



## Оценка среднего возраста информации в системах со случайным доступом и множественным выходом

А. В. Борисовская<sup>а</sup>, ассистент, [orcid.org/0000-0002-0561-4226](https://orcid.org/0000-0002-0561-4226)

А. М. Тюрликов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7132-094X](https://orcid.org/0000-0001-7132-094X), [turlikov@k36.org](mailto:turlikov@k36.org)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,

Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** важным направлением в исследовании интернета вещей является анализ систем случайного множественного доступа, которые могут обеспечить устойчивую работу при большом числе устройств, в частности исследование среднего возраста информации для таких систем. **Цель:** исследовать средний возраст информации в системе со случайным доступом и множественным выходом. **Результаты:** сценарий интернета вещей, в котором все устройства находятся на одинаковом расстоянии от базовой станции, описан моделью со случайным доступом и множественным выходом, предложенной С. Г. Фоссом в 2017 г. Отмечено, что эта модель в отличие от других систем случайного множественного доступа обеспечивает стабильную работу системы при потенциально неограниченном числе устройств. В настоящей работе впервые применительно к этой модели предложен способ определения среднего возраста информации. Данный способ позволяет по последовательности моментов поступления сообщений в систему и выхода сообщений из системы определить средний возраст информации. Исследована зависимость среднего возраста информации от интенсивности входного потока. Выявлено, что средний возраст информации в системе с множественным выходом конечен при любой интенсивности входного потока, отличной от нуля. **Практическая значимость:** предложенный способ определения среднего возраста информации для системы с множественным выходом позволяет сравнивать по этому показателю различные сценарии систем интернета вещей и определять целесообразность использования систем с множественным выходом с учетом специфики рассматриваемого сценария. **Обсуждение:** в данной работе рассматривалась упрощенная модель системы со случайным доступом и множественным выходом. Однако результаты, полученные для этой модели, можно обобщить для более сложных моделей.

**Ключевые слова** – интернет вещей, средний возраст информации, случайный множественный доступ, множественный выход.

**Для цитирования:** Борисовская А. В., Тюрликов А. М. Оценка среднего возраста информации в системах со случайным доступом и множественным выходом. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 1, с. 51–60. doi:10.31799/1684-8853-2023-1-51-60, EDN: UBBHKD

**For citation:** Borisovskaya A. V., Turlikov A. M. Estimation of the average age of information in random access systems with multiple departure. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 1, pp. 51–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-1-51-60, EDN: UBBHKD

### Введение

За последние несколько лет интернет вещей (Internet of Things – IoT) успел занять важное место в нашей жизни. IoT [1] позволяет создавать гигантские сенсорные сети, которые могут передавать данные между собой или на общий центр без участия человека. Системы IoT помогают нам следить за окружающей средой, вовремя реагировать на чрезвычайные ситуации, удаленно контролировать состояние здоровья. В системах IoT постоянно возрастает число устройств, что привело к появлению двух взаимосвязанных проблем: 1) хорошо исследованные характеристики таких систем (задержка и т. п.) не позволяют в полной мере учесть особенности данных, которые передаются в таких системах; 2) с увеличением числа устройств система может перестать работать стабильно.

Опишем более детально первую проблему. В теории систем массового обслуживания

(СМО) одним из основных показателей качества работы систем является средняя задержка. Она исследуется давно, в том числе и в системах интернета вещей. В системах мониторинга окружающей среды или лесных пожаров необходимо, чтобы сообщения об изменении показателей температуры, влажности или степени загрязнения воздуха приходили на общий центр одновременно. При этом из-за ограниченных ресурсов канала в таких системах сообщения будут приходиться с задержкой. Уменьшить среднюю задержку в системе можно за счет уменьшения интенсивности появления новых сообщений, т. е. за счет увеличения периода анализа окружающей обстановки. Однако при таком подходе изменение важных показателей системы мониторинга может быть получено несвоевременно, так как сообщения будут отправляться реже. Таким образом, оптимизация средней задержки в системах IoT не приводит к оптимизации времени получения

свежих данных о состоянии системы. Именно этот факт и объясняет сформулированную ранее первую проблему. Для ее решения возникла необходимость введения нового показателя качества функционирования систем, отражающего актуальность полученной информации. Такой показатель был предложен в работе [2] и получил название возраст информации. В англоязычной литературе для него используется термин Age of Information (AoI). Он может играть важную роль не только в системах IoT [3], но и в вопросах надежности различных систем передачи данных [4].

Один из путей решения второй проблемы систем IoT — это использование систем случайного доступа с множественным выходом [5, 6], которые могут обеспечить устойчивую работу при любой интенсивности входного потока. Как было отмечено выше при обсуждении первой проблемы, в последнее время средний возраст информации интенсивно исследовался для различных моделей систем IoT. Однако для систем, которые могут обеспечить устойчивую работу при любой интенсивности входного потока, такие исследования не проводились. Поэтому исследование среднего возраста информации для системы с множественным выходом является актуальным.

### Обзор исследований среднего возраста информации в системах IoT

Впервые понятие среднего возраста информации для систем IoT было сформулировано в работе [2]. В этой работе, а затем в работах [7–9] был описан способ вычисления среднего возраста информации для простейших СМО, таких как M|D|1, M|M|1 и D|M|1. В работе [10] исследуется средний возраст информации для более сложных СМО с прямым и обратным порядком обслуживания. В англоязычной литературе существуют сокращенные названия для прямого (First-Come-First-Served — FCFS) и обратного (Last-Come-First-Served — LCFS) порядка обслуживания. Возраст информации для систем с несколькими источниками рассматривался в работе [11].

В большинстве систем IoT для сценариев с большим числом устройств используется случайный множественный доступ (СМД) [12]. Например, в сетях, построенных по технологии LoRaWAN, используется алгоритм случайного множественного доступа ALOHA [12, 13]. В настоящее время появляются исследования среднего возраста информации в системах СМД [14–21], учитывающие специфические особенности таких систем.

Для большинства систем передачи данных, в том числе и для систем СМД, средняя задержка является монотонно возрастающей функцией от интенсивности входного потока. Существует небольшой класс систем, в которых средняя задержка немонотонна. Например, в системе СМД с обратной двоичной связью «успех-неуспех» [22] средняя задержка имеет высокие значения при низких интенсивностях входного потока, затем с ростом интенсивности она убывает и снова возрастает, когда система перестает быть стабильной. В отличие от средней задержки, средний возраст информации не является монотонно возрастающей функцией от интенсивности входного потока. Во многих системах, например в СМО с порядком обслуживания FCFS и в системах СМД с алгоритмом ALOHA, средний возраст информации убывает с ростом интенсивности входного потока на интервале малых значений и неограниченно возрастает, когда система перестает быть стабильной. В некоторых системах, например в системе M|M|1 с порядком обслуживания LCFS, средний возраст информации с ростом интенсивности входного потока монотонно убывает. Он продолжает уменьшаться даже в тот момент, когда система перестает быть стабильной. При этом, как и в случае со средней задержкой, при заданной интенсивности входного потока желательно, чтобы средний возраст информации был как можно меньше [14].

### Понятие среднего возраста информации в СМО и системах СМД

Рассмотрим понятие среднего возраста информации согласно [2]. Возраст информации  $\Delta(t)$  — функция от времени, значение которой увеличивается линейно и уменьшается в момент завершения обслуживания очередной заявки. Будем считать, что в начале работы системы  $\Delta(0) = 0$ . Обозначим через  $T_{in}^i$  время появления в системе заявки от устройства  $i$ , а через  $T_{out}^i$  — время завершения обслуживания заявки от устройства  $i$ . Тогда в момент времени  $T_{out}^i$  возраст информации  $\Delta(T_{out}^i)$  уменьшится на величину, равную  $T_{in}^i - T_{in}^{i-1}$ .

Обозначим через  $T$  время наблюдения за работой системы. Тогда средний возраст информации  $\bar{\Delta}_T$  на интервале наблюдения  $[0, T]$  определяется как отношение площади под графиком функции  $\Delta(t)$  к интервалу времени работы системы  $T$  [2]:

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta(t) dt.$$

Средний возраст информации  $\bar{\Delta}_T$  на полубесконечном интервале наблюдения  $[0, +\infty)$  определяется следующим образом:

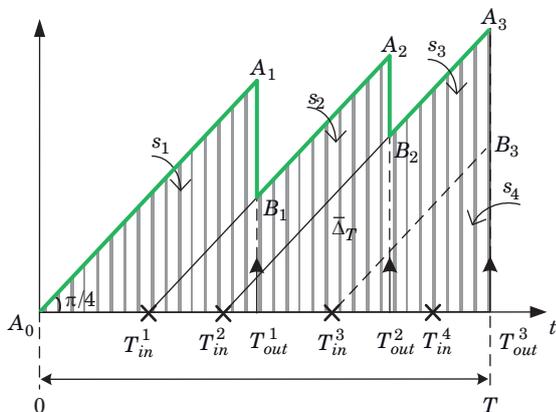
$$\bar{\Delta} = \lim_{T \rightarrow \infty} \bar{\Delta}_T. \quad (1)$$

Рассмотрим СМО с порядком обслуживания FCFS и случайным временем обслуживания. Пример работы такой системы представлен на рис. 1. Предположим, что за работой системы наблюдают в течение периода времени  $T$ . Будем считать, что в начальный момент времени в системе нет ни одной заявки. Пусть за период наблюдения в системе были обслужены три заявки. На рис. 1 показано, как будет меняться возраст информации в такой системе на интервале от 0 до  $T$ . Функция  $\Delta(t)$  будет иметь пилообразный вид.

В данном примере средний возраст информации на интервале от 0 до  $T$  — отношение площади заштрихованной области к длине интервала наблюдения  $T$ . Покажем, как можно вычислить средний возраст информации, используя данные о моментах поступления заявок в систему и моментах окончания обслуживания. Обозначим через  $s_1$  площадь трапеции  $A_0A_1B_1T_{in}^1$ , через  $s_2$  — площадь трапеции  $T_{in}^1A_2B_2T_{in}^2$ , через  $s_3$  — площадь трапеции  $T_{in}^2A_3B_3T_{in}^3$ , а через  $s_4$  — площадь треугольника  $T_{in}^3B_3T_{out}^3$ . Тогда средний возраст информации на интервале от 0 до  $T$  в данном примере можно вычислить следующим образом:

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{T}(s_1 + s_2 + s_3 + s_4). \quad (2)$$

Найдем площади каждой из этих фигур отдельно. Площадь трапеции  $A_0A_1B_1T_{in}^1$  можно вычислить как разность площадей двух тре-



■ **Рис. 1.** Типовой вид зависимости возраста информации от времени  
 ■ **Fig. 1.** Typical view of the dependence of the age of information on time

угольников  $A_0A_1T_{out}^3$  и  $T_{in}^1B_1T_{out}^1$ . Данные треугольники являются прямоугольными и равнобедренными. Следовательно, площадь трапеции  $A_0A_1B_1T_{in}^1$  будет равна

$$s_1 = \frac{1}{2}(T_{out}^1)^2 - \frac{1}{2}(T_{out}^1 - T_{in}^1)^2. \quad (3)$$

Площади трапеций  $T_{in}^1A_2B_2T_{in}^2$  и  $T_{in}^2A_3B_3T_{in}^3$  вычисляются аналогично:

$$s_i = \frac{1}{2}(T_{out}^i - T_{in}^{i-1})^2 - \frac{1}{2}(T_{out}^i - T_{in}^i)^2, \quad (4)$$

где  $i \in \{2, 3\}$ .

Площадь треугольника  $T_{in}^3B_3T_{out}^3$  можно вычислить по формуле

$$s_4 = \frac{1}{2}(T_{out}^3 - T_{in}^3)^2. \quad (5)$$

Подставив (3), (4) и (5) в выражение (2), получим

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{2T} \left( (T_{out}^1)^2 - (T_{out}^1 - T_{in}^1)^2 + (T_{out}^2 - T_{in}^1)^2 - (T_{out}^2 - T_{in}^2)^2 + (T_{out}^3 - T_{in}^2)^2 \right). \quad (6)$$

По аналогии с рассмотренным выше примером можно получить выражение для среднего возраста информации в общем виде. Обозначим через  $n$  число заявок в системе, которые были обслужены за время  $T$  от начала работы системы. Тогда средний возраст информации в этой системе можно вычислить по следующей формуле:

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{T} \left( s_1 + \sum_{i=2}^n s_i + \tilde{s} \right). \quad (7)$$

Здесь  $\tilde{s}$  — площадь треугольника, вычисляемая как

$$\tilde{s} = \frac{1}{2}(T_{out}^n - T_{in}^n)^2. \quad (8)$$

Подставив (3), (4) и (8) в выражение (7), получим

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{2T} \left( (T_{out}^1)^2 - (T_{out}^1 - T_{in}^1)^2 + \sum_{i=2}^n \left( (T_{out}^i - T_{in}^{i-1})^2 - (T_{out}^i - T_{in}^i)^2 \right) + (T_{out}^n - T_{in}^n)^2 \right). \quad (9)$$

Используя выражение (9), можно по результатам имитационного эксперимента вычислить значение  $\bar{\Delta}_T$ . В работе [2] показано, как на осно-

ве (9) для системы M|M|1 можно получить явное выражение зависимости среднего возраста информации от интенсивности входного потока  $\lambda$  и интенсивности обслуживания  $\mu$ :

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{\mu} \left( 1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1-\rho} \right),$$

где  $\rho = \lambda/\mu$ . В работах [7–9] рассматриваются способы вычисления среднего возраста информации и для других СМО.

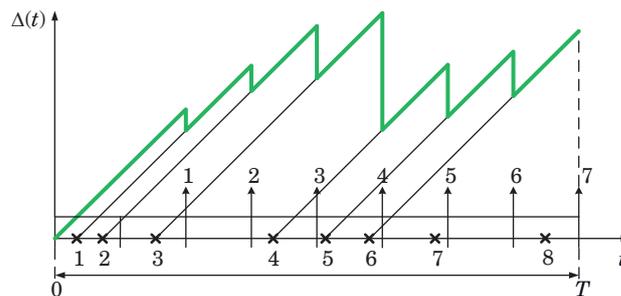
Рассмотрим систему M|D|1, которая является одной из простейших СМО с порядком обслуживания FCFS и постоянным временем обслуживания. Предположим, что время работы системы разделено на интервалы одинаковой длины – окна. Длительность одного окна равна времени обслуживания одной заявки. Для упрощения анализа системы будем считать, что это время равняется единице. Будем предполагать, что обслуживание заявки может начаться только в начале окна. Назовем эту систему синхронной системой M|D|1. Наибольший интерес представляет синхронная система M|D|1, так как в дальнейшем мы будем сравнивать с ней более сложные синхронные системы.

Средний возраст информации на интервале от 0 до  $T$  для этой системы можно оценить с помощью имитационного моделирования, используя выражение (9). Моделирование синхронной системы M|D|1 можно организовать следующим образом.

1. Задать параметры системы: время работы системы  $T$ , измеряемое в окнах; интенсивность появления заявок в системе  $\lambda$ .
2. Сгенерировать для каждой заявки время ее появления в системе в соответствии с пуассоновским потоком интенсивности  $\lambda$ . Вычислить количество заявок, появившихся в системе за  $T$  окон.
3. Найти для каждой заявки время ее обслуживания в соответствии с порядком обслуживания FCFS. Вычислить количество заявок, обслуженных в системе за  $T$  окон.
4. Оценить средний возраст информации на интервале от 0 до  $T$ , используя выражение (9).

Пример изменения возраста информации в синхронной системе M|D|1 на интервале от 0 до  $T$  приведен на рис. 2. В данной системе возраст информации может уменьшиться только в конце окна, так как система является синхронной.

В отличие от системы M|D|1, в системе с алгоритмом ALOHA могут возникать конфликты. Конфликты нарушают порядок обслуживания и делают его случайным процессом. При вычислении среднего возраста информации в таких системах принято учитывать только те сообщения, которые покинули систему не позже появившихся после них сообщений [14]. Другими словами, если сообщение  $i$  покинуло систему позже со-



■ **Рис. 2.** Пример изменения возраста информации в синхронной системе M|D|1

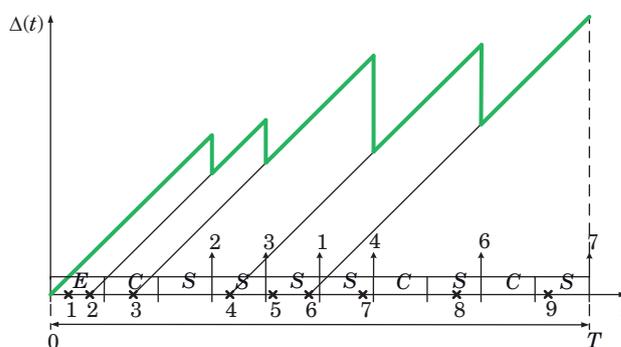
■ **Fig. 2.** An example of changing the age of information in the synchronous system M|D|1

общения  $j$  и  $j > i$ , то информация в нем считается неактуальной и средний возраст информации продолжает расти. Пример изменения возраста информации в системе с алгоритмом ALOHA на интервале от 0 до  $T$  представлен на рис. 3.

Для алгоритма ALOHA существенно сложнее, чем для СМО из работ [2, 7–9], получить явную зависимость среднего возраста информации от интенсивности входного потока. В работе [14] получены только оценки среднего возраста информации для алгоритма ALOHA.

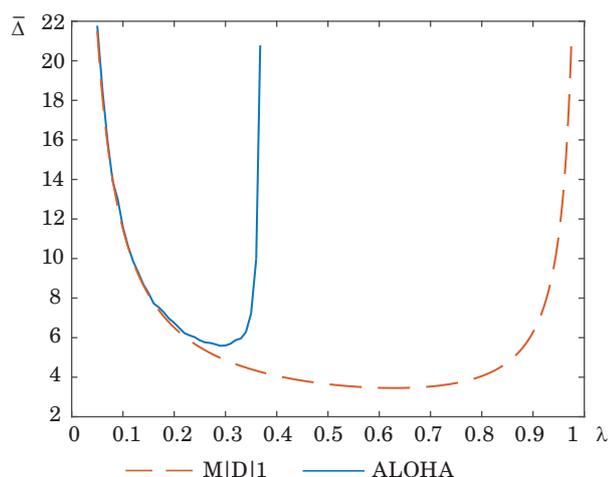
При большом числе окон имитационное моделирование позволяет получить оценку среднего возраста информации (1) с любой заданной точностью. На рис. 4 показаны зависимости среднего возраста информации от интенсивности входного потока для синхронной системы M|D|1 и системы с алгоритмом ALOHA. Данные зависимости получены с помощью имитационного моделирования при  $T = 100\,000$ .

Вопросы стабильности СМО и систем СМД с неограниченным числом устройств исследуются давно [23, 24]. Под средней задержкой  $\bar{D}(\lambda)$  в таких системах понимается среднее время нахождения сообщения в системе при интенсивно-



■ **Рис. 3.** Пример изменения возраста информации в системе с алгоритмом ALOHA

■ **Fig. 3.** An example of changing the age of information in the ALOHA algorithm



■ **Рис. 4.** Средний возраст информации в системе M|D|1 и в системе с алгоритмом ALOHA

■ **Fig. 4.** Average age of information in the M|D|1 system and in the ALOHA algorithm

сти входного потока  $\lambda$ . Для каждой из этих систем известна критическая интенсивность входного потока  $\lambda_c$ , которая определяется следующим образом:  $\lambda_c \triangleq \sup\{\lambda : \bar{D}(\lambda) < \infty\}$ . Другими словами,  $\lambda_c$  — это интенсивность, до которой система работает устойчиво. Для системы M|D|1  $\lambda_c = 1$ , а для системы с алгоритмом ALOHA  $\lambda_c = e^{-1}$ . Средний возраст информации в обеих системах конечен на интервале  $(0, \lambda_c)$  и неограниченно возрастает на границах этого интервала. Для наглядности на рис. 4 зависимость  $\bar{\Delta}(\lambda)$  для системы M|D|1 приведена при  $\lambda$  в диапазоне от 0,05 до  $0,975 < 1$ , а для системы с алгоритмом ALOHA — в диапазоне от 0,05 до  $0,3678 < e^{-1}$ .

## Модель системы

Модель системы СМД с множественным выходом была впервые предложена в работе [5]. Доказано, что она работает стабильно при любой интенсивности входного потока [5]. В этой модели в качестве зоны действия базовой станции рассматривается поверхность сферы, что позволяет избежать краевых эффектов. Однако моделирование и анализ такой модели является сложной задачей. В работе [6] предложена упрощенная модель системы с множественным выходом. В качестве территории, на которой находятся устройства, в этой модели рассматривается окружность. При таком подходе также отсутствуют краевые эффекты, но становится проще моделировать и анализировать модель. Основные свойства системы при этом сохраняются. Поэтому в текущей работе будем рассматривать модель системы с множественным выходом из работы [6].

Опишем модель системы из работы [6] в виде набора допущений.

1. В системе имеется базовая станция. Зоной действия базовой станции считается окружность. Примем длину окружности за единицу.

2. Процесс появления устройств в системе описывается пространственным точечным пуассоновским процессом интенсивности  $\lambda$ . В момент появления устройство содержит единственное сообщение. После успешной передачи устройство покидает систему. В данной модели устройство и сообщение являются тождественными понятиями.

3. Время в системе разделено на окна одинакового размера. Считается, что устройства знают моменты разделения окон. Предполагается, что передача сообщения занимает одно окно и может осуществляться только в начале окна.

4. В окне может произойти одна из трех ситуаций: «успех» (передает одно устройство), «пусто» (ни одно устройство не передает) или «конфликт» (передают два или более устройств).

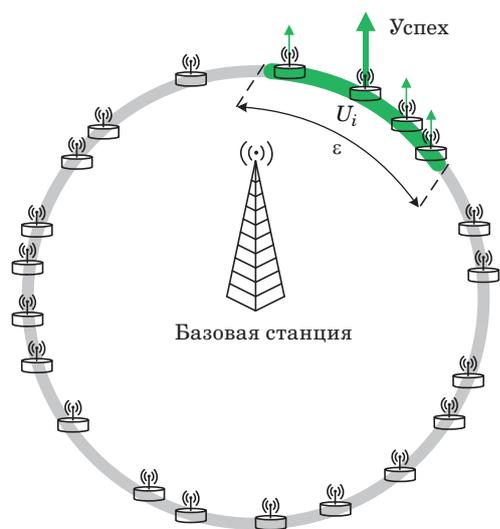
5. Предполагается, что в системе имеется обратная связь. В конце каждого окна базовая станция передает с помощью обратной связи всем устройствам информацию о событии в окне.

6. Все устройства, которые находятся в системе, являются активными. В начале каждого окна активные устройства с вероятностью  $p_t = 1/N_t$  принимают решение о передаче сообщения.  $N_t$  — число устройств в системе в начале окна  $t$ , которое известно всем устройствам.

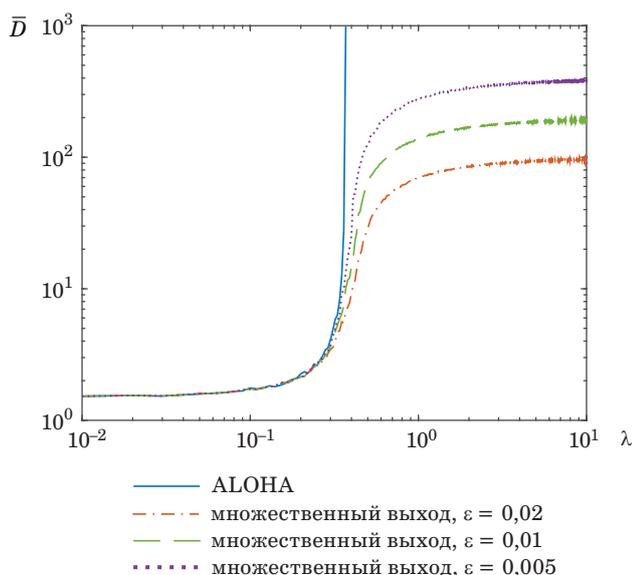
7. Количество устройств, покидающих систему, зависит от количества соседей устройства, у которого был «успех». Систему покидают устройства, находящиеся на расстоянии  $r$  от устройства, у которого был «успех». Через  $\varepsilon$  обозначим длину дуги окружности, равную  $2r$ .

В допущении 2 используется пространственный точечный пуассоновский процесс интенсивности  $\lambda$ . Это означает, что устройства появляются в системе в случайные моменты времени. Количество устройств, появившихся в одном окне, распределено по закону Пуассона с параметром  $\lambda$ . А устройства равномерно распределены по окружности. Модель данной системы представлена на рис. 5.

Зависимости средней задержки  $\bar{D}$  от интенсивности входного потока  $\lambda$  для системы с множественным выходом и системы с алгоритмом ALOHA (рис. 6) получены с помощью имитационного моделирования при  $T = 100\,000$ . Для системы с множественным выходом приведено три зависимости при разных значениях  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 0,005$ ,  $\varepsilon = 0,01$ ,  $\varepsilon = 0,02$ ). Полученные результаты иллюстрируют, что в системе с алгоритмом ALOHA задержка конечна при  $\lambda < e^{-1}$ , а в системе с мно-



■ **Рис. 5.** Модель системы с множественным выходом  
 ■ **Fig. 5.** Model of a system with multiple departure



■ **Рис. 6.** Средняя задержка в системе с множественным выходом (при различных значениях  $\epsilon$ ) и в системе с алгоритмом ALOHA  
 ■ **Fig. 6.** Average delay in the system with multiple departure (for different values of  $\epsilon$ ) and in the ALOHA algorithm

жественным выходом задержка конечна при любой интенсивности входного потока.

### Средний возраст информации для системы с множественным выходом

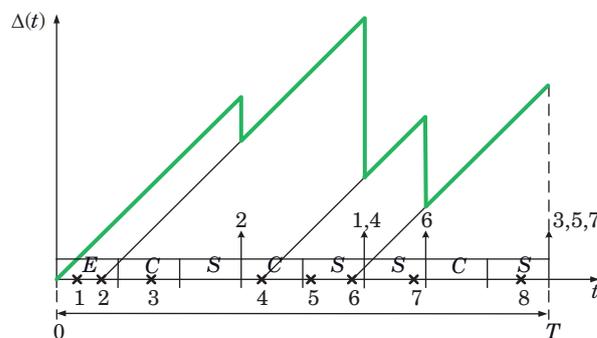
Как и в системе с алгоритмом ALOHA, при вычислении среднего возраста информации в системе с множественным выходом учитыва-

ются только те сообщения, которые покинули систему не позже появившихся после них сообщений. В отличие от системы с алгоритмом ALOHA, в системе с множественным выходом в случае успешной передачи сообщения систему могут покинуть несколько устройств одновременно. Тогда при вычислении среднего возраста информации учитывается только то сообщение, которое появилось в системе последним. На рис. 7 представлен пример изменения возраста информации для системы с множественным выходом на интервале от 0 до  $T$ .

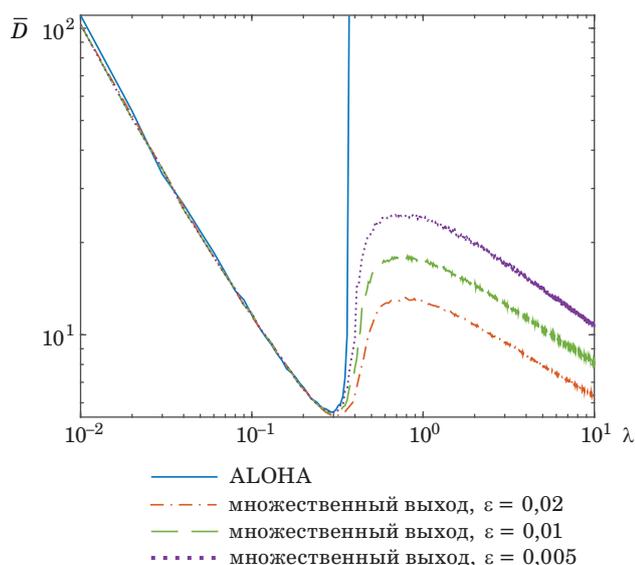
Зависимости среднего возраста информации от интенсивности входного потока для системы с множественным выходом при различных значениях параметра  $\epsilon$  и системы с алгоритмом ALOHA (рис. 8) получены с помощью имитационного моделирования при  $T = 100\,000$ . Результаты показали, что в этой системе средний возраст информации, как и средняя задержка, конечен для любой интенсивности входного потока. Однако в отличие от средней задержки средний возраст информации не является монотонно возрастающей функцией от интенсивности входного потока.

Зависимости средней задержки и среднего возраста информации для системы с множественным выходом при  $\epsilon = 0,01$  и для системы с алгоритмом ALOHA показаны на рис. 9. Полученные результаты иллюстрируют необычные эффекты поведения данных характеристик. Проанализируем их на качественном уровне.

В системе с алгоритмом ALOHA средняя задержка с ростом интенсивности возрастает из-за увеличения количества конфликтов. Средний возраст информации в системе с алгоритмом ALOHA при низких интенсивностях входного потока имеет высокие значения из-за редкого появления сообщений в системе. С ростом интенсивности время между сообщени-

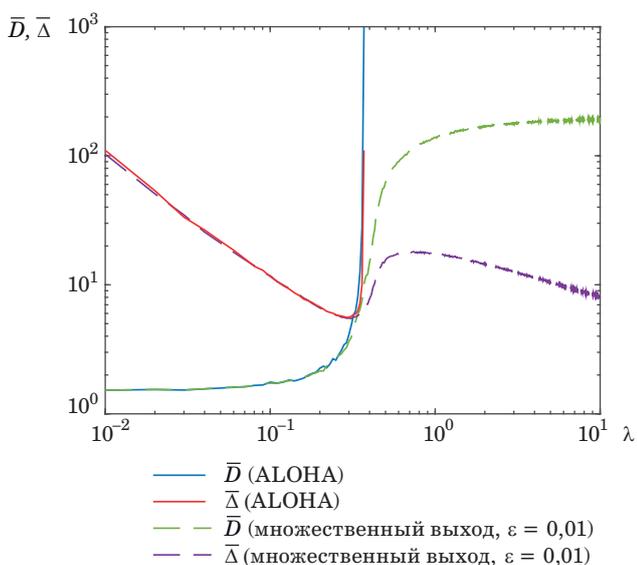


■ **Рис. 7.** Пример изменения возраста информации в системе с множественным выходом  
 ■ **Fig. 7.** An example of changing the age of information in the system with multiple departure



■ **Рис. 8.** Средний возраст информации в системе с множественным выходом (при различных значениях  $\varepsilon$ ) и в системе с алгоритмом ALOHA

■ **Fig. 8.** Average age of information in the system with multiple departure (for different values of  $\varepsilon$ ) and in the ALOHA algorithm



■ **Рис. 9.** Средняя задержка и средний возраст информации в системе с множественным выходом и в системе с алгоритмом ALOHA

■ **Fig. 9.** Average delay and average age of information in the system with multiple departure and in the ALOHA algorithm

ями в системе сокращается, так как сообщения в системе появляются чаще. Это приводит к уменьшению среднего возраста информации. При интенсивности входного потока, близкой к  $\lambda_c$ , нарушается прямой порядок выхода сообщений из системы. Сообщения, которые выш-

ли из системы не в свою очередь, учитываются при вычислении средней задержки и не учитываются при вычислении среднего возраста информации. Поэтому в данном случае средний возраст информации становится меньше средней задержки. При  $\lambda_c$  средняя задержка и средний возраст информации неограниченно возрастают, так как количество конфликтов становится слишком большим и сообщения прекращают выходить из системы.

В системе с множественным выходом при низких интенсивностях входного потока средняя задержка и средний возраст информации ведут себя так же, как и в системе с алгоритмом ALOHA. С ростом интенсивности средняя задержка сначала резко возрастает из-за увеличения количества конфликтов в системе, но потом практически стабилизируется (незначительно растет) из-за увеличения количества покидающих систему сообщений. Средний возраст информации с ростом интенсивности тоже резко возрастает, так как из-за большого числа конфликтов увеличивается промежуток между успешными передачами сообщений. Однако потом средний возраст информации убывает, так как увеличивается количество покидающих систему сообщений и сообщения чаще выходят из системы.

Таким образом, в обеих системах наблюдается интересный эффект: при низких интенсивностях входного потока средняя задержка меньше среднего возраста информации, а при высоких — больше.

### Заключение

В данной работе была рассмотрена модель системы со случайным доступом и множественным выходом из работы [6], которая стабильна при любой интенсивности входного потока и потенциально неограниченном числе устройств в системе. Впервые предложен способ оценки среднего возраста информации для рассматриваемой системы и исследована зависимость среднего возраста информации от интенсивности входного потока. Показано, что средний возраст информации в системе с множественным выходом конечен при любой интенсивности входного потока, отличной от нуля.

В настоящее время такая характеристика, как средний возраст информации, начинает широко применяться для количественной оценки актуальности информации в системах передачи данных. С учетом этого результаты работы могут быть использованы при исследовании различных сценариев применения IoT, в которых важны вопросы стабильной работы системы при большом числе устройств.

В работе для исследования зависимости среднего возраста информации от интенсивности входного потока использовалось имитационное моделирование. Цель дальнейших исследований – детальное изучение случайных процессов, описывающих систему с множественным выходом, и получение значений для оценок среднего возраста информации без использования имитационного моделирования.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов».

### Литература

1. **Ding J., Nemati M., Ranaweera C., and Choi J.** IoT connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 67646–67673. doi:10.1109/ACCESS.2020.2985932
2. **Kaul S., Yates R., and Gruteser M.** Real-time status: How often should one update? *2012 Proc. IEEE INFOCOM*, IEEE, 2012, pp. 2731–2735. doi:10.1109/INFOCOM.2012.6195689
3. **Abd-Elmagid M. A., Pappas N., and Dhillon H. S.** On the role of age of information in the Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 2019, vol. 57(12), pp. 72–77. doi:10.1109/MCOM.001.1900041
4. **Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V.** The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF48837.2020.9131517
5. **Foss S., Turlikov A., and Grankin M.** Spatial random multiple access with multiple departure. *IEEE Intern. Symp. on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2017, pp. 2728–2731. doi:10.1109/ISIT.2017.8007025
6. **Borisovskaya A., Glebov A., and Turlikov A.** Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure. *2021 XVII Intern. Symp. "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY)*, IEEE, 2021, pp. 28–33. doi:10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606453
7. **Kosta A., Pappas N., and Angelakis V.** Age of information: A new concept, metric, and tool. *Foundations and Trends® in Networking*, 2017, vol. 12(3), pp. 162–259. doi:10.1561/13000000060
8. **Sun Y., Kadota I., Talak R., and Modiano E.** Age of information: A new metric for information freshness. *Synthesis Lectures on Communication Networks*, 2019, vol. 12(2), pp. 1–224.
9. **Yates R. D., Sun Y., Brown D. R., Kaul S. K., Modiano E., and Ulukus S.** Age of information: An introduction and survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, vol. 39(5), pp. 1183–1210. doi:10.1109/JSAC.2021.3065072
10. **Inoue Y., Masuyama H., Takine T., and Tanaka T.** A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65(12), pp. 8305–8324. doi:10.1109/TIT.2019.2938171
11. **Yates R. D., and Kaul S. K.** The age of information: Real-time status updating by multiple sources. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65(3), pp. 1807–1827. doi:10.1109/TIT.2018.2871079
12. **Burkov A. A.** Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems. *Информационно-управляющие системы*, 2021, № 5, с. 51–58. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-51-58
13. **Kim D., Georgiev G., and Markovskaya N.** A model of random multiple access in unlicensed spectrum systems. *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2022. doi:10.1109/WECONF55058.2022.9803810
14. **Chen X., Gatsis K., Hassani H., and Bidokhti S. S.** Age of information in random access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*. arXiv: 1912.01473v6, 2022.
15. **Pan H., Chan T. T., Li J., and Leung V. C.** Age of information with collision-resolution random access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, vol. 71(10), pp. 11295–11300. doi:10.1109/TVT.2022.3189399
16. **Feng J., Pan H., and Chan T. T.** Low-power random access for timely status update: Packet-based or connection-based? *arXiv preprint arXiv:2210.03962*, 2022.
17. **Munari A., and Frolov A.** Average age of information of irregular repetition slotted ALOHA. *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conf.*, IEEE, 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322355
18. **Chen H., Gu Y., and Liew S. C.** Age-of-information dependent random access for massive IoT networks. *IEEE INFOCOM 2020 – IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, IEEE, 2020, pp. 930–935. doi:10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162973
19. **Yates R. D., and Kaul S. K.** Age of information in uncoordinated unslotted updating. *IEEE Intern. Symp. on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2020, pp. 1759–1764. doi:10.1109/ISIT44484.2020.9174098
20. **Munari A.** Modern random access: An age of information perspective on irregular repetition slotted

ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, vol. 69(6), pp. 3572–3585. doi:10.1109/TCOMM.2021.3060429

21. De Jesus G. G. M., Rebelatto J. L., and Souza R. D. Age-of-information dependent random access in multiple-relay slotted ALOHA. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 112076–112085. doi:10.1109/ACCESS.2022.3216616

22. Чебунин М. Г., Фосс С. Г. О стабильности систем случайного множественного доступа с минимальной обратной связью. *Сибирские электронные ма-*

*тематические известия*, 2019, т. 16, с. 1805–1821. doi:10.33048/semi.2019.16.128

23. Цыбаков Б. С., Михайлов В. А. Свободный синхронный доступ пакетов в широкополосный канал с обратной связью. *Проблемы передачи информации*, 1978, т. 14, вып. 4, с. 32–59.

24. Capetanakis J. Tree algorithms for packet broadcast channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, vol. 25, iss. 5, pp. 505–515. doi:10.1109/TIT.1979.1056093

UDC 621.391

doi:10.31799/1684-8853-2023-1-51-60

EDN: UBBHKD

### Estimation of the average age of information in random access systems with multiple departure

A. V. Borisovskaya<sup>a</sup>, Assistant Professor, orcid.org/0000-0002-0561-4226

A. M. Turlikov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7132-094X, turlikov@k36.org

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** An important direction in the study of the Internet of Things is the analysis of random multiple access systems that can provide stable operation with a large number of devices. An urgent task within this direction is the study of the average age of information for such systems. **Purpose:** To study the average age of information in random access systems with multiple departure. **Results:** Using a model with random access and multiple departure proposed by S. G. Foss in 2017, we describe the scenario of the Internet of Things, in which all devices are at the same distance from the base. It should be noted that the above mentioned model, unlike other random multiple access systems, ensures stable operation of the system with a potentially unlimited number of devices. In this paper, for the first time in relation to this model, we propose a method for computing the average age of information by the sequence of moments when messages enter the system and the sequence of moments when messages leave the system. We study the dependence of the average age of information on the input stream intensity. The research results show that the average age of information in a system with multiple departure is finite for any nonzero input stream intensity. **Practical relevance:** The proposed method for computing the average age of information for a system with multiple departure allows to compare scenarios of Internet of Things systems by this indicator. It also allows to determine the feasibility of using systems with multiple departure, taking into account the specifics of the scenario under consideration. **Discussion:** In this paper, we consider a simplified model of random access system with multiple departure. However, the results obtained for this model can be generalized for more complex models.

**Keywords** – Internet of Things, average age of information, random multiple access, multiple departure.

**For citation:** Borisovskaya A. V., Turlikov A. M. Estimation of the average age of information in random access systems with multiple departure. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 1, pp. 51–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-1-51-60, EDN: UBBHKD

### Financial support

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-19-00305 “Spatio-temporal stochastic models of wireless networks with a large number of subscribers”.

### References

- Ding J., Nemati M., Ranaweera C., and Choi J. IoT connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 67646–67673. doi:10.1109/ACCESS.2020.2985932
- Kaul S., Yates R., and Gruteser M. Real-time status: How often should one update? *2012 Proc. IEEE INFOCOM*, IEEE, 2012, pp. 2731–2735. doi:10.1109/INFCOM.2012.6195689
- Abd-Elmagid M. A., Pappas N., and Dhillon H. S. On the role of age of information in the Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 2019, vol. 57(12), pp. 72–77. doi:10.1109/MCOM.001.1900041
- Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system. *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 1–4. doi:10.1109/WECONF48837.2020.9131517
- Foss S., Turlikov A., and Granin M. Spatial random multiple access with multiple departure. *IEEE Intern. Symp. on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2017, pp. 2728–2731. doi:10.1109/ISIT.2017.8007025
- Borisovskaya A., Glebov A., and Turlikov A. Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure. *2021 XVII Intern. Symp. “Problems of Redundancy in Information and Control Systems” (REDUNDANCY)*, IEEE, 2021, pp. 28–33. doi:10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606453
- Kosta A., Pappas N., and Angelakis V. Age of information: A new concept, metric, and tool. *Foundations and Trends® in Networking*, 2017, vol. 12(3), pp. 162–259. doi:10.1561/13000000060
- Sun Y., Kadota I., Talak R., and Modiano E. Age of information: A new metric for information freshness. *Synthesis Lectures on Communication Networks*, 2019, vol. 12(2), pp. 1–224.
- Yates R. D., Sun Y., Brown D. R., Kaul S. K., Modiano E., and Ulukus S. Age of information: An introduction and survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, vol. 39(5), pp. 1183–1210. doi:10.1109/JSAC.2021.3065072

10. Inoue Y., Masuyama H., Takine T., and Tanaka T. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65(12), pp. 8305–8324. doi:10.1109/TIT.2019.2938171
11. Yates R. D., and Kaul S. K. The age of information: Real-time status updating by multiple sources. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65(3), pp. 1807–1827. doi:10.1109/TIT.2018.2871079
12. Burkov A. A. Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2021, no. 5, pp. 51–58. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-51-58
13. Kim D., Georgiev G., and Markovskaya N. A model of random multiple access in unlicensed spectrum systems. *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2022. doi:10.1109/WECONF55058.2022.9803810
14. Chen X., Gatsis K., Hassani H., and Bidokhti S. S. Age of information in random access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*. arXiv: 1912.01473v6, 2022.
15. Pan H., Chan T. T., Li J., and Leung V. C. Age of information with collision-resolution random access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, vol. 71(10), pp. 11295–11300. doi:10.1109/TVT.2022.3189399
16. Feng J., Pan H., and Chan T. T. Low-power random access for timely status update: Packet-based or connection-based? *arXiv preprint arXiv:2210.03962*, 2022.
17. Munari A., and Frolov A. Average age of information of irregular repetition slotted ALOHA. *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conf.*, IEEE, 2020, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322355
18. Chen H., Gu Y., and Liew S. C. Age-of-information dependent random access for massive IoT networks. *IEEE INFOCOM 2020 – IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, IEEE, 2020, pp. 930–935. doi:10.1109/INFOCOMWKSHP50562.2020.9162973
19. Yates R. D., and Kaul S. K. Age of information in uncoordinated unslotted updating. *IEEE Intern. Symp. on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2020, pp. 1759–1764. doi:10.1109/ISIT44484.2020.9174098
20. Munari A. Modern random access: An age of information perspective on irregular repetition slotted ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, vol. 69(6), pp. 3572–3585. doi:10.1109/TCOMM.2021.3060429
21. De Jesus G. G. M., Rebelatto J. L., and Souza R. D. Age-of-information dependent random access in multiple-relay slotted ALOHA. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 112076–112085. doi:10.1109/ACCESS.2022.3216616
22. Chebunin M. G., and Foss S. G. On stability of multiple access systems with minimal feedback. *Sibirskie Elektronnye Matematicheskie Izvestiya* [Siberian Electronic Mathematical Reports], 2019, vol. 16, pp. 1805–1821 (In Russian). doi:10.33048/semi.2019.16.128
23. Tsybakov B. S., and Mikhailov V. A. Free synchronous packet access in a broadcast channel with feedback. *Problems of Information Transmission*, 1978, vol. 14, iss. 4, pp. 259–280 (In Russian).
24. Capetanakis J. Tree algorithms for packet broadcast channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, vol. 25, iss. 5, pp. 505–515. doi:10.1109/TIT.1979.1056093

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*