

АКТУАЛЬНОСТЬ АНАЛИЗА ВОЗРАСТА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ С ДИСКРЕТНЫМ ВРЕМЕНЕМ

Е.А. Жбанкова

Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (РУДН)
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
E-mail: zhbankova-ea@rudn.ru

Е.В. Маркова

Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (РУДН)
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
E-mail: markova-ev@rudn.ru

Ю.В. Гайдамака

Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (РУДН)
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)*
Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, 44-2
E-mail: gaydamaka-yuv@rudn.ru

Ключевые слова: 5G, возраст информации, AoI, теория массового обслуживания, URLLC, mMTC, качество обслуживания.

Аннотация: Одним из сценариев использования сетей новых поколений (5G/6G) является доставка данных о состоянии удаленных систем в центр управления. Это актуально как для услуг массовой межмашинной связи (Massive Machine-Type Communications, mMTC), так и для услуг сверхнадежной связи с малой задержкой (Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC), которые предоставляются в сетях новых поколений. В настоящее время в научном сообществе активно изучается термин «возраст информации» (Age of Information, AoI), отражающий своевременность приема обновлений получателем и, соответственно, актуальность полученной информации. AoI является показателем эффективности работы системы, тесно связанным с теорией массового обслуживания, и требует тщательного анализа. В работе представлен аналитический обзор литературы, позволяющий выявить пробелы в исследованиях в данной области, показать на каком этапе находится изучение характеристики и какие задачи являются актуальными.

1. Введение

Стремительный рост приложений Интернета вещей (Internet of Things, IoT) привел к появлению технологий, поддерживающих обмен небольшими объемами данных. В зависимости от ограничений по задержке и требований к надежности приложений [1] эти технологии подразделяются на массовую межмашинную связь (Massive Machine-Type Communications, mMTC) и сверхнадежную связь с малой задержкой (Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC) [2, 3]. Ожидается, что обе услуги будут поддерживаться в сетях 5G, поскольку недавно стандартизированный интерфейс New Radio (NR) включает в себя различные расширенные возможности уровня канала, такие

как гибкая структура кадра, различные рабочие диапазоны, разделение сети для изоляции трафика и т.д. Однако, качество предоставления mMTC и URLLC услуг через радиointерфейс 5G NR мало изучено в научной литературе.

Одним из основных сценариев использования mMTC и URLLC приложений является обмен статусом работающего оборудования между конечными устройствами (КУ) или между КУ и центром управления (ЦУ) [4, 5]. Такой вариант использования находит применение во многих критически важных областях, таких как телемедицина, управление производственными линиями в промышленных условиях, автомобильные сети, системы видеонаблюдения, энергосети. Основным показателем, представляющим интерес для таких сервисов, является своевременность обновлений удаленной системы, доступных получателю.

Как правило, исследователи оценивают качество предоставления услуг с ограниченным временем при помощи показателя задержки. Однако, данный показатель зависит от количества трафика в сети, которое, в свою очередь, является функцией времени между поступлениями обновлений на источники. В связи с этим была предложена новая мера оценивания своевременности обновлений – так называемый возраст информации (Age of Information, AoI) [6]. AoI количественно определяет насколько актуальна полученная приемником информация по отношению к последнему обновлению, созданному на источнике. Характеристика является явной функцией времени между поступлениями обновлений и предполагает, что только своевременно полученные обновления могут отражать текущее состояние системы. AoI позволяет подробно описать поведение URLLC услуг, предоставляемых в системах 5G NR, и может рассматриваться как новая мера качества обслуживания (Quality of Service, QoS).

Несмотря на высокий интерес к AoI, с практической точки зрения рассмотренные модели систем массового обслуживания (СМО), как правило, не отражают специфику процесса обслуживания среды передачи, где пакеты могут поступать группами, в одном кадре может быть обслужено более одного пакета, дисциплина обслуживания может зависеть от состояний каналов пользователей, услуга может предоставляться в несколько этапов (например, произвольный доступ с последующей передачей данных). Таким образом, на данный момент существует большой разрыв между теоретическими исследованиями и практическим применением моделей, разработанных для оценки AoI. Целью данной работы является введение определения понятия возраста информации, проведение аналитического обзора литературы, отражающего пробелы в знаниях и разрыв между теоретическими и практическими исследованиями, а также постановка задачи дальнейших исследований.

2. Существующие исследования

Понятие AoI было введено в 2011 году в работе [6] для количественной оценки актуальности существующих знаний о состоянии удаленной системы. AoI определяется как время, прошедшее у получателя с момента формирования последнего успешно полученного пакета, содержащего информацию о состоянии исходной системы. Первая серия исследований характеристики AoI была проведена в 2012 году. В отличие от задержки, AoI обладает интересным свойством: в СМО с дисциплиной обслуживания «первым пришел, первым обслужен» (First-Come, First-Served, FCFS) увеличивается как при низкой, так и при высокой скорости генерации пакетов.

AoI был предложен в качестве показателя, который количественно определяет новизну обновлений информации в системе связи, в связи с этим в данном направлении проводятся активные исследования. В частности, в [7] авторским коллективом был проведен анализ AoI для систем GI/GI/1/1 и GI/GI/1/2 с механизмом обслуживания без

вытеснения заявок и при помощи компьютерного моделирования рассчитаны верхние границы значений AoI. Также были проанализированы СМО с одним источником и одним получателем, в качестве результата были получены аналитические выражения для расчета пикового возраста информации (Peak Age of Information, PAoI) – максимального значения AoI, измеренного непосредственно перед получением обновления, – в системах D/GI/1/1 и M/GI/1/1.

Обзор литературы показал, что в некоторых работах проведено исследование среднего AoI для систем массового обслуживания M/M/1, M/D/1 и D/M/1 с дисциплиной FCFS [8], были получены формулы для расчета характеристики, а также показано, что наименьшее значение среднего AoI в системах с дисциплиной обслуживания FCFS достигается, если новый пакет генерируется ровно тогда, когда завершается обслуживание предыдущего пакета. В других исследованиях [9,10] рассмотрены СМО с одним или несколькими независимыми источниками, которые могут сбрасывать некоторые из сгенерированных пакетов для улучшения значения показателя AoI. Авторы рассмотрели системы с пуассоновскими поступлениями, дисциплиной обслуживания FCFS и экспоненциально распределенным временем обслуживания, а также с двумя политиками сбрасывания пакетов, моделируемые с помощью СМО M/M/1/1 и M/M/1/2.

Важным свойством систем обновления статуса является отсутствие памяти у наблюдаемого случайного процесса. Если полученные данные обладают этим свойством, то важно только последнее обновление и получателю не требуется вести историю обновлений. Этот аспект является особенно важным для приложений, работающих со срочной информацией. Следовательно, если пакет поступает к получателю после того, как в источнике сгенерирован новый, он не содержит никакой полезной информации. В связи с этим возник интерес к системам с дисциплиной обслуживания «последним пришел, первым обслужен» (Last-Come, First-Served, LCFS), были проведены исследования, где новые обновления стали превосходить старые [11]. Идея исследования заключалась в использовании дисциплины обслуживания LCFS, при которой самые последние обновления имеют приоритет при передаче и заменяют обновления в очереди более новыми от того же источника. Такой механизм управления буфером позволил повысить производительность системы, с точки зрения показателя AoI.

Помимо исследований, связанных с теорией массового обслуживания, в настоящее время активно проводятся прикладные работы в области анализа AoI в различных системах. Например, в [12] авторы изучают данную характеристику в системах управления на основе Интернета вещей, работающих по беспроводному каналу. Значение показателя AoI имеет особую важность для URLLC услуг, которые предназначены для передачи информации об обновлении состояния и имеют строгие ограничения по надежности и задержке.

Однако, практических исследований по оценке AoI в системах 5G NR проведено довольно мало. Например, не рассмотрены системы с несколькими источниками и множественным доступом с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Кроме того, до сих пор не уделялось внимание такому важному свойству, как временная зависимость структуры поступающего трафика, проявляющаяся в отсеении поступающих пакетов из разных источников и часто наблюдающаяся в большом классе новых приложений «обновления состояния», сообщающих в ЦУ о состоянии удаленных систем. В частности, такое свойство типично для систем высокого и низкого напряжения (HV/LV) в интеллектуальных сетях или в промышленной автоматизации, когда неисправность на производственной линии приводит к отправке отчетов в ЦУ. Отсечение пакетов

существенно влияет на задержку доставки пакетов, однако, о его влиянии на показатель AoI ничего не известно.

Следует учитывать, что процесс обслуживания сотовых сетей отличается от проводных. Работая с использованием технологии OFDMA, системы LTE-M и NB-IoT используют интервал времени, в течение которого планировщик принимает решение о передаче данных от нескольких пользовательских устройств. Это приводит к необходимости исследования моделей с пакетным обслуживанием, которые до сих пор не рассматривались в исследованиях по оценке показателя AoI.

3. Заключение

В работе введено определение понятия «возраст информации», кратко описано текущее состояние исследований в данной области. Одним из основных выводов является то, что ни одно опубликованное на данный момент исследование не применимо к сотовым системам на основе OFDMA 5G, которые, как ожидается, станут основой для предоставления услуг mMTC и URLLC. Также следует отметить, что большинство предложенных на данный момент моделей не отражают специфику предоставления mMTC и URLLC услуг в современных сетях. Все это делает актуальной разработку новых моделей беспроводных сетей, которые позволят удовлетворить требования к AoI для различных типов услуг.

Для того, чтобы понять влияние значения AoI на эффективность различных СМО, необходимо охарактеризовать влияние временной зависимости структуры входящего трафика на производительность AoI в беспроводных сотовых системах. С этой целью в дальнейших исследованиях планируется смоделировать процесс обслуживания беспроводного канала, используя процесс пакетного обслуживания и автокорреляцию трафика с помощью марковского модулированного процесса с контролируемыми параметрами. Наибольший интерес для изучения представляет Discrete-time Batch Markovian Arrival Process (D-BMAP), который модулируется марковскими процессами с дискретным временем и дискретным пространством состояний. Частным случаем D-BMAP процесса является пуассоновский переключаемый процесс (Switched Poisson process, SPP), для анализа которого авторским коллективом будет построена модель сети, описанная в виде СМО с групповым обслуживанием и коррелированным потоком в дискретном времени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-79-10053, <https://rscf.ru/project/22-79-10053/>.

Список литературы

1. Series M. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface // Report. 2017. Vol. 2410, P. 2410-2017.
2. Zhang J., Kang K., Yang M., Zhu H., Qian H. Aoi-minimization in UAV-assisted IoT network with massive devices // 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2022. P. 1290-1295.
3. Gu J., Song C., Liao S., Li H., Liu M., Wu J. Generation rate control with AoI under traffic hole problem in vehicular networks // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. 2022. Vol. 3, No. 1.
4. Okano M. T. IoT and industry 4.0: the industrial new revolution // International Conference on Management and Information Systems. 2017. Vol. 25, P. 26.
5. Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Koucheryavy Y., Samouylov K. Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 9241-9256.
6. Kaul S., Gruteser M., Rai V., Kenney J. Minimizing age of information in vehicular networks // 2011 8th Annual IEEE communications society conference on sensor, mesh and ad hoc communications and networks. 2011. P. 350-358).

7. Yang H. H., Song M., Xu C., Wang X., Quek T. Q. Locally adaptive status updating for optimizing Age of Information in Poisson networks // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2023. Vol. MC-22, No. 12. P. 7343-7354.
8. Kaul S., Yates R., Gruteser M. Real-time status: How often should one update? // *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*. 2012. P. 2731-2735.
9. Costa M., Codreanu M., Ephremides A. Age of Information with packet management // *2014 IEEE International Symposium on Information Theory*. 2014. P. 1583-1587.
10. Costa M., Codreanu M., Ephremides A. On the Age of Information in status update systems with packet management // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2016. Vol. IT-62, No. 4. P. 1897-1910.
11. Kaul S. K., Yates R. D., Gruteser M. Status updates through queues // *2012 46th Annual conference on information sciences and systems (CISS)*. 2012. P. 1-6.
12. Mena J. P., Núñez F. Age of Information in IoT-based networked control systems: A MAC perspective // *Automatica*. 2023. Vol. 147. P. 110652.