

УДК: 621.391

DOI: 10.53816/20753608_2022_4_92

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

INVESTIGATION OF THE INFORMATION STREAMS DISTRIBUTION ON THE SPECIAL-USE CONTROL SYSTEM

По представлению чл.-корр. РАРАН А.В. Грудзинского

А.В. Морозов, Д.Ю. Пономарев

Военный инновационный технополис «ЭРА»

A.V. Morozov, D.Yu. Ponomarev

В статье рассматривается тензорный подход к решению задачи исследования распределения информационных потоков в системе управления специального назначения с целью оценки их временных характеристик. Тензорный подход означает представление проекции исходной сети в многомерном пространстве таким образом, чтобы учесть взаимодействие процессов обработки/передачи/приема информации и топологии системы. Результатом работы являются: модель исследуемой системы управления и значения интенсивностей информационных потоков на всех участках системы, что позволило оценить временные характеристики для заданных маршрутов информации.

Ключевые слова: система управления, тензорная методология, временные характеристики, инвариантное уравнение.

In the article we are presents the tensor approach for the decision task of investigation of the information streams distribution on the special-use control system for the purpose of delay estimation. The tensor methodology is based on the such representation of the initial network projection in multidimensional space that it let to provide the interaction accounting between an information processes and the system topology. Results of the work are the model of the control system and arrival intensities on all system sections that allowed to estimate of delays for given routes.

Keywords: control system, tensor methodology, time characteristics, invariant equation.

Введение

Возможности имеющихся в распоряжении современных вычислительных средств и систем связи за последние годы выросли настолько, что могут обеспечить существующие и перспективные потребности Вооруженных Сил Российской Федерации в формировании глубокого (т.е. обладающего многоуровневой архитектурой) единого информационного пространства необходимо-

го при ведении боевых действий в рамках сетцентрической парадигмы.

Формирование единого информационного пространства как в глобальном, так и в локальном смысле обеспечивается объединением ресурсов различных баз данных, систем обработки и передачи информации (информационно-телекоммуникационные сети и системы), что позволяет удовлетворить информационные потребности органов управления

различного уровня в реальном масштабе времени и повысить эффективность управления Вооруженными силами [1–3].

В современных условиях предполагается, что в едином информационном пространстве будет происходить взаимодействие не только самих элементов управления, но и систем наблюдения и сбора данных, ударных и боевых систем [1–6].

Таким образом, современные (и перспективные) системы управления специального назначения являются интегратором гетерогенной нагрузки, т.е. разнородной по своему составу, создаваемой источниками различного типа [3]. Более того, как отмечается в [4], повышение эффективности в управлении обеспечивается комплексом действий: своевременным получением достоверных данных об оперативной обстановке, наглядным представлением полученных данных, проведением анализа данных в кратчайшие сроки, опережением противника в принятии решения и его доведения.

Определенно можно сказать, что все указанные процессы должны происходить в определенном, не превышающем заданное значение, временном интервале, поэтому одной из важных характеристик, определяющих эффективность системы управления, является время доставки информации [5, 6]. Стоит отметить, что временные характеристики, как характеристики, учитывающие влияние процессов управления на эффективность применения того или иного вида вооружений, обладают значимостью в том числе и для систем ПВО [7] и радиоэлектронной борьбы [8].

Действительно, оперативность и своевременность доставки информации значительно повышает успех запланированных действий. Значительную роль в обеспечении таких свойств системы управления играют сети и системы связи,

что особенно ярко проявляется при проведении высокодинамичных специальных операций [6].

Цель работы заключается в определении возможностей инвариантных моделей распределения информационных потоков, оценке временных характеристик по доставке информации в системах управления специального назначения при исследовании распределения информационных потоков.

Исследование распределения информационных потоков в системе управления специального назначения

В качестве объекта исследования рассматривается система управления определенного уровня. Число элементов системы для выполнения заданных функций может быть различно [2, 3, 5]. Обобщенная структурная схема исследуемой системы управления представлена на рис. 1.

Для данной системы можно определить следующие элементы и направления передачи информации. Данные об обстановке поступают из различных источников, в качестве которых могут рассматриваться, например: наземные средства наблюдения (контроля, корректировки и др.); воздушные средства (беспилотные летательные аппараты — БЛА, метеозонды и т.д.); системы космического базирования (спутниковые системы различного назначения) [2–6].

Данные, полученные от указанных источников, поступают в центр сбора данных, где проходят предварительную обработку, первичную сортировку и классификацию, после чего передаются в центр обработки данных, в котором производится основная обработка данных, с целью получения детальной информации об обстановке на заданном участке местности для определения замысла действий.

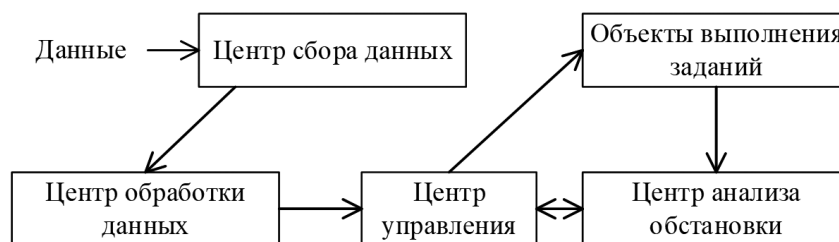


Рис. 1. Обобщенная структурная схема исследуемой системы управления

Обработанная информация поступает в центр управления: для оценки обстановки и формирования выводов о ней (при прямом взаимодействии с центром анализа обстановки); для подготовки и уточнения предложений для вышестоящих центров управления; для подготовки и принятия решения; для выработки и передачи распоряжений на уровень исполнения [2–4].

На уровне исполнения находятся объекты выполнения заданий, которые обеспечивают обработку поступающих распоряжений, их исполнение и передачу информации об оперативной обстановке на локальном участке в центр анализа.

Естественно, что современные действия соединений и подразделений требуют своевременного реагирования на динамично изменяющуюся обстановку. С этой целью необходимо обеспечить оценку задержек по передаче информации на всех участках системы управления для минимизации времени обработки в данной системе. Для оценки среднего времени задержки в данной работе предлагается использовать тензорную модель распределения потоков информации. Такой подход позволит формализовать процесс определения интенсивности информационных потоков в рассматриваемой системе управления и обеспечит получение среднего времени задержки как для каждой отдельной системы, так и для заданных маршрутов информации [9]. В отличие от методов, основанных на графах, тензорный подход позволяет интегрально подходить к использованию информации о топологии системы и процессах, происходящих в отдельных узлах [10].

Для использования тензорной методологии при моделировании объектов сложной структуры определяются следующие объекты [9]: исходная сеть, примитивная сеть и вспомогательная сеть.

Исходная сеть — это множество моделей систем распределения информации, которые отражают место и функции элементов моделируемой сети. Исходная сеть может быть приведена к узловому или контурному виду [9, 10]. В данной работе используется узловая модель. Примитивная узловая сеть представляет собой декомпозиционную сеть, т.е. сеть, состоящую из моделей систем распределения информации, не связанных между собой.

Вспомогательная узловая сеть используется для введения топологической информации в тензорную модель, что обеспечивает учет топологии исходной сети. Во вспомогательной системе координат исходная сеть заменяется узловой сетью, которая формируется при объединении систем примитивной сети. Для нахождения элементов тензора преобразования во вспомогательной сети вводятся узловые загрузки, и для каждой системы они выражаются через загрузки примитивной сети в соответствии с их местом в исходной, что и позволяет обеспечить учет структуры сети в ее модели [9, 10].

В таком случае, для каждой системы примитивной узловой сети можно записать уравнение состояния [10]: $\lambda^{\beta} = \mu^{\beta\beta} \rho_{\beta}$, где λ^{β} — тензор интенсивности поступления, ρ_{β} — тензор загрузок, $\mu^{\beta\beta}$ — тензор интенсивности обслуживания. Уравнение состояния вспомогательной сети записывается, как [9, 10]: $\lambda^{\beta} = \mu^{\beta\beta} \rho_{\beta}$. Так как воздействием в узловом методе являются загрузки систем, то уравнения преобразования для узловой сети определяются, как: $\rho_{\beta} = A_{\beta}^{\beta'} \rho_{\beta'}$, где $A_{\beta}^{\beta'}$ — тензор преобразования, содержащий информацию о топологии исходной сети.

Для формирования тензора преобразования $A_{\beta}^{\beta'}$ в виде матрицы преобразования A , устанавливается соотношение между загрузками примитивной и вспомогательной сетей. Полученные коэффициенты при загрузках примитивной сети образуют матрицу A .

Исходя из правил преобразования уравнение состояния вспомогательной сети приобретает вид [9, 10]:

$$(A_{\beta}^{\beta'})_t \mu^{\beta\beta} A_{\beta}^{\beta'} \rho_{\beta} = A_{\beta}^{\beta'} \lambda^{\beta}. \quad (1)$$

Решая полученное матричное уравнение относительно ρ_{β} , загрузки в исходной сети находятся, как: $\rho_{\alpha} = A_{\alpha}^{\beta'} \rho_{\beta}$. После получения загрузок систем, дальнейшее нахождение вероятностно-временных характеристик связано с заданием дисциплины обслуживания, использованием формул для среднего времени задержки и использовании маршрутной таблицы.

Для формирования структуры исходной сети в узловом виде используем обобщенную структурную схему исследуемой системы управления (рис. 1). Место каждой системы в модели исследуемого объекта определяется функцией

ональной ролью моделируемого процесса. Результат формирования структуры исходной сети в ортогональном виде, т.е. содержащем как контуры, так и узлы, представлен на рис. 2.

Естественно, что рассматривается достаточно обобщенная модель, но отражающая основные принципы формирования моделей сложной структуры. При необходимости структура моде-

ли может быть дополнена системами и связями для повышения адекватности отображения исследуемых процессов.

В представленной структуре исходной сети системы 1, 8 и 10 представляют собой модели систем наблюдения и сбора информации, например: 1 — спутниковая, 8 — БЛА, 10 — наземная системы. Для моделирования

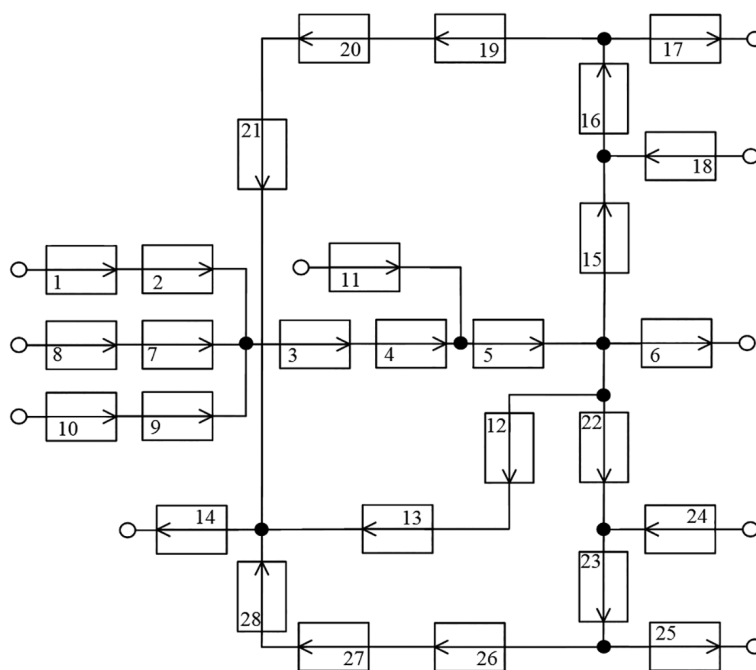


Рис. 2. Структура модели в виде исходной сети, не приведенной к узловому виду

Таблица 1

Функциональные роли моделей систем

Номер модели в соответствии с рис. 2	Функциональная роль системы
4	модель линии связи между центром сбора данных и центром управления
5	модель системы обработки информации центра управления
6	модель учета потока информации с завершением обработки в центре управления
11	модель системы обработки информации, поступающей из центра анализа обстановки
12	модель линии связи между центром управления и центром анализа обстановки
13, 21, 28	модели систем приема информации, поступающей из центра управления и от объектов выполнения заданий
14	модель системы обработки информации в центре анализа обстановки
15, 22	модели линий связи между центром управления и объектами выполнения заданий
16, 23	модели систем обработки информации объектов выполнения заданий
17, 24	модели систем обработки информации по передаче команд на выполнение
18, 25	модели систем обработки по предоставлению информации о выполненных заданиях или изменении обстановки
19, 26	модели систем обработки информации, передаваемой в центр анализа обстановки
20, 27	модели линий связи между объектами выполнения заданий и центром анализа обстановки

линий связи между системами наблюдения и сбора информации и центром сбора данных используются системы 2, 7 и 9.

Таким образом данные поступают в модель системы обработки центра сбора данных, представленную системой 3. Функциональная роль других систем модели представлена в табл. 1.

Место и роль системы в структуре модели позволяют задать ее дисциплину обслуживания и параметры, например: $M/D/1$, $M/M/1$ (или практически любая другая) и интенсивность обслуживания, что определяется функциями, свойствами и параметрами моделируемой системы (передача пакетами, обработка или линия связи, пропускная способность и т.д.).

Для дальнейшего применения тензорного узлового метода к задаче моделирования распределения информационных потоков в системах управления специального назначения необходимо привести модель к узловому виду. Для этого необходимо избавиться от контуров в структуре сети [9, 10]. В данном случае достаточно произвести разрыв связей попарно между системами 20–21 и 27–28, но при этом необходимо учитывать, что интенсивности трафика должно выполняться условие сохранения потока: $\lambda_{20} = \lambda_{21}$ и $\lambda_{27} = \lambda_{28}$.

После формирования структуры модели и задания дисциплины обслуживания и парамет-

ров систем модели формируется инвариантное уравнение (1), решение которого обеспечит нахождение распределения потоков в сети, что, в свою очередь, предоставит возможность определения временных характеристик исследуемой системы управления.

Для исследуемой сети на основе структуры, представленной на рис. 2, сформирована узловая модель путем удаления связей между системами 20–21 и 27–28 с сохранением интенсивности потоков. В результате определен тензор преобразования, необходимый для записи уравнения (1) [10]:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{pmatrix}.$$

Полученный тензор преобразования используется для определения компонентов инвариантного уравнения (1), к которым относится матрица интенсивностей обслуживания (в связи с громоздкостью полностью не приводится):

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mu_1 + \mu_2 & -\mu_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\mu_2 & \mu_2 + \mu_3 + \mu_7 + \mu_9 & -\mu_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\mu_3 & \mu_3 + \mu_4 & -\mu_4 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_4 & \mu_4 + \mu_5 + \mu_{11} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mu_5 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\mu_7 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{28} \end{pmatrix}.$$

При отсутствии влияния между системами матрица интенсивностей обслуживания обладает большим числом нулевых элементов, т.е. является сильно разреженной. Для уменьшения разрядности матрицы можно использовать формулы редукции.

Следующим элементом инвариантного уравнения (1) является вектор интенсивностей поступления. Для рассматриваемой модели системы управления вектор интенсивностей поступления

приобретает следующий вид (в связи с большой размерностью полностью не приводится):

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 - \lambda_2 \\ \lambda_2 - \lambda_3 + \lambda_7 + \lambda_9 \\ \lambda_3 - \lambda_4 \\ \lambda_4 - \lambda_5 + \lambda_{11} \\ \lambda_5 - \lambda_6 - \lambda_{12} - \lambda_{15} - \lambda_{22} \\ \vdots \\ \lambda_{27} \\ -\lambda_{28} \end{pmatrix}.$$

Учитывая, что сумма интенсивностей поступления в узле равна нулю, то в результате преобразования рассматриваемый вектор со-

держит только независимые интенсивности поступления, из которых можно сформировать следующий вектор:

$$\Lambda_{\text{нез}} = (\lambda_6 \quad -\lambda_8 \quad -\lambda_{10} \quad -\lambda_{11} \quad \lambda_{14} \quad \lambda_{17} \quad -\lambda_{18} \quad \lambda_{20} \quad -\lambda_{21} \quad \lambda_{24} \quad -\lambda_{25} \quad \lambda_{27} \quad -\lambda_{28})^T.$$

Интенсивности, представленные в векторе $\Lambda_{\text{нез}}$, в свою очередь могут быть выражены через интенсивности источников с учетом маршрута

передачи по сети. В результате чего выражение для определения $\Lambda_{\text{нез}}$ принимает следующую форму:

$$\Lambda_{\text{нез}} = \begin{pmatrix} p_6 (\lambda_1 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) \\ -\lambda_8 \\ -\lambda_{10} \\ -\lambda_{11} \\ (p_{12} + p_{15}p_{19})(\lambda_1 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) + p_{19}\lambda_{18} + \lambda_{28} \\ p_{17} [p_{15}(\lambda_1 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) + \lambda_{18}] \\ -\lambda_{18} \\ p_{19} [p_{15}(\lambda_1 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) + \lambda_{18}] \\ -p_{19} [p_{15}(\lambda_1 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) + \lambda_{18}] \\ p_{24} [p_{22}(\lambda_1 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) + \lambda_{25}] \\ -\lambda_{25} \\ p_{26} [p_{22}(\lambda_1 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) + \lambda_{25}] \\ -\lambda_{28} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При этом необходимо учитывать вероятности распределения трафика в сети, определяемые структурой модели исследуемой системы (рис. 2), при разделении потоков в соответствующих узлах ($\lambda_{16} = \lambda_{17} + \lambda_{19}$, $\lambda_{23} = \lambda_{24} + \lambda_{26}$, $\lambda_5 = \lambda_6 + \lambda_{12} + \lambda_{15} + \lambda_{22}$): $p_{17} + p_{19} = 1$, $p_{24} + p_{26} = 1$, $p_6 + p_{12} + p_{15} + p_{22} = 1$.

Исходя из определенных в выражении (2) переменных — интенсивностях источников трафика, для получения численных результатов для разработанной модели исследуемой системы управления необходимо задать значения данных интенсивностей в соответствии с их функциональной ролью. Информация о значениях интенсивностей источников трафика представлена в табл. 2. Выбор того или иного значения определялся местом и функцией системы в общей структуре модели исследуемого объекта.

Распределением трафика можно управлять, используя распределение вероятностей, присутствующих в выражении (2). Для получения численных результатов в статическом режиме были определены следующие значения данных вероятностей: $p_6 = 0,3$; $p_{12} = 0,3$; $p_{15} = 0,25$; $p_{17} = 0,4$; $p_{19} = 0,6$; $p_{22} = 0,15$; $p_{24} = 0,3$; $p_{26} = 0,7$.

Кроме интенсивностей источников трафика и распределения вероятностей необходимо задать интенсивности обслуживания, также исходя из места и роли системы в модели. Для получения численных значений были выбраны следующие значения интенсивностей обслуживания (выражены в сообщениях в час):

$$\begin{aligned} \mu_1 = \mu_{17} = 60, \quad \mu_2 = \mu_{19} = \mu_{24} = 70, \quad \mu_3 = 200, \\ \mu_4 = \mu_6 = \mu_{11} = \mu_{12} = \mu_{14} = \mu_{18} = \mu_{25} = \mu_{28} = \mu_{21} = 100, \\ \mu_5 = 300, \quad \mu_7 = 30, \quad \mu_8 = \mu_{13} = \mu_{27} = 50, \quad \mu_9 = 20, \\ \mu_{10} = \mu_{15} = \mu_{20} = \mu_{22} = 40, \quad \mu_{16} = \mu_{26} = 80, \quad \mu_{23} = 90. \end{aligned}$$

Использование элементов инвариантного уравнения (1): тензора преобразования \mathbf{A} , матрицы интенсивностей обслуживания \mathbf{M} и вектора интенсивностей поступления Λ ; позволило найти распределение трафика для заданных числовых значений, что обеспечило нахождение временных характеристик исследуемой системы управления. В качестве модели использовалась система массового обслуживания $M/M/1$.

Значения интенсивностей источников трафика

Интенсивности	Функциональная роль системы	Значение интенсивности, сообщений в час
λ_1	модель спутниковой системы наблюдения	30
λ_8	модель системы наблюдения БЛА	15
λ_{10}	модель наземной системы наблюдения	10
λ_{11}	модель системы обработки информации, поступающей из центра анализа обстановки	15
λ_{18}	модель системы обработки по предоставлению информации о выполненных заданиях или изменении обстановки	15
λ_{25}	модель систем обработки по предоставлению информации о выполненных заданиях или изменении обстановки	10
λ_{28}	модель систем приема информации, поступающей из центра управления и от объектов выполнения заданий	15

В качестве примера рассматривались следующие направления передачи/приема/обработки информации: спутниковая система-центр сбора данных-центр обработки-центр управления-объект выполнения; БЛА- центр сбора данных-центр обработки данных-центр управления; объект выполнения-центр анализа обстановки. Выбор анализируемых маршрутов связан с необходимостью оценки возможностей разработанной модели по определению временных характеристик как в прямом (от систем сбора данных до объектов выполнения), так и в обратном направлениях (от объектов выполнения в центр анализа). В таком случае, для первого маршрута временная задержка определяется, как (все значения выражены в часах):

$$T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_{15} + T_{16} + T_{17} = 0,1546 ,$$

для второго маршрута:

$$T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 = 0,1362 ,$$

и для третьего задержка равна:

$$T_{14} + T_{16} + T_{18} + T_{19} + T_{20} + T_{21} = 0,1284 .$$

Полученный результат позволяет сделать вывод о возможности использования представленного в статье подхода к оценке временных

характеристик систем управления рассматриваемого вида. С целью автоматизации оценки временных задержек для всего множества маршрутов можно использовать комбинированный подход при введении в узловой метод тензора контурных интенсивностей, который будет определять возможные пути передачи для всей исследуемой системы [9, 10].

Заключение

Формирование единого информационного пространства в современных условиях является базовым для осуществления замыслов и реализации планов при управлении объектами и силами различного назначения. Естественно, что немаловажную роль при этом играют системы управления, использующие сквозные технологии для решения поставленных задач. Возможность снижения временных затрат на качество управления позволит повысить вероятность их своевременного доведения и исполнения.

В представленной работе система управления рассматривается с позиции применения тензорной методологии, позволяющей учесть, как топологию сети в виде маршрутов передачи информации, так и процессы обработки/передачи/приема потоков трафика в исследуемой сети.

С этой целью в работе реализована тензорная модель распределения трафика в системе

управления с обобщенной структурой связей, и определены основные возможности представленного подхода по оценке временных характеристик рассматриваемой системы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о достаточно хорошо формализуемой процедуре исследования распределения трафика, позволяющей оценить временные задержки в исследуемой сети, а при необходимости обеспечить их снижение путем перераспределения потоков информации.

В дальнейшем возможно использование методов оптимизации распределения трафика с целью достижения наилучшего в заданном смысле результата. Также следует отметить, что реализация представленного подхода в аппаратно-программных комплексах специального назначения полностью соответствует концепции сетецентрического подхода к управлению и позволяет сформировать единое информационное пространство с учетом требований к своевременности и надежности доставки информации.

Литература

1. Алексеев П.Н., Баранов Р.П. Новая парадигма управления войсками (силами) // Военная мысль. 2021. № 5. С. 50–58.

2. Кочкаров А.А., Рахманов А.А., Тимошенко А.В., Путько С.А. Структурно-пространственная модель распределения средств системы мониторинга специального назначения по объектам наблюдения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 124–132.

3. Лиференко В.Д., Легков К.Е., Гураль Д.А. Методический подход к математическому описанию функционирования информационно-управляющей сети распределенными гетерогенными информационно-вычислительными ресурсами в интересах системы поддержки и принятия решения специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1–2. С. 84–90.

4. Сидняев Н.И. Сетецентрические управляющие системы и боевые операции // Военная мысль. 2021. № 12. С. 60–71.

5. Пылинский М.В., Кривцов С.П., Захарченко А.С. Формирование иерархической системы показателей эффективности процесса функционирования сети связи специального назначения как многоуровневой и динамической системы при ведении боевых действий и проведении контртеррористических операций // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 3–4 (141–142). С. 103–110.

6. Сызранцев Г.В., Сазыкин А.М., Лукин К.И. Методическое обеспечение обоснования требований по управляемости системы связи группировки в высокодинамичных действиях специального назначения // Известия РАН. 2021. № 2 (117). С. 73–83.

7. Сильников М.В., Лазоркин В.И. Формализация системы противовоздушной обороны и системы активной защиты объектов от средств поражения в условиях массированного налета средств воздушно-космического нападения // Известия РАН. № 2021. 2 (117). С. 25–32.

8. Неплюев О.Н. Метод управления комплексом радиоэлектронной борьбы на новых физических принципах // Известия РАН. 2021. № 3 (118). С. 63–68.

9. Морозов А.В., Пономарев Д.Ю. Модель распределения трафика в многоуровневой инфокоммуникационной сети специального назначения [Электронный ресурс] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. 2021. Т. 9, 2. Режим доступа: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=899>.

10. Пономарев Д.Ю. Особенности применения тензорного анализа к моделированию телекоммуникационных сетей [Электронный ресурс] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. 2018. Т. 6, 2. С. 46–63.