

<sup>1</sup>Дмитрий Павлович Кучеров (д-р техн. наук, с.н.с.)<sup>2</sup>Андрей Николаевич Козуб (канд. техн. наук, с.н.с.)<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Киев, Украина<sup>2</sup>Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

## ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА

В статье предлагается расчёт пропускной способности информации, поступающей от группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выполняющих задачу мониторинга земной поверхности. Предполагается, что группа БПЛА может выполнять задачу мониторинга, используя централизованное управление для выполнения одной задачи в составе группы, так и совершенно разные задачи каждым членом группы. Обе задачи применения группы должны решаться с одного пункта управления. Объём передаваемого потока информации растёт. Принцип обработки информационных потоков предполагает наличие накопительного буфера, где создаётся очередь потока обслуживаемой информации. Для получения основных результатов существенно использованы теоретические подходы анализа информационных систем с очередями. Информация собирается и передается далее для обслуживания сервером. Для анализа показателей качества системы обслуживания выбраны пропускная способность канала передачи и ёмкость накопительного буфера. Основное допущение при анализе подобных систем заключается в том, что пропускная способность информационной системы подчиняется экспоненциальному распределению входных данных по закону Пуассона, что не всегда выполняется. В реальных ситуациях, обработка данных занимает некоторое время, что приводит к последствию. Поэтому, чтобы решить эту проблему был предложен учет последствия в потоке обслуживания. Это оказывается возможным, если отказаться от экспоненциального распределения интервалов между событиями потока обслуживания и заменить его потоком Эрланга второго порядка. Достоверность полученных данных подтверждается расчётом по формулам Полячека-Хинчина. В статье приводится числовой пример расчёта на основании обоих подходов.

**Ключевые слова:** группа БПЛА; источник информации; пропускная способность; сервер; буфер; очередь; обслуживание информационного потока.

### Вступление

#### Постановка проблемы.

Современные исследования в области применения беспилотных летательных аппаратов ориентированы на поиск возможностей коллективного их использования. Такие исследования в настоящее время сейчас направлены на оборонную сферу, предупреждение и ликвидацию последствий техногенных катастроф и аварий, а также могут быть использованы для поисковых или транспортных задач.

Вопросы коллективного дистанционного управления машинами (роботами) всех сфер жизнедеятельности человека (земля, вода, космос, недра земли) находятся в поле зрения ученых экономически развитых государств, а ежегодный рост количества публикаций в периодических отечественных изданиях и изданиях ближнего и дальнего зарубежья в данной области исследований, свидетельствует об актуальности обсуждаемых вопросов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Задача для группы дистанционно управляемых роботизированных средств ставится оператором, которая может быть выполнена

согласованно, децентрализованно или же вовсе ориентирована на одновременное выполнение разных задач. Таким образом, типовая структура группового управления роботизированных средств должна иметь единый пульт управления с возможностью постановки задач отдельным средствам и отображения их деятельности. Система соответственно представляет компьютерную систему, которая имеет собственное программное обеспечение, гармонизируемое с существующими операционными системами. Роботизированное средство в свою очередь обеспечивается средствами связи, ориентирования и навигации, исполнительными устройствами. Предполагается, что программное обеспечение будет в состоянии обеспечить характеристики точности и времени выполнения поставленных группе задач.

В случае децентрализованного управления система управления роботизированным средством должна строиться как система с элементами искусственного интеллекта, позволяющая ставить задачу собственным исполнительным органам и контролировать ее выполнение. Отсюда следует, что каждый элемент группы должен иметь

иерархическую систему управления, состоящую, как минимум, из двух уровней управления. Верхний уровень отвечает за принятие решений на выполнение задач, а нижний уровень, в свою очередь, отвечает за качество выполняемых задач.

Существуют определенные отличия в условиях применения воздушных и наземных аппаратов, которые заключаются в управляемости и способах доставки роботизированных средств в пункт назначения, полезной нагрузки аппарата, а также контроля за их дальнейшими действиями.

Обработка данных принимаемых от группы БПЛА может проводиться на основе теории массового обслуживания, основные положения которой изложены в [1]. В зарубежной литературе [2-6] данная задача известна как задача обслуживания очередей. Характерной постановкой для анализа этой задачи является её представление в виде так называемой нотации Кенделла [2], в которой указывается распределения запросов и обслуживания, а также количество используемых серверов. Типовая задача, когда поток заявок и обслуживания одним сервером распределены по закону Пуассона, представлена в [3].

Рассмотрение реальной ситуации при обслуживании потока данных базируется на формулах Полячека-Хинчина, представленных в [7, 8]. Однако, решение задачи обработки данных, поступающих от  $n$ -источников в исследуемой литературе не обнаружено и представляет научный интерес.

**Цель статьи.** На основании представлений о работе группы БПЛА, передающей информацию на сервер, сформулировать и решить задачу обработки одним сервером информацию, поступающую от  $n$ -источников при наличии буфера, где собирается информация, готовая к обработке, а также оценить основные показатели качества системы обслуживания и предложить подход к оценке ёмкости накопительного буфера.

### Изложение основного материала исследования

**Постановка задачи.** Имеем систему, состоящую из  $l$  источников информации, передающих серверу информацию произвольным образом (рис. 1). Каждый источник представляет прямо-передающее устройство, где передающее устройство передает данные, а приемник получает сигналы готовности и конца приема данных. Полезная информация представляет некоторый блок маркированных данных. Процесс приема данных и отправки подтверждения будем называть обслуживанием. Информация собирается и передается далее для обслуживания сервером. Сервер принимает информацию и направляет источнику подтверждение о получении и обслуживании данных. Данные на сервер от одного источника поступают с интенсивностью  $\lambda$ , а интенсивность потока заявок от всех источников  $\Lambda = n\lambda$ . Каждый источник обслуживается с интенсивностью  $\mu$  такой, что  $\lambda \neq \mu$ .

Сервер обслуживает источники в порядке очереди, поэтому данные выстраиваются в некотором буфере, находящемся на стороне сервера, в последовательность, которую обычно называют очередью, где они ожидают обслуживания, которое в среднем занимает интервал  $T_N$ . Максимальное число данных, которые могут находиться в очереди  $N$ , определяет размер буфера. Данные в очереди обслуживаются в порядке поступления, т.е. первый приходящий блок обслуживается первым (метод FIFO). Эта одноканальная система массового обслуживания (СМО) замкнутого типа с  $n$  числом состояний.

Ставится задача найти такие параметры системы без потерь информации в предположении о пуассоновском распределении поступления и обслуживания блоков информации, что соответствует модели  $M/M/1$  [2], и произвольном потоке обслуживания.

**Решение.** Рассмотрим задачу об  $n$ -источниках. Введём следующие состояния:  $S_0$  – источники готовы к передаче информации,  $S_1$  – происходит передача информации от 1-го источника,  $S_2$  – два источника передают информацию, один из них обслуживается сервером, а информация от второго загружается в буфер;  $S_n$  – все источники передают информацию, один обслуживается, и есть информация, которая находится в буфере.

Поскольку информация поступает от всех источников одновременно, то поток заявок на обслуживание составляет  $\Lambda$ , а обслуживание происходит с интенсивностью  $\mu$ . Тогда система уравнений (1) для принятой схемы функционирования системы имеет вид

$$\begin{aligned} p_1 &= n\rho p_0, \\ p_2 &= n(n-1)\rho^2 p_0, \\ &\dots \\ p_n &= n!\rho^n p_0, \\ p_0 &= \left[1 + n\rho + \dots + n!\rho^n\right]^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Вероятности каждого из состояний находятся решением системы уравнений (1). Принятые показатели эффективности рассчитываются на основании этих решений. Принимая во внимание, что все заявки, не учитывая время обслуживания, будут, в конечном счёте, обслужены, то будем считать относительную пропускную способность системы равной 1. Тогда абсолютную пропускную способность можно оценить по вероятности занятости сервера с учётом интенсивности сервера  $\mu$ , то есть

$$A = \mu(1 - p_0). \quad (2)$$

Определим среднее число источников, информация от которых находится в системном буфере, как величину, которая отличается от общего числа не обслуженных источников  $w_{необ}$  на количество тех источников, информация которых обрабатывается  $w_{об}$ .

Число источников, не попадающих в категорию обслуженных  $w_{необ}$ , находится как

поток информации, соответствующий абсолютной пропускной способности, т.е. из равенства

$$(n - w_{необ})\lambda = (1 - p_0)\mu. \quad (3)$$

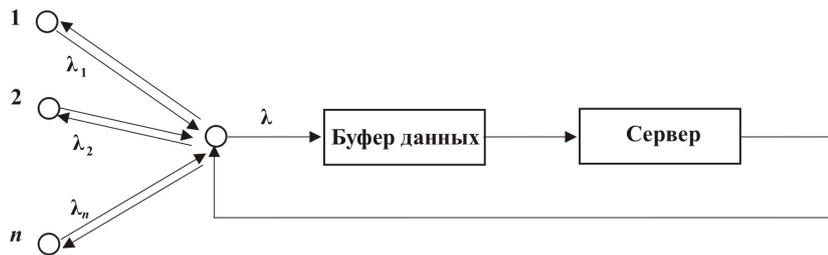


Рис. 1. Структура системы обслуживания с одним сервером

Число не обслуженных источников  $w_{необ}$  из (3) равно

$$w_{необ} = n - \frac{(1 - p_0)}{\rho}. \quad (4)$$

Число источников  $w_{об}$ , информация от которых обслуживается равно

$$w_{об} = 1 - p_0. \quad (5)$$

Тогда число источников, информация которых находится в буфере, определяется формулой

$$w_{буф} = n - \frac{(1 - p_0)}{\rho} - (1 - p_0) = n - (1 - p_0)(1 + 1/\rho). \quad (6)$$

Показатели занятости и пропускной способности (2) – (6) рассчитываются, полагая, что выполняются условия для пуассоновского потока событий, а именно ординарности, стационарности и отсутствия последствия в потоке данных [1, 3].

В реальности требование последствия не выполняется. Возникает необходимость учёта малого интервала времени  $\tau$  между соседними интервалами обслуживания, необходимого для приведения в состояние готовности к очередному обслуживанию свидетельствует о наличии ограниченного последствия в потоке данных (см., например, [4, п. 19.5]). Состояния системы не привязаны к номеру источника, определяются только готовностью передать информацию, поэтому для сервера одинаково равноценны. Учитывая ограниченный характер последствия, имеем поток событий Пальма [1, с. 206], а система представляет систему массового обслуживания с ожиданием.

Предположим, что данный поток получен просеиванием простейшего потока, в котором интервал времени  $T$  между соседними событиями будет состоять из 2-х подинтервалов: отрезка времени поступления  $T_1$  и малого интервала последствия  $\tau$ . Плотность распределения потока обслуживания подчиняется закону Эрланга 2-го порядка и определяется формулой

$$f_2(t) = \mu^2 t e^{-\mu t}, \quad (7)$$

где  $\mu = T_{\text{инт}}^{-1}$  – интенсивность потока обслуживания заявок, а основные параметры распределения, в соответствии с [2], имеют вид

$$m_{(2)} = \frac{2}{\mu}, \quad D_{(2)} = \frac{2}{\mu^2}, \quad \sigma_{(2)} = \frac{\sqrt{2}}{\mu}. \quad (8)$$

Описываемый поток относится к классу немарковских случайных процессов, поэтому составление дифференциальных уравнений для описания функционирования системы не представляется возможным. Традиционно анализ системы массового обслуживания немарковского типа сводится к расширению фазового пространства состояний. Метод применяется для ограниченного числа псевдосостояний, в случае  $n$ -источников число псевдосостояний может оказаться значительным, что увеличивает вычислительную сложность задачи.

Произведем оценку параметров системы с использованием формул Полячека-Хинчина [1]. Введём меру случайности для потока обслуживания в виде коэффициент вариации  $v$

$$v = \frac{\sigma_{(2)}}{m_{(2)}} \quad (9)$$

значения которого 0 и 1 соответствуют регулярному (неслучайному) и простейшему потоку данных. Тогда среднее число данных  $\bar{r}$ , находящихся в очереди, и среднее время ожидания в очереди  $\bar{t}_{ож}$  выражаются формулами

$$w_{буф} = \frac{\rho^2(1 + v^2)}{2(1 - \rho)}, \quad (10)$$

$$\bar{t}_{ож} = \frac{\rho^2(1 + v^2)}{2\lambda(1 - \rho)}. \quad (11)$$

где  $\rho$  – коэффициент загрузки системы, указывающий среднее число обслуженных заявок в потоке за среднее время обслуживания, т. е.  $\rho = \lambda/\mu$ .

**Пример.** Рассмотрим систему БПЛА, состоящую из трёх аппаратов, которая проводит мониторинг воздушного пространства в течение 2 часов. Сеанс связи с сервером каждого источника происходит каждые 20 минут. Интервал обслуживания каждого аппарата занимает приблизительно 10 минут. Оценка показатели пропускной способности системы и оценим требования к буферу, собирающему информацию для обслуживания. Для заданных исходных

данных имеем  $n=3$ ,  $\lambda=3$ ,  $\mu=6$ ,  $\rho=0,5$ . В соответствии с (1)

$$p_0 = \left[ 1 + 3 \cdot 0,5 + 3 \cdot 2 \cdot (0,5)^2 + 3! \cdot (0,5)^3 \right]^{-1} = 0,21.$$

Абсолютная пропускная способность сервера в соответствии с (2)

$$A = 6(1 - 0,21) = 4,74.$$

Среднее число не обслуженных аппаратов по (4)

$$w_{\text{необ}} = 3 - \frac{(1 - 0,21)}{0,5} = 1,42.$$

Размер буфера должен быть согласован с величиной (6)

$$w_{\text{буф}} = 3 - (1 - 0,21)(1 + 2) = 0,63.$$

При переходе времени обслуживания распределением Эрланга 2-го порядка с параметрами  $m=0,33$ ,  $\sigma=0,24$ ,  $v=0,72$  получаем длину буфера с учётом последствия по формуле (10)

$$w_{\text{буф}} = \frac{0,5^2(1 + 0,72^2)}{2(1 - 0,5)} = 0,38.$$

Анализ полученных цифр позволяет сделать вывод, что учёт последствия ослабляет требования к объёму буфера.

## Выводы и перспективы дальнейших исследований

В статье представлен общий подход к расчёту показателей информационного трафика воздушной информационной системы состоящей из  $n$  беспилотных летательных аппаратов, выполняющих задачу мониторинга земной поверхности на длительном интервале времени. Это позволяет при условии времени мониторинга  $T \rightarrow \infty$  применить для расчёта алгебраическую систему уравнений состояний системы, аналогично той, которая используется при анализе непрерывных марковских цепей – “схему гибели и размножения”. Данный подход справедлив в случае, когда информационный поток можно представить пуассоновским, что не всегда является адекватной заменой. В статье также рассмотрен подход, основанный на учёте последствия в обработке информации на сервере. При этом изначальная схема расчёта не выполняется, а возникает необходимость применения других подходов, в частности, замены экспоненциального распределения интервалов между событиями на Эрланга второго порядка. В этом случае временные показатели к системе рассчитываются на основании формул Полячека-Хинчина.

## Литература

1. **Вентцель Е. С.** Исследование операций / Вентцель Е.С. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.  
2. **Столлингс В.** Современные компьютерные сети / В. Столлингс. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.  
3. **Abate J.** Simple spectral representations for the M/M/1 queue / Abate J. // Queueing systems. – № 3. – 1988. – P. 321-346.  
4. **Stewart W. J.** Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation / W. J. Stewart. – NJ: Princeton University Press, 2009. – 776 p.  
5. **Касконе А.** Система Geom/G/1/n с дисциплиной LIFO без прерывания обслуживания и ограничением на суммарный объем заявок /

А. Касконе, Р. Манзоа. Печинкин, С. Я. Шоргин // Автомат. и телемех. – 2011. – № 1. – С. 107–120.  
6. **Гришунин Ю.Б.** Оптимальное управление очередью в системе  $M|G|1|_{\infty}$  с возможностью ограничения приема заявок / Ю.Б. Гришунин // Автомат. и телемех. – 2015. – Вып. 3. – 79-93 с.  
7. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей / Е. С. Вентцель — М.: Высш. шк., 1999.— 576 с.  
8. **Вишневский В.М.** Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / Вишневский В.М. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.

## ОЦІНКА ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ГРУПИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИКОНАННІ ЗАВДАННЯ МОНІТОРИНГУ

<sup>1</sup>Дмитро Павлович Кучеров (д-р техн. наук, с.н.с.)

<sup>2</sup>Андрій Миколайович Козуб (канд. техн. наук, с.н.с.)

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

В статті пропонується розрахунок пропускної спроможності інформації, що надходить від групи безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що виконують завдання моніторингу земної поверхні. Передбачається, що група БПЛА може виконувати завдання моніторингу, використовуючи централізоване управління для виконання одного завдання в складі групи, так і абсолютно різні завдання кожним членом групи. Обидва завдання застосування групи повинні вирішуватися з одного пункту управління. Обсяг переданого потоку інформації зростає. Принцип обробки інформаційних потоків передбачає наявність накопичувального буфера, де створюється черга потоку інформації, що обслуговується. Для отримання основних результатів суттєво використані теоретичні підходи, що застосовуються для аналізування інформаційних систем з чергами. Інформація збирається і передається далі для обслуговування сервером. Для аналізу показників якості системи обслуговування обрані пропускна здатність каналу передачі і смість накопичувального буфера. Основне допущення при аналізі подібних систем полягає в тому, що пропускна здатність інформаційної системи підпорядковується експоненціальним розподілом вхідних даних за законом Пуассона, що не завжди виконується. У реальних ситуаціях, обробка даних займає деякий час, що призводить до післядії. Тому, щоб вирішити цю проблему було запропоновано врахування післядії в потоці обслуговування. Це

виявляється можливим, якщо відмовитися від експоненціального розподілу інтервалів між подіями потоку обслуговування і замінити його потоком Ерланга другого порядку. Достовірність отриманих даних підтверджується розрахунком за формулами Полячека-Хинчина. В статті наводиться числовий приклад розрахунку на основі обох підходів.

**Ключові слова:** група БПЛА; джерело інформації; пропускна здатність; сервер; буфер; черга; обслуговування інформаційного потоку.

## AIR DRONES GROUP CAPACITY ESTIMATION DURING MONITORING MISSION

*Dmytro P. Kucherov (Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow)*

*Andrii M. Kozub (Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow)*

*National Aviation University, Kyiv, Ukraine*

*National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine*

*In this paper is considered the calculation of capacity information which comes from an unmanned aircraft vehicles group (UAVs) performing the task of monitoring the ground environment. It is assumed that a group of UAVs can perform the task of monitoring in concert with centralized control or completely different tasks each member of the group. Both versions with UAVs must used from one control point. The capacity of received packets of information is increases. Principle of processing information packets in one presupposes a buffer store, where the information is built in the queue. For the main results are used essentially theoretical approaches used for analysis of information systems with queues. To analyze the capacity of selected indicators of absolute and relative bandwidth server data processing and bit volume of buffer storage. The main assumption, which proposed for typical calculating bandwidth assumes an exponential distribution input data by Poisson law. In real situations, data processing takes some time, which leads to aftereffect. Therefore, to solve this problem and proposed to carry out accounting aftereffect in the flow of services. A special feature is the calculation of accounting aftereffect in the information that it was possible, if we abandon the exponential distribution of intervals between events, and to replace it with a second-order flow Erlang. Adequacy of calculations confirmed estimates that given by the formulas Poliaček-Khinchin. The article provides a numerical example of the calculation based on both approaches.*

**Keywords:** UAV group; information source; data capacity; server; buffer; queue; maintenance of information flow

### References

- 1. Ventcel' E.S.** (1972), Operations research. [*Issledovanie operacij*], Moscow, Sovetskoe radio, 552 p.
- 2. Stollings V.** (2003), Modern computer networks. [*Sovremennye komp'juternye seti*], SPb., Piter, 783 p.
- 3. Abate J.** Simple spectral representations for the M/M/1 queue / Abate J. // *Queueing systems*. No. 3., 1988, pp. 321–346.
- 4. Stewart W. J.** Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation, NJ: Princeton University Press, 2009, 776 p.
- 5. Cascone A., Manzo R., Pechinkin A.V., Shorgin C. J.** (2011), System Geom/G/1/n of a LIFO discipline without interruption of service, and a restriction on the total volume of orders. [*Sistema Geom/G/1/n c disciplinoy LIFO bez prerivania obsluzhivania i ogranicheniem na summarnij ob'em zajavok*], Avtomat i telemeh, No. 1, pp. 107–120.
- 6. Grishunina U.B.** (2015), Optimal queue management system M|G|1|∞ to restrict receipt of applications [*Optimalnoe upravlenie c ocheredju v sisteme M|G|1|∞ c vozmozhnostju ogranichenia prijoma zajavok*], Avtomat. i telemeh, Vip. 3, pp. 79–93.
- 7. Ventcel' E.S.** (1999), Theory of Probability. [*Teoriya veroyatnostej*], Moscow, Vyssh. shk., 576 p.
- 8. Vishnevskij V.M.** (2003), Theoretical bases of designing of computer networks. [*Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'juternyh setej*], Moscow, Tehnosfera, 512 p.

Отримано: 15.06.2015 р.