

Подготовка данных и расчёт значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения

Сохраный Е.П.

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения,

ул. Пионерская, 4, Королёв, 141070, Россия

e-mail: sep@mcc.rsa.ru

Статья поступила 01.07.2019

Аннотация

Рассмотрены завершающие этапы решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи (СС) с космическими аппаратами (КА) научного и социально-экономического назначения (НСЭН), на которых реализуются способы решения основных проблемных вопросов по разрешению конфликтных ситуаций по задействованию наземных средств управления КА, обоснованные в работе [1]. Представлено формальное описание этих этапов, обеспечивающее совместно с ранее представленными описаниями [1, 3] возможность автоматизированного решения указанной задачи в целом, позволяющего повысить оперативность и обоснованность принятия решений по разрешению конфликтных ситуаций на основе приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА.

Ключевые слова: конфликтная ситуация по задействованию наземных средств управления, приоритет запроса на проведение сеанса связи, иерархическая структура экспертных данных, оперативность и обоснованность принятия решений

Введение

При обеспечении управления космическими аппаратами в части планирования задействования наземных средств управления возникают конфликтные ситуации, обусловленные необходимостью задействования одних и тех же наземных средств управления (НСУ) в одно и то же время для проведения сеансов связи с разными космическими аппаратами. Для разрешения конфликтных ситуаций необходимо решить основной вопрос, заключающийся в определении конфликтующих сеансов связи с КА, подлежащих реализации в запланированное время, и подлежащих переносу на другое время и/или на другое средство управления, т.е. установить систему предпочтений между запросами на проведение сеансов связи с КА, основу которой составляют приоритеты запросов [1]. Отсутствие либо принятие необоснованного решения по разрешению конфликтных ситуаций могут привести к отрицательным последствиям вплоть до потери космического аппарата, что обуславливает повышенные требования к обоснованности и оперативности принимаемых решений.

Обоснованность принимаемых решений по разрешению конфликтных ситуаций обеспечивается качеством экспертной группы, выполняющей подготовку решений, и качеством самих решений. Повышение оперативности принятия решений обеспечивается автоматизацией процесса подготовки решений [1].

Состояние решения задачи назначения приоритетов

Качество экспертных оценок (данных), используемых для расчёта значений приоритетов запросов, определяется качеством экспертной группы. Качество экспертной группы оценивается количеством экспертов в группе, определяющим значение доверительной вероятности экспертных оценок, и согласованностью экспертных оценок, предполагающей согласованность суждений каждого эксперта и согласованность мнений группы экспертов [1]. Важное значение имеет количество экспертов в группе, поскольку при снижении количества экспертов появляется излишнее влияние оценки каждого эксперта на общий результат, что увеличивает недостоверность групповой оценки, а большое количество экспертов приводит к трудностям в выработке единого (консолидированного) мнения экспертной группы. На практике количество экспертов выбирается не менее семи и не более двадцати [1, 4].

Важным элементом обоснованности принимаемых решений является согласованность экспертных оценок, на основании которых принимаются решения. Согласованность является центральной проблемой в таких случаях, а также является важным критерием как необходимое условие, обосновывающее использование числовых оценок реальности. Соответствие между качественными суждениями и числами шкалы оценок является одним из условий воспроизводства реальности измерениями [5].

Оценка согласованности экспертных данных осуществляется по значениям элементов матриц сравнений, отражающих количественные соотношения между

сравниваемыми элементами, представляющих собой отображение качественных экспертных оценок на количественную шкалу [3].

При разрешении конфликтных ситуаций осуществляется перенос времени реализации одного или нескольких наименее важных конфликтующих запросов. Поскольку данный перенос приводит к переносу выполнения (невыполнению в заданное в запросе время) заложенных в запросе операций, он может привести к определённому ущербу управлению космическими аппаратами из-за нарушения технологического цикла управления КА: дезорганизация управления космическим аппаратом или орбитальной группировкой КА, потеря управления КА и орбитальной группировкой КА, потеря КА, поэтому важность конфликтующих запросов целесообразно оценивать величиной возможного ущерба от переноса времени их реализации, а качественное решение должно обеспечивать минимальную величину данного ущерба. В качестве обобщённого показателя возможного ущерба предложено [1] использовать приоритет запроса на проведение сеанса связи с КА, зависящий от важности факторов, влияющих на последствия переноса реализации конфликтующих запросов.

Существующие классические методы и способы планирования, в том числе основанные на теории расписаний, теории массового обслуживания, линейного программирования [6–8], не могут быть использованы для разрешения конфликтных ситуаций из-за ограничений по их использованию [9], обусловленных необходимостью соблюдения технологических циклов управления (ТЦУ) космическими аппаратами и

проведением сеансов связи только во время зон радиовидимости космических аппаратов средствами управления, что определяет требования к планированию задействования НСУ КА. Для приоритетного обслуживания запросов авторами [10–11] предлагается учёт различных групп факторов, влияющих на разрешение КС, и различные критерии оценки важности конфликтующих запросов. Однако комплексный учёт всех возможных для анализа факторов и числовые оценки важности запросов на проведение сеансов связи с КА, необходимые для обоснованного выбора запросов, подлежащих реализации в запланированное время и переносу на другое время, отсутствует. Предлагаемые способы приоритетного обслуживания заявок абонентов в других областях (например, [12–15]) не могут быть использованы из-за различий в исходных данных, условиях и ограничениях по применению, определяющих постановки задач и методы их решения.

Ввиду отсутствия математических зависимостей между характеристиками факторов и величиной возможного ущерба предложено использовать метод экспертных оценок для качественных оценок влияния факторов на величину возможного ущерба. Большое количество, разнообразие и наличие логических взаимосвязей между факторами обуславливают необходимость их формального представления в виде иерархической структуры (ИС), являющейся основой для формального представления оценок важности факторов [1]. При решении задач с исходными данными в виде ИС широко применяется метод анализа иерархий (МАИ) [5], который предполагает декомпозицию сложной задачи на более простые составные части. По иерархической

структуре экспертных данных, используя МАИ, формируются матрицы отношений, на их основе – матрицы сравнений, отражающие качественные и количественные соотношения между факторами [3].

Подготовка данных и расчёт приоритетов

Исходной информацией для подготовки данных для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА являются результаты экспертного опроса в виде иерархической структуры экспертных данных и матриц сравнений, сформированных на основе матриц отношений.

Формально иерархическая структура S экспертных данных представляется множеством вершин V и связей SV^u между ними [1]

$$S = \{V, SV^u\}. \quad (1)$$

Множества V и SV^u представляют собой соответственно объединения множеств порядковых номеров вершин всех ярусов P^r ИС и их межярусных связей $SV^{r,u}$

$$V = \bigcup_{r=1}^{R_{\max}} P^r, \quad (2)$$

$$SV^u = \bigcup_{r=1}^{R_{\max}} SV^{r,u}. \quad (3)$$

Формально матрица отношений представляет собой множество C^o [3] в виде

$$C^o = \{c_{lm}^{q,h}\}, l = \overline{1, L}, m = \overline{1, M}, h = \overline{1, H}, q = \overline{1, Q}, \quad (4)$$

где $c_{l,m}^{q,h}$ – значение элемента матрицы отношений, определяющее качественную оценку h -го эксперта по m -му столбцу при сравнении элементов \mathcal{E}_i и \mathcal{E}_j l -ой строки по влиянию на элемент номер q вышерасположенного яруса;

l – номер строки, L – количество строк матрицы отношений;

m – номер столбца, M – количество столбцов матрицы отношений;

h – номер эксперта, H – количество экспертов;

q – номер элемента вышерасположенного яруса ИС, с которым связан элемент данного яруса, Q – количество элементов на вышерасположенном ярусе ИС.

Формально матрица сравнений A представляется [3] в виде

$$A = \{a_{i,j}\}, i, j = \overline{1, I}, \quad (5)$$

где $a_{i,j}$ – значение элемента матрицы сравнений, определяющее количественное превосходство элемента \mathcal{E}_i над элементом \mathcal{E}_j ;

i – номер строки матрицы сравнений;

j – номер столбца матрицы сравнений;

I – размерность матрицы сравнений.

При формировании матриц отношений в случае расположения на одном уровне ИС более семи элементов они функционально объединяются в группы не более семи элементов для обеспечения достаточно разумной (психологически) уверенности в согласованности результатов экспертных оценок [5].

Применительно к группам элементов иерархической структуры S определены:

- множество номеров групп элементов G^r r -го яруса;
- множество номеров элементов $I^{r,g}$ в группе g яруса r ;
- соответствие множества групповых номеров элементов $I^{r,g}$ множеству их порядковых номеров P^r на ярусе r ;

- множество групповых связей;
- соответствие множества групповых связей множеству межярусных связей.

Сформированные по результатам проведения экспертных оценок весовые коэффициенты важности элементов ИС относятся к конкретным экспертам и группам, расположенным на определённых ярусах ИС. Для расчёта значений приоритетов запросов данные весовые коэффициенты необходимо обобщить по всем экспертам и индексировать в рамках всей иерархической структуры при наличии групп элементов на каком-либо ярусе иерархической структуры.

С учётом изложенного подготовка данных для расчёта значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА НСЭН включает:

- расчёт частных значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры;
- оценку согласованности суждений каждого эксперта;
- оценку согласованности мнений группы экспертов;
- расчёт обобщённых значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры.

1 Расчёт частных значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры

После составления каждой матрицы парных сравнений A на каждом уровне иерархии необходимо по матрице A найти соответствующий вектор приоритетов, характеризующий веса сравниваемых элементов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_l$, являющиеся в нашей

терминологии частными (принадлежащими конкретному эксперту) значениями весовых коэффициентов элементов иерархической структуры. В математических терминах вектором приоритетов является нормированный (имеющий сумму компонент, равную единице) главный собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению матрицы сравнений [5]. Наиболее точный способ расчёта главного собственного вектора $W = \{w_i\}$, $i = \overline{1, I}$, и максимального собственного значения λ_{\max} – использование пакетов прикладных математических программ (Mathematika, MATLAB, Maple, MathCAD и др.), разработанных на основе теории матриц (например, [16]), в отдельных случаях могут использоваться приближённые методы [5], либо расчёт по формулам:

$$W = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{A^k * e}{e^T * A^k * e}, \quad e = \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = e^T * A * W, \quad (7)$$

где e – единичный вектор; T – знак транспонирования; $k = 1, 2, 3, \dots$ – показатель степени (число итераций).

Достаточной для практики считается точность расчёта W , равная 0,01 независимо от порядка матрицы.

2 Оценка согласованности суждений эксперта

Согласованность суждений эксперта – это следование логике при высказывании суждений. Если суждение эксперта совершенно при всех сравнениях, то для элементов матрицы сравнений A справедливо равенство

$$a_{i,k} = a_{i,j} * a_{j,k}, i, j, k = \overline{1, I}, \quad (8)$$

где I – размерность матрицы, и матрицу A называют согласованной. Мерой согласованности суждений является отклонение максимального собственного значения матрицы сравнений от размерности матрицы [5]. Во избежание сильного рассогласования суждений эксперта выполняется проверка каждой матрицы сравнений на согласованность в следующем порядке:

2.1 расчёт максимального собственного значения λ_{\max}

2.2 расчёт индекса согласованности $I_{нС}$ положительной обратно-симметричной матрицы по формуле

$$I_{нС} = \frac{\lambda_{\max} - I}{I - 1}. \quad (9)$$

2.3 расчёт значения отношения согласованности ОС по формуле

$$ОС = \frac{I_{нС}}{M(i_{нС})}, \quad (10)$$

где $M(i_{нС})$ – среднее значение индекса согласованности случайным образом составленной матрицы парных сравнений, которое основано на экспериментальных данных. Значение $M(i_{нС})$ есть табличная величина, входным параметром для которой выступает значение I – размерность матрицы (таблица 1). Значение $ОС \leq 0,1$ считается приемлемым [17].

Таблица 1 – Среднее значение индекса согласованности в зависимости от размерности матрицы

I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$M(i_{nc})$	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Для повышения отношения согласованности матриц сравнений могут использоваться различные схемы формирования элементов матрицы сравнений и разные шкалы (зависимости степенные, логарифмические и др.) отображения множества значений экспертных оценок в множество значений элементов матрицы сравнений [18].

Если для матрицы сравнений значение ОС не удовлетворяет требуемому, что свидетельствует о существенном нарушении логики суждений, допущенном экспертом при проведении сравнений, эксперту предлагается пересмотреть свое мнение. Эксперт, для которого не удаётся достигнуть требуемого значения ОС, исключается из экспертной группы. Проверяется достаточность (не менее семи) оставшегося количества экспертов в группе [1]. При достаточности оставшегося количества экспертов проверяется согласованность их суждений (п. 1), иначе состав экспертной группы увеличивается, «новые» эксперты формируют матрицы отношений, матрицы сравнений [3] и проводится оценка согласованности суждений этих экспертов (п. 1).

Оценка согласованности суждений каждого эксперта осуществляется для всех полученных матриц сравнений.

3 Оценка согласованности мнений группы экспертов

Оценка согласованности мнений экспертов проводится с целью обеспечения высокой достоверности используемых данных и, как следствие, высокой обоснованности принимаемых решений.

Для оценки согласованности мнений экспертов предлагается использование коэффициента ранговой корреляции Кендалла $W(H)$ [19 – 21], который интерпретируется как степень соответствия результатов оценивания их максимально согласованному варианту оценки и определяется как отношение фактической несмещенной дисперсии D случайной величины (присвоенных элементам рангов) к теоретически максимально возможной дисперсии D_{\max} на заданном множестве:

$$W(H) = \frac{D}{D_{\max}}. \quad (11)$$

Дисперсия D случайной величины – это мера разброса данной случайной величины, то есть её отклонения от математического ожидания (среднего значения случайной величины).

Значения коэффициента ранговой корреляции Кендалла лежат в диапазоне $0 \leq W(H) \leq 1$: при $W(H)=0$ мнения экспертов полностью рассогласованы, при $W(H)=1$ достигнута полная согласованность экспертных оценок.

Для расчёта коэффициента ранговой корреляции Кендалла предварительно осуществляется ранжирование полученных значений нормализованного главного собственного вектора (вектора приоритетов), которое состоит в расстановке этих значений в порядке их предпочтения по важности (весомости). Место, занятое при такой расстановке, называется рангом, чем выше ранг, тем важнее элемент иерархической структуры.

Оценка согласованности мнений группы экспертов по каждой группе сравниваемых элементов ИС выполняется в следующей последовательности.

3.1 Ранжирование значений весовых коэффициентов каждой группы сравниваемых элементов иерархической структуры

3.1.1 Устанавливается соответствие между нормализованными главными собственными векторами w_i и частными (экспертными) значениями весовых коэффициентов $k_{h,i}$ каждой группы сравниваемых элементов ИС путём привязки значений w_i к номерам экспертов:

$$w_i \rightarrow k_{h,i}, \quad h = \overline{1, H}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (12)$$

где h – номер эксперта;

H – количество экспертов;

I – размерность матрицы сравнений.

Для упрощения расчётов нумерация групп сравниваемых элементов и ярусов ИС, на которых они расположены, пока опускается.

При ранжировании необходимо учитывать, что нельзя двум весовым коэффициентам $k_{h,i}$ и $k_{h,k}$ присваивать одинаковые значения рангов $z_{h,i}$ и $z_{h,k}$:

$$z_{h,i}, z_{h,k} \in \{ \overline{1, I} \}, \quad h = \overline{1, H}, \quad i = \overline{1, I}, \quad z_{h,i} \neq z_{h,k} \text{ для } i \neq k. \quad (13)$$

3.1.2 Выбирается ряд весовых коэффициентов $\{k_{1,i}\}$, $i = \overline{1, I}$ первого ($h=1$) эксперта.

3.1.3 Устанавливаются равными нулю исходное запомненное значение ранга z_h^3 и множество рангов значений коэффициентов Z :

$$z_h^3 = 0, \quad (14)$$

$$Z = \{z_{h,i}\} = \{0\}, \quad i = \overline{1, I}. \quad (15)$$

3.1.4 Среди ранжируемых значений весовых коэффициентов осуществляется поиск минимального из них и присвоение ему значения ранга, равного запомненному значению, увеличенному на единицу (тем самым проранжированный весовой коэффициент исключается из числа ранжируемых):

$$z_{h,i} = z_h^3 + 1 : k_{h,i} = \min\{k_{h,i}\}, \quad i = \overline{1, I} : z_{h,i} = 0. \quad (16)$$

3.1.5 Запоминается значение ранга проранжированного весового коэффициента, в множество проранжированных коэффициентов добавляется проранжированный весовой коэффициент:

$$z_h^3 = z_{h,i}, \quad (17)$$

$$Z := Z \cup z_{h,i}. \quad (18)$$

3.1.6 Проверяется условие, все ли коэффициенты h -го эксперта проранжированы:

$$z_{h,i} = 0? \quad i = \overline{1, I}. \quad (19)$$

Если условие (19) выполняется, то переход к проверке ранжирования данных всех экспертов (п. 3.1.7), иначе – к поиску минимального значения весового коэффициента среди ранжируемых (п. 3.1.4).

3.1.7 Проверяется условие, проранжированы ли коэффициенты всех экспертов:

$$h = H? \quad (20)$$

Если условие (20) выполняется – переход к завершению алгоритма ранжирования (п. 3.1.8), иначе выбираются весовые коэффициенты $k_{h,i}$ ($i = \overline{1, I}$) следующего эксперта ($h := h+1$) и переход к ранжированию коэффициентов следующего эксперта (п. 3.1.3).

3.1.8 Конец алгоритма ранжирования. В результате ранжирования получается множество Z рангов весовых коэффициентов, расположенных в порядке возрастания их значений, которые для удобства заносят в таблицу 2.

$$Z = \{z_{h,i}\}, h = \overline{1, H}, i = \overline{1, I}. \quad (21)$$

Таблица 2 – Результаты ранжирования и расчёта рангов весовых коэффициентов

Номер эксперта (h), ранги ($z_i, z_{i.sp.}$)	Номер (i) весового коэффициента					
	1	2	...	i	...	I
1	$z_{1,1}$	$z_{1,2}$	...	$z_{1,i}$	...	$z_{1,I}$
2	$z_{2,1}$	$z_{2,2}$	...	$z_{2,i}$	...	$z_{2,I}$
...
h	$z_{h,1}$	$z_{h,2}$	...	$z_{h,i}$	...	$z_{h,I}$
...
H	$z_{H,1}$	$z_{H,2}$	...	$z_{H,i}$	...	$z_{H,I}$
z_i	z_1	z_2	...	z_i	...	z_I
$z_{i.sp.}$	$z_{1.sp.}$	$z_{2.sp.}$	...	$z_{i.sp.}$	...	$z_{I.sp.}$

Для ранжирования коэффициентов в порядке убывания рангов в п. 3.1.4 осуществляется поиск максимального значения весовых коэффициентов.

3.2 Вычисление значения коэффициента ранговой корреляции Кендалла и его оценка

3.2.1 Вычисление суммарных значений рангов каждого весового коэффициента:

$$z_i = \sum_{h=1}^H z_{h,i}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (22)$$

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_I\}, \quad (23)$$

где Z – множество сумм рангов весовых коэффициентов по всем экспертам.

Результаты расчёта значений z_i заносятся в таблицу 2.

3.2.2 Вычисление значения среднего арифметического рангов \bar{z} :

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^I z_i}{I} = \frac{H(I+1)}{2}. \quad (24)$$

3.2.3 Вычисление коэффициента ранговой корреляции Кендалла $W(H)$ [19, 20]:

$$W(H) = \frac{D}{D_{\max}} = \frac{12}{H^2(I^3 - I)} \sum_{i=1}^I \left(\sum_{h=1}^H z_{ih} - \bar{z} \right)^2. \quad (25)$$

3.2.4 Проверка соблюдения требования к коэффициенту ранговой корреляции:

$$W(H) \geq W_{\text{тр}}? \quad (26)$$

где $W_{\text{тр}}$ – требуемое значение коэффициента ранговой корреляции, определяемое руководителем экспертной группы. При $W(H) \geq 0,9$ согласованность считается очень высокой [22, 23].

Если условие (26) выполняется, то переход к формированию итогового состава экспертной группы (п. 3.2.5), иначе – к оценке качества экспертов (п. 3.3).

3.2.5 Формирование итогового состава экспертной группы:

$$H = \{h^*\}, h^* = \overline{1, H^n}, \quad (27)$$

где H^n – итоговое количество экспертов.

Далее осуществляется переход к расчёту обобщённых значений весовых коэффициентов элементов ИС (п. 4).

3.3 Оценка качества экспертов

При необходимости исключения некоторых кандидатов из состава экспертной группы проводится количественная (расчётная) оценка их качества. Простейший подход к процедуре исключения основан на оценке близости мнения эксперта к среднему мнению группы [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Кандидат с наибольшим расхождением «отбраковывается». Ниже представлена методика расчётной оценки качества экспертов.

3.3.1 Расчёт среднего значения ранга каждого весового коэффициента $z_{i, \text{cp}}$:

$$z_{i, \text{cp}} = \frac{z_i}{H}. \quad (28)$$

Результаты заносятся в таблицу 2.

3.3.2 Расчёт значений элементов матрицы-строки отклонений мнения каждого эксперта от среднего мнения группы относительно значимости каждого весового коэффициента:

$$\Delta z_{hi} = |z_{hi} - |z_{i.sp}| |, \quad i=\overline{1, I}, \quad h=\overline{1, H}, \quad (29)$$

$$\Delta Z_h = | \Delta z_{h,1}, \Delta z_{h,2}, \dots, \Delta z_{h,i}, \dots, \Delta z_{h,I} |. \quad (30)$$

3.3.3 Формирование матрицы отклонений ΔZ мнений всех экспертов ($h=\overline{1, H}$) от средних мнений (по каждому весовому коэффициенту):

$$\Delta Z = \begin{pmatrix} \Delta z_{1,1} & \dots & \Delta z_{1,i} & \dots & \Delta z_{1,I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta z_{h,1} & \dots & \Delta z_{h,i} & \dots & \Delta z_{h,I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta z_{H,1} & \dots & \Delta z_{H,i} & \dots & \Delta z_{H,I} \end{pmatrix}. \quad (31)$$

3.3.4 Расчёт суммы отклонений мнений каждого эксперта от среднего мнения группы по всем весовым коэффициентам:

$$\Delta k_h = \sum_{i=1}^I \Delta z_{hi}, \quad h = \overline{1, H}. \quad (32)$$

3.3.5 Расчёт суммы отклонений мнений всех экспертов по всем весовым коэффициентам:

$$\Delta k = \sum_{h=1}^H \Delta k_h. \quad (33)$$

3.3.6 Расчёт средних отклонений мнений экспертов по всем весовым коэффициентам от суммы отклонений мнений всех экспертов:

$$\overline{\Delta k}_h = | \Delta k_h - \Delta k |, \quad h=\overline{1, H}, \quad (34)$$

$$\overline{\Delta K} = | \overline{\Delta k}_1, \overline{\Delta k}_2, \dots, \overline{\Delta k}_h, \dots, \overline{\Delta k}_H |. \quad (35)$$

3.3.7 Ранжирование отклонений $\overline{\Delta k_h}$ ($h=1, H$) (например, по алгоритму, приведенному в п. 3.1) и расположение рангов отклонений в порядке возрастания в виде кортежа:

$$\overline{\Delta K^*} = | \overline{\Delta k_1^*}, \overline{\Delta k_2^*}, \dots, \overline{\Delta k_h^*}, \dots, \overline{\Delta k_H^*} |. \quad (36)$$

Получение перечня новых номеров экспертов:

$$h = \{1^*, 2^*, \dots, H^*\}. \quad (37)$$

3.3.8 Коррекция (при возможности) мнений эксперта, ранг отклонения которого имеет наибольшее значение, и переход к ранжированию скорректированных весовых коэффициентов сравниваемых элементов данного эксперта (п. 3.1).

3.3.9 При невозможности коррекции мнений эксперт, ранг отклонения которого имеет наибольшее значение, исключается из состава группы [25, 26]:

$$h = \{1^*, 2^*, \dots, H^*-1\}. \quad (38)$$

3.3.10 Проверяется условие достаточности количества экспертов в группе (не менее семи [1]). В случае достаточности количества экспертов в группе осуществляется переход к вычислению значения коэффициента ранговой корреляции Кендалла для нового состава экспертной группы и его оценка (п. 3.2), в противном случае состав экспертной группы увеличивается, эксперты формируют матрицы отношений и матрицы сравнений [3] и осуществляется оценка согласованности суждений «новых» экспертов (п. 1).

4 Расчёт обобщённых значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры (векторов приоритетов)

После обработки экспертных данных и оценки их согласованности полученные весовые коэффициенты $a_{i,j}$ матриц сравнений относятся к конкретным экспертам h и группам g элементов яруса r иерархической структуры, которые в общем случае имеют вид $a_{i,j}^{h,r,g}$. Для расчёта значений приоритетов запросов необходимы обобщённые значения весовых коэффициентов, относящиеся только к иерархической структуре.

Расчёт обобщённых значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры производится в следующей последовательности.

4.1 Расчёт значений элементов обобщенных матриц сравнений $A^{r,g}$ групп элементов, в качестве которых принимаются среднегеометрические значения [5]:

$$a_{i,j}^{r,g} = \sqrt[H]{\prod_{h=1}^H a_{i,j}^{h,r,g}}, \quad (39)$$

$$A^{r,g} = \{ a_{i,j}^{r,g} \}, \quad (40)$$

где r – номер яруса, $r = \overline{1, R_{\max}}$, R_{\max} – максимальный номер яруса;

g – номер группы элементов на ярусе r ; $g = \overline{1, G_{\max}^r}$, G_{\max}^r – количество групп элементов на ярусе r ;

i, j – соответственно номера строк и столбцов матрицы сравнений, $i, j = \overline{1, I}$,

I – количество строк (столбцов) матрицы сравнений;

$a_{i,j}^{h,r,g}$ – численная оценка h – м экспертом элемента, принадлежащего i –ой строке j –му столбцу матрицы сравнений g – ой группы r –го яруса.

4.2 Для полученных обобщённых матриц сравнений $A^{r,g}$ по приведенному в п. 1 алгоритму вычисляются нормализованные главные собственные вектора $W^{r,g}$ – обобщённые групповые значения весовых коэффициентов элементов ИС:

$$W^{r,g} = \{ w_i^{r,g} \}, i = \overline{1, I}, \quad (41)$$

где $w_i^{r,g}$ – обобщённое групповое значение весового коэффициента i -го элемента g -ой группы r -го яруса.

4.3 В соответствии с нумерацией элементов ИС и их связей, представленных в формальной модели иерархической структуры экспертных данных [1] осуществляется индексация обобщённых групповых значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры путём присвоения порядковых номеров p элементов на данном ярусе r и номеров q элементов вышерасположенного яруса $r-1$, с которыми связаны элементы данного яруса. Данная индексация осуществляется на основании соответствий множества групповых номеров вершин $I^{r,g}$ множеству их порядковых номеров P^r на ярусе r и множества групповых связей SV^g множеству межярусных связей SV^u иерархической структуры:

$$w_i^{r,g} \rightarrow w_{p,q}^r, p: I^{r,g} \rightarrow P^r, q: SV^g \rightarrow SV^u, r = \overline{1, R_{\max}}, \quad (42)$$

где r – номер яруса, на котором расположен рассматриваемый элемент, $r = \overline{1, R_{\max}}$;

R_{\max} – количество ярусов ИС;

g – номер группы на ярусе r , $g = \overline{1, G_{\max}^r}$, G_{\max}^r – количество групп на ярусе r ;

i – номер элемента в группе g яруса r , $i = \overline{1, I_{\max}^{r,g}}$, $I_{\max}^{r,g}$ – количество элементов в группе g яруса r ;

p – порядковый номер элемента на ярусе r , $p = \overline{1, P_{\max}^r}$, P_{\max}^r – количество элементов на ярусе r ;

q – порядковый номер на ярусе $r-1$ элемента, связанного с элементом p на ярусе r , $q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}$, Q_{\max}^{r-1} – количество элементов на ярусе $r-1$.

4.4 Формирование обобщённых ярусных матриц K^r весовых коэффициентов:

$$K^r = \begin{pmatrix} k_{1,1}^r & \dots & k_{1,q}^r & \dots & k_{1,Q}^r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{p,1}^r & \dots & k_{p,q}^r & \dots & k_{p,Q}^r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{P,1}^r & \dots & k_{P,q}^r & \dots & k_{P,Q}^r \end{pmatrix}, \quad (43)$$

где $k_{p,q}^r$ – весовой коэффициент элемента номер p яруса r , связанного с элементом q яруса $r-1$, определяемый по формуле

$$k_{p,q}^r = \begin{cases} w_{p,q}^r, & \text{если } w_{p,q}^r \neq 0; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (44)$$

5 Расчёт значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА НСЭН

Сформированные по формуле (44) значения весовых коэффициентов элементов иерархической структуры экспертных данных представляют собой обобщённые оценки (приоритеты) всех факторов, влияющих на разрешение конфликтных ситуаций по задействованию НСУ (на приоритеты запросов). Данные оценки могут постоянно

храниться в базе данных органа управления, осуществляющего планирование задействования НСУ КА. Для конкретной конфликтной ситуации характерны некоторые подмножества факторов (элементов ИС), присущие конфликтующим запросам. Данные подмножества факторов будем называть активными на данный момент, поскольку для расчёта значений приоритетов pr_c конфликтующих запросов в данной ситуации используются именно эти подмножества. Следует учитывать, что для формально одинаковых запросов на проведение сеансов связи с КА составы учитываемых факторов для расчёта значений приоритетов в разные времена могут отличаться, например, этап эксплуатации КА, срок эксплуатации НСУ, время наработки на отказ, и т.д., поэтому активизация элементов ИС происходит непосредственно перед расчётом приоритетов запросов.

С учётом изложенного расчёт значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА осуществляется в следующей последовательности.

5.1 Определение для рассматриваемых запросов на проведение сеансов связи множества \mathcal{E}^a активных элементов иерархической структуры и значений их весовых коэффициентов K^{ra} :

$$\mathcal{E}_{p,q}^{r,a} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент номер } p \text{ яруса } r, \\ & \text{связанный с элементом номер } q \text{ яруса } r-1, \\ & \text{активен для данного сеанса связи,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (45)$$

$$\mathcal{E}^a = \{ \mathcal{E}_{p,q}^{r,a} \}, r = \overline{1, R_{\max}}, p = \overline{1, P_{\max}^r}, q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}, \quad (46)$$

$$k_{p,q}^{r,a} = k_{p,q}^r, p, q: \mathcal{E}_{p,q}^r \in \mathcal{E}^a, \quad (47)$$

$$K^{r,a} = \{k_{p,q}^{r,a}\}, r = \overline{1, R_{\max}}, p = \overline{1, P_{\max}}, q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}. \quad (48)$$

5.2 Формирование рабочих матриц $K^{r,раб}$ весовых коэффициентов путём обнуления значений весовых коэффициентов $k_{p,q}^r$ элементов иерархической структуры, которые для данного сеанса связи неактивны:

$$K^{r,раб.} = \{k_{pq}^{r,раб.}\}, r = \overline{1, R_{\max}}, p = \overline{1, P_{\max}}, q = \overline{1, Q_{\max}^{r-1}}, \quad (49)$$

$$k_{pq}^{r,раб.} = \begin{cases} k_{p,q}^{r,a}, & \text{если } \varepsilon_{p,q}^r \in \mathcal{E}^a, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (50)$$

5.3 Значение pr_c приоритета c -го запроса на проведение сеанса связи с КА НСЭН представляет собой сумму взвешенных значений весовых коэффициентов рабочих элементов нижнего яруса через значения весовых коэффициентов рабочих элементов вышерасположенных ярусов ИС. Данное взвешивание выполняется путём последовательного перемножения матриц весовых коэффициентов рабочих элементов ИС снизу вверх, т.е. начиная с нижнего максимального номера яруса. Поскольку на первом (верхнем) ярусе иерархической структуры находится только один элемент, матрица отношений его элементов (самых к себе) имеет единичные значения. Для соблюдения правил перемножения данная матрица представляет собой единичный вектор-строку $|e|$ размерности, равной количеству базовых элементов иерархической структуры.

С учётом изложенного значение приоритета запроса pr_c рассчитывается по формуле

$$pr_c = e * \left(\prod_{r=R_{\max}}^2 K^{r, \text{раб}} \right), \quad (51)$$

где e – единичный вектор-строка;

Π – знак перемножения матриц.

Рассчитанные значения приоритетов в дальнейшем могут использоваться для определения порядка обслуживания конфликтующих запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами с целью минимизации возможного ущерба для управления КА от переноса времени реализации конфликтующих запросов.

Работоспособность способа решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения, включая подготовку данных и расчёт значений приоритетов запросов подтверждена на примере разрешения конфликтной ситуации по задействованию наземного средства управления [27].

Выводы

1. Определены состав, содержание и разработано формальное описание выполнения завершающих этапов решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения, включающих расчёт частных значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры, оценку согласованности суждений эксперта, оценку согласованности мнений экспертов, расчёт обобщённых значений весовых коэффициентов элементов иерархической структуры и

расчёт значений приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА НСЭН. Разработанные формальные модели совместно с ранее разработанными формальными моделями предшествующих этапов обеспечивают возможность автоматизированного решения задачи в целом.

2. Численные значения приоритетов запросов являются мощным инструментом в руках лица, принимающего решения по разрешению конфликтных ситуаций, позволяющим не только выбирать для первоочередной реализации наиболее важные из них, но и определять степень превосходства одних запросов над другими.

3. Существенным преимуществом предложенного способа решения задачи назначения приоритетов является возможность заблаговременного, т.е. до возникновения конфликтной ситуации, автоматизированного выполнения наиболее трудоёмких и важных этапов подготовки данных для решения задачи, что позволит значительно сократить время на подготовку решений по разрешению конфликтных ситуаций.

4. Автоматизированное решение задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА обеспечит повышение обоснованности принимаемых решений по разрешению конфликтных ситуаций за счёт использования согласованных экспертных данных и численных значений приоритетов запросов, позволяющего снизить степень субъективизма принимаемых решений.

5. Предложенный способ решения задачи назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с КА не исключает возможности его совершенствования путём изменения иерархической структуры экспертных данных и уточнения результатов экспертного опроса, что позволит адаптировать способ к условиям управления космическими аппаратами и, тем самым, повышать его адекватность условиям применения.

Библиографический список

1. Сохранный Е.П. Способы решения основных проблемных вопросов разрешения конфликтных ситуаций по задействованию наземных средств управления космическими аппаратами // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109228>
2. Вороновский В.В., Дудко А.Н., Матюшин М.М., Сохранный Е.П., Сохранная А.Е., Усиков С.Б. Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Формирование иерархической структуры задачи // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 1(100). С. 46 – 53.
3. Сохранный Е.П. Задача назначения приоритетов запросов на проведение сеансов связи с космическими аппаратами // Лесной Вестник. 2019. Т. 23. № 4. С. 98 - 105.

4. Марцынковский Д.А., Владимирцев А.В., Марцынковский О.А. Руководство по риск-менеджменту. Ассоциация по сертификации «Русский Регистр». – СПб.: Береста, 2007. – 330 с.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
6. Лазарев А.А. Алгоритмы в теории расписаний, основанные на необходимых условиях оптимальности // Исследования по прикладной математике: сборник статей. - Казань: Изд-во Казанского государственного университета, 1984. № 10. С. 102 - 110.
7. Гурин Л.С., Дымарский Я.С., Меркулов А.Д. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. – М.: Советское радио, 1968. – 463 с.
8. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложение. – М.: Мир, 1965. – 302 с.
9. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействования наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 1 (74). С. 155 - 163.
10. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод повышения оперативности планирования задействования средств управления космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 1(86). С. 103 - 109.

11. Литвиненко А.О. Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67829>
12. Колпин М.А., Проценко П.А., Слащев А.В. Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77144>
13. Парк Дзин-Соо. Способ назначения приоритетов запросам на переключение канала в системе подвижной связи. Патент RU 2175464 С1. Бюлл. № 30, 27.10.2001.
14. Саммур Мохаммед. Способ и устройство для назначения приоритетов логическим каналам. Патент RU 2476026 С2. Бюлл. № 5, 20.02.2013.
15. Зайцев А.В. Система и способ адаптивной приоритизации объектов антивирусной проверки. Патент RU 2491611 С2. Бюлл. № 24, 27.08.2013.
16. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Физматлит, 2004. – 560 с.
17. Кацман В.Е., Косорукова И.В., Родин А.Ю., Харитонов С.В. Основы оценочной деятельности. – М.: Синергия, 2012. – 336 с.
18. Вороновский В.В., Дудко А.Н., Паздников В.Ю., Сохранный Е.П., Усиков С.Б. Задача повышения отношения согласованности экспертных оценок при определении важности характеристик исследуемых объектов // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 1(94). С. 46 - 53.

19. Теория прогнозирования и принятия решений / Под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высшая школа, 1977. – 351 с.
20. Maurice G. Kendall. Rank Correlation Methods. New York: Hafner Publishing Co, 1955, 196 p.
21. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессивного анализа. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.
22. Марголин Е.М. Методика обработки данных экспертного опроса // Полиграфия. 2006. № 5. С. 14 - 16.
23. Григан А.М. Управленческая диагностика: теория и практика. – Ростов-на-Дону: РСЭИ, 2009. – 316 с.
24. Денисова А.Л., Зайцев Е.В. Теория и практика экспертной оценки товаров и услуг. - Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2002. – 72 с.
25. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970. – 194 с.
26. Петерс Д., Хайес Дж., Хифтье Г. Химическое разделение и измерение. – М.: Химия, 1978. – 816 с.
27. Вороновский В.В., Дудко А.Н., Кулик М.С, Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Паздников В.Ю. и др. Способ назначения приоритетов запросам на проведение сеансов связи с космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения. Патент 2659773 РФ. МПК⁷ В 64 G 9/00. Бюлл. № 19, 03.07.18.