функциями задержки полета $d^{1+\varepsilon}$, $\varepsilon > 0$.

В работе [7] предложено брать функцию вида $(d - t_{ak})^{1+\varepsilon}$ при ε , близком к нулю. Здесь t_{ak} – момент прибытия k -го рейса по расписанию.

Однако в настоящее время при организации интенсивного воздушного движения в зоне крупных аэроузлов, как правило, оперируют дискретными интервалами времени (слотами). Если при этом, кроме целого числа слотов занята только часть слота, даже сколь угодно малая, этот слот рассматривается как полностью использованный. Например, если рейс задерживается на земле в течение $n-1$ слотов плюс некоторая доля n -го слота, отсюда вытекает стоимость $n^{1+\varepsilon_1}$, $\varepsilon_1 > 0$. Поэтому вместо функции вида $(d - t_{ak})^{1+\varepsilon}$ предлагается брать функцию вида

$$\Psi_{add}(d) = \lceil (d - t_{ak}) \rceil^{\lceil 1+\varepsilon \rceil}, \quad (4)$$

где $\lceil x \rceil$ – ближайшее (больше) к x целое число.

На Рис. 2 изображены графики целевых функций вида (4) для различных значений ε . Отметим, что при $\varepsilon=0$ целевая функция (4) является линейной, а при $\varepsilon=1$ – квадратичной. Благодаря такой гибкости выбранной целевой функции можно регулировать как скорость сходимости алгоритма оптимизации, так и риск заикливания на локальных экстремумах.

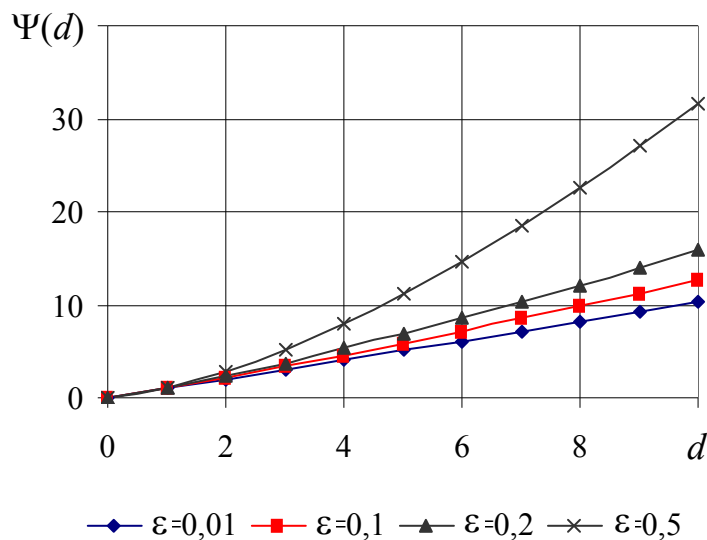


Рис. 2 Целевые функции для разных значений ε

При использовании предложенных весовых коэффициентов стоимости предпочтительнее брать усредненную сумму значений задержки на земле каждого рейса, чем брать малое значение одной задержки и большое значение другой. Такие же коэффициенты стоимости используются при задержках в воздухе. Однако, для выполнения условия $\bar{d}_{AH} > \bar{d}_{GH}$ необходимо выбирать для задержки в воздухе коэффициент $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$. В

результате в моделі буде отдаватися предпочтение задержке на земле, чем более дорогостоящей задержке в воздухе.

Следовательно, ЦФ есть сумма величин $d_{AH,f}^{1+\varepsilon_2} + d_{GH,f}^{1+\varepsilon_1}$, где $d_{AH,f}$ и $d_{GH,f}$ – задержки в воздухе и на земле для случая рейса f . Если ε_1 и ε_2 близки к нулю, т.е. составляющие ЦФ являются слабо ультралаинейными, допустима следующая аппроксимация [7]:

$$\Psi(d_\Sigma) = d_{AH,f}^{1+\varepsilon_2} + d_{GH,f}^{1+\varepsilon_1} \cong d_\Sigma^{1+\varepsilon_2} - (d_{AH,f}^{1+\varepsilon_2} - d_{GH,f}^{1+\varepsilon_1}), \quad (5)$$

где $d_\Sigma = \bar{d}_{AH} + \bar{d}_{GH}$ – сумма средних задержек рейса на земле и в воздухе.

Если же ε_1 и ε_2 нельзя считать близкими к нулю, необходимо или брать точные выражения для целевой функции $\Psi(d_\Sigma) = d_{AH,f}^{1+\varepsilon_2} + d_{GH,f}^{1+\varepsilon_1}$, или применять более точные методы аппроксимации (например, разложение в ряд Тейлора, аппроксимацию полиномом или аппроксимацию Паде). Выражение (5) усложняется, но суть задачи минимизации не меняется. Она остается задачей целочисленного программирования с неполиномиальной сложностью.

Кроме того, в зависимости от выдвигаемых требований к точности выдерживания плана полетов, специфики и интенсивности полетов, доставки грузов или пассажиропотоков иногда допустимо устанавливать менее жесткие условия работы аэроузла и, соответственно, выбирать другой вид целевой функции. В данной работе предлагается в качестве ЦФ использовать производную ультралаинейной функции:

$$f'(d) = (1 + \varepsilon_1) \cdot (d - t_{ak})^{\varepsilon_1}, \quad \varepsilon_1 > 0. \quad (6)$$

На Рис. 3 изображены графики целевых функций вида (6) для разных значений ε_1 .

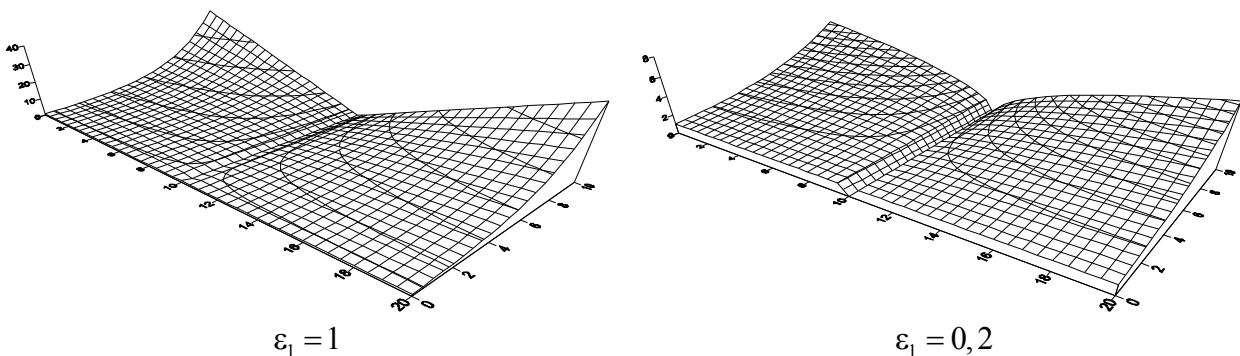


Рис. 3. Целевые функции в задаче оптимизации (1) для разных стоимостей задержек

Для оценки влияния характеристик информационно-коммуникационной сети на общие характеристики организации воздушного движения рассмотрим ключевые показатели эффективности сети.

IV. Выбор и обоснование показателей эффективности информационно-вычислительной сети аэроузла

Общие показатели эффективности должны выбираться таким образом, чтобы можно было получать сравнительные оценки качества работы сетей разных аэроузлов, а главное – чтобы можно было обеспечивать гарантированное качество сервиса, что для систем ОрВД как систем критичного применения является первоочередной задачей.

Рассмотрим показатели эффективности сети и качества выдаваемых услуг (Табл. 1).

Общее число показателей эффективности и результативности работы сети как элемента системы ОрВД, строго говоря, значительно больше. Здесь отобраны некоторые ключевые

показатели (*Key Performance Indicators – KPIs*) [3, 8], которые непосредственно связаны с качеством работы информационно-вычислительной сети как неотъемлемого элемента системы ОрВД.

Табл. 1.

№	Показатель	Частные параметры
1.	Общий показатель качества сети	
1.1	Показатели качества источников динамической информации	- количество каналов обмена данными; - темп поступления информации; - точность измерений; - размеры зоны обзора; - разрешающая способность; - вероятностные характеристики (ошибки первого и второго рода); - другие.
1.2	Показатель качества сервиса	- точность и достоверность передаваемой информации; - разборчивость речи, задержки, джиттер; - число потерянных и искаженных пакетов данных; - удобство пользования системой.
1.3	Показатели производительности сети	- число одновременно обслуживаемых воздушных судов в зоне действия; - число одновременно обслуживаемых воздушных судов в единицу времени; - максимальная и средняя пропускная способность системы ОрВД.
1.4	Экономическая эффективность	- ставки тарифов и аэронавигационных платежей; - эксплуатационные расходы и рентабельность; - срок окупаемости и др.

Процессы изменения ключевых показателей эффективности (КПЭ), с одной стороны, являются существенно нестационарными, а, с другой – тенденции их изменений весьма схожи. Поэтому представляет интерес исследование характеристик их стохастической взаимосвязи. Этот интерес имеет не только теоретический, но и практический характер. Для автоматизации измерений и расчетов необходимо выбрать метод аппроксимации кривых повторяемости изменений КПЭ. Наиболее гибким и точным методом является аппроксимация полиномами по минимуму среднего квадрата ошибки [9]. В качестве основных характеристик стохастической взаимосвязи используется коэффициент множественной корреляции и множественная регрессия [10].

В данной работе рассматривается система КПЭ для сети аэроузла как большой системы с задержками сигнальной и управляющей информации [11]. Сеть является составной, т.е. представляет собой совокупность автономных сегментов (АС) разного масштаба и назначения [12].

При оптимизации характеристик сети в качестве оптимизируемых параметров задачи могут вводиться и некоторые дополнительные показатели [4, 5]. Они могут присутствовать в системах показателей одних АС и отсутствовать в других.

С учетом изложенных соображений корреляционная матрица КПЭ рассматриваемой составной сети аэроузла представляет собой трехмерную матрицу "строка – столбец – слой" следующего вида:

$$\mathbf{R} = \left[\begin{array}{cccc} \|\mathbf{R}_{ij1}\| & & & \\ & \|\mathbf{R}_{ij2}\| & & \\ & & \dots & \\ & & & \|\mathbf{R}_{ijk}\| \\ & & & & \dots \\ & & & & & \|\mathbf{R}_{ijN}\| \end{array} \right], \text{ где } \mathbf{R}_{ijk} = \begin{pmatrix} r_{11k} & r_{12k} & \dots & r_{1Kk} \\ r_{21k} & r_{22k} & \dots & r_{2Kk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1k} & r_{k2k} & \dots & r_{KkK} \end{pmatrix} \quad (7)$$

k -й слой матрицы \mathbf{R} .

Без потери общности можно считать, что матрица \mathbf{R} имеет размерность $N \times N \times N$. Кроме того, предположим, что параметры процессов остаются стационарными на интервалах наблюдения и управления. Тогда матрицы \mathbf{R}_{ijk} являются симметричными.

На Рис. 4 изображены верхние треугольные части слоев трехмерной матрицы коэффициентов корреляции \mathbf{R} .

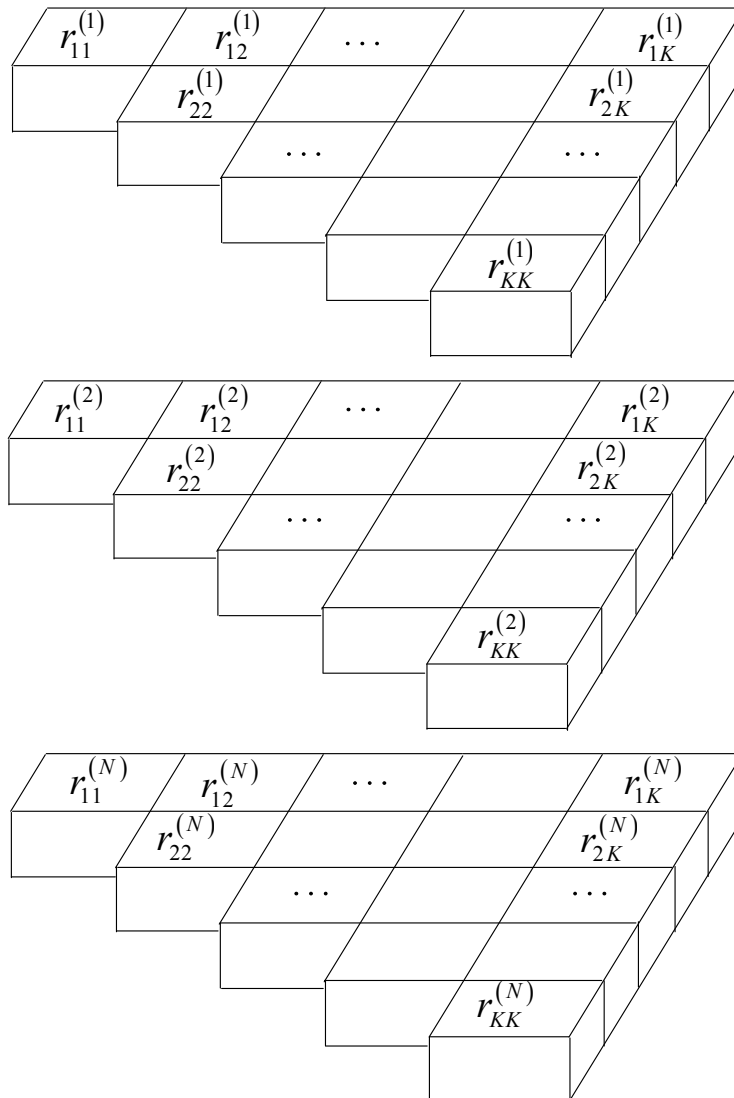


Рис. 4. Матрица коэффициентов корреляции КПЭ составной сети аэроузла

Наиболее важными КПЭ являются задержка передачи, пропускная способность, потери пакетов и уровень безопасности. Эти параметры оказывают наибольшее влияние на результирующее качество сервиса и, в конечном счете, на эффективность системы ОрВД в целом. Кроме того, для задач организации, обслуживания и управления воздушным движением наиболее важными КПЭ являются задержки рейсов на земле и в воздухе.

С учетом приведенных соображений в качестве оптимизируемых параметров задачи выбраны следующие:

- задержка передачи τ ;
- пропускная способность C_p ;
- потери пакетов при передаче данных L_p ;
- уровень безопасности и защиты данных при передаче по сети D_{sp} ;
- средняя задержка в воздухе \bar{d}_{AH} ;

средняя задержка на земле \bar{d}_{GH} .

В Табл. 2 приведены частные коэффициенты корреляции оптимизируемых параметров, по которым в дальнейшем можно рассчитывать частные коэффициенты регрессии. Числовые данные взяты из работ [3, 5].

Коэффициенты взаимной корреляции Табл. 2

Параметр							
τ	Коэффициенты корреляции	1,0					
C_p		0,98	1,0				
L_p		0,69	0,68	1,0			
D_{sp}		0,89	0,86	0,69	1,0		
\bar{d}_{AH}		0,75	0,76	0,46	0,77	1,0	
\bar{d}_{GH}		0,85	0,88	0,62	0,86	0,50	1,0
		τ	C_p	L_p	D_{sp}	\bar{d}_{AH}	\bar{d}_{GH}

Специфика информационно-коммуникационной сети аэроузла такова, что во многих случаях применения регрессионного анализа мы не имеем достаточной информации о порядке независимых переменных X_1, X_2, \dots, X_p по их важности для предсказания независимой переменной Y . Это может привести к неверным заключениям относительно важности тех или иных переменных X_i для предсказания Y .

Одним из решений является прямая пошаговая регрессия [13], когда независимые переменные одна за другой включаются в подмножество согласно предварительно заданному критерию. В то же время некоторая переменная может быть заменена другой переменной, не входящей в набор, либо удалена из него. Совокупность критериев, определяющих, какие переменные включать, заменять и удалять, называется пошаговой процедурой.

Предлагается использовать стандартную пошаговую процедуру с включением и исключением значимых переменных. Включение и удаление переменных осуществляются с помощью t -критерия для проверки равенства нулю частного коэффициента корреляции или квадрата этой статистики (F -критерия), который имеет F -распределение с числом

степеней свободы $(n-k-2)$, где n – объем выборки данных, получаемых путем измерения k -го КПЭ.

Правило остановки основано на задании допустимого уровня значимости t -критерия.

Шаги стандартной пошаговой процедуры следующие.

1. Вычисляются простые коэффициенты корреляции $r_{yx,i}$ для набора X_1, X_2, \dots, X_p .
2. Выделяется переменная X_{j_1} , которой соответствует наибольшая величина квадрата коэффициента корреляции с Y . Решается соответствующее уравнение наименьших квадратов и вычисляется множественный коэффициент корреляции.
3. Выделяется переменная X_{j_2} , которой соответствует второе по величине значение квадрата коэффициента корреляции с Y . Решается соответствующее уравнение наименьших квадратов и вычисляется множественный коэффициент корреляции.

Следующие шаги повторяются рекуррентно с нарастающим индексом jk .

4. По получаемым значениям F -критерия пересчитывается новые наборы значимых переменных, которые используются для вычисления коэффициентов регрессии на каждом шаге процедуры. Фиксируются номер шага, число включенных и удаленных переменных и множественный коэффициент корреляции между Y и включенными переменными.

Как показано в работах [3, 5], полностью скомпилированная программа расчетов занимает в памяти вычислительного устройства от 80 до 500 килобайт в зависимости от масштаба сети и объема обрабатываемой выборки.

Поскольку в настоящее время практически любой сетевой узел, по существу, представляет собой специализированный вычислитель или даже многопроцессорную систему, задача аппаратурной реализации предложенного метода может решаться сравнительно просто.

V. Выводы

В работе проведен анализ системы ключевых параметров эффективности и особенностей их применения для управления качеством сервиса информационно-вычислительной и управляющей сети крупного аэроузла. Показано, что можно выделить зависимости между ключевыми параметрами сети и системы ОрВД в целом, что дает возможность построения системы управления качеством сервиса и, в конечном счете, оптимизации задач организации ВД.

При использовании ключевых параметров эффективности информационно-вычислительной сети как сложной системы с задержками сигнальной и управляющей информации можно обеспечить предсказание ее состояния и решать задачи управления качеством сервиса в реальном времени.

В дальнейшем планируется продолжить исследования в данном научном направлении, в частности, провести сравнительный анализ точности прогноза КПЭ различными методами пошаговой регрессии, скорости сходимости алгоритмов коррекции и приоритизации КПЭ в зависимости от условий работы аэроузла, например, в штатном режиме и при возникновении нештатных ситуаций.

Литература

1. Future Aeronautical Communications / Edited by Simon Plass. – Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center (DLR), Germany. – Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. – InTech, 2011. – 378 PP.
2. Vodopianov S. Optimisation of Network Structures of Air Traffic Control Systems // Proceedings of the 6th International Conference “Advanced Computer Systems and Networks: Design an Application” – ACSN-2013. – Sept. 16 – 18, 2013. – Lviv, Ukraine. – PP. 84 – 85.
3. Водопьянов С. В. Ключевые показатели управления качеством сервиса в информационно-вычислительной сети аэроузла / С.В. Водопьянов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2012. – №3(23). – С. 71 - 75.
4. Торошанко Я. І. Задачі моніторингу та аналізу параметрів телекомунікаційних мереж / Я. І. Торошанко, А. О. Булаковська, М. С. Височиненко, В. С. Шматко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №3. – С. 62-69.
5. Амирханов Э.А., Водопьянов С.В., Заруцкий В.А., Зубарева Е.А. Применение системы ключевых показателей эффективности для оценивания параметров компьютерных сетей // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т.10, №4. – С. 82 – 87.
6. Торошанко Я. И. Оптимизация больших информационных систем с диагонально-доминантными матрицами ключевых показателей эффективности / Я. И. Торошанко, В. С. Шматко, М. С. Высочиненко, А. А. Булаковская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №6(9). – С.24-29.
7. Bertsimas D. An Integer Optimization Approach to Large-Scale Air Traffic Flow Management // Dimitris Bertsimas, Guglielmo Lulli, Amedeo Odoni. Operational Research. – January-February 2011. – Vol. 58, No. 1. – PP. 211-227.
8. Торошанко Я. І. Ключові параметри ефективності безпроводових телекомунікаційних мереж та методи їх ідентифікації / Я. І. Торошанко, В. П. Грушевська, М. С. Височиненко, В. С. Шматко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №4(32). – С. 28-33.
9. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1974. – 463 с.
10. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения / Г. Я. Мирский. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 320 с.
11. Maral G. Satellite communications systems: Systems, Techniques and Technology / G. Maral, M. Bousquet. – 5th ed. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2009. – 742 PP.
12. Cheng Y. A Realization of Integrated Satellite-Terrestrial Communication Networks for Aeronautical Services via Joint Radio Resource Management // Yongqiang Cheng, Kai J. Xu, Anju Pillai, Prashant Pillai, Yim Fun Hu, Muhammad Ali, and Adeel Ahmed // 5th International Conference on Personal Satellite Services (PSATS 2013). – PP. 26 – 37. – Toulouse, France, June 27–28, 2013. – 211 PP.
13. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии / Е. З. Демиденко. – Москва : Финансы и статистика, 1981. – 302 с.

Дата надходження в редакцію: 30.06.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М. А. Віноградов