

МОДЕЛИ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С ЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Борисовская Анна Владимировна,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия,
borisovskaya@k36.org

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-21-28

Manuscript received 28 May 2023;
Accepted 20 June 2023

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения помехозащищённых систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".

Ключевые слова: интернет вещей, сенсорные сети, зависимые источники, средний возраст информации, случайный множественный доступ

Одним из важных научных направлений исследований интернета вещей является анализ систем мониторинга случайных событий с зависимыми источниками, основанных на случайном множественном доступе. Учет зависимости данных от близкорасположенных сенсоров повышает энергоэффективность системы и обеспечивает стабильность её работы. Существуют различные модели таких систем, однако отсутствует связь между ними. Целью данной работы является разработка единой системы допущений для описания моделей систем со случайным доступом и зависимыми источниками. В данной работе описаны основные сценарии интернета вещей и выделен сценарий с большим числом сенсоров, на основе которого строятся системы мониторинга случайных событий. Проведен обзор работ, в которых исследуются системы со случайным доступом и зависимыми источниками. Предложен способ разделения существующих моделей на два класса: модели с появлением событий и модели с появлением абонентов. Предложена единая система допущений для моделей обоих классов, которая позволяет описывать и сравнивать различные модели между собой. Представлена упрощенная модель системы со случайным доступом и зависимыми источниками, которая сохраняет главные свойства систем интернета вещей. Эта модель легко поддается анализу и не имеет "краевых эффектов". Также приведен краткий обзор исследований среднего возраста информации в различных системах передачи данных. Результаты обзора показали, что эта характеристика является важной для систем с зависимыми источниками, но на данный момент практически не изучена в таких системах. Предложенная система допущений для описания различных моделей с зависимыми источниками и представленная упрощенная модель могут быть использованы для теоретического анализа систем мониторинга случайных событий.

Информация об авторе:

Борисовская Анна Владимировна, ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Борисовская А.В. Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 21-28.

For citation:

Borisovskaya A.V. (2023) Models of sensor networks with correlated sources. *T-Comm*, vol. 17, no.7, pp. 21-28. (in Russian)

Введение

С каждым годом количество сенсоров в системах мониторинга случайных событий растет, что ведет к возникновению такого количества конфликтов, при котором информация перестанет приходить на базовую станцию. В этом случае задержка поступления данных на базовую станцию будет бесконечной, то есть система начнет работать не стабильно. Кроме того, рост количества конфликтов приводит к увеличению числа повторных передач, что в свою очередь влияет на время работы источников питания сенсоров.

Таким образом, в сценариях с большим числом сенсоров, можно выделить две глобальные проблемы: стабильность и энергоэффективность. Для борьбы с высоким энергопотреблением сенсоров можно изменять мощность передачи. Но этот параметр часто бывает зафиксирован, поэтому влиять на энергопотребление сенсоров можно только с помощью уменьшения числа повторных передач. Для обеспечения стабильной работы системы необходимо уменьшать среднюю задержку. Этого можно добиться ограничением числа повторных передач или количества сенсоров в системе. Однако оба способа могут привести к потере данных. Поэтому как ограничение числа повторных передач, так и ограничение количества сенсоров в системе не подходят для полноценного улучшения качества работы таких систем.

В системах мониторинга случайных событий близкорасположенные сенсоры часто детектируют одни и те же события и, как следствие, отправляют полностью или частично совпадающую информацию на базовую станцию. В русскоязычной литературе устройства, которые передают похожие или одинаковые данные, называют зависимыми источниками, а в англоязычной литературе – «correlated sources». Учет зависимости данных от соседних сенсоров можно использовать для решения вышеизложенных проблем. На данный момент существуют различные модели систем со случайным доступом и зависимыми источниками, однако отсутствует связь между ними. Следовательно, разработка единой системы допущений для различных моделей таких систем является актуальной задачей.

Интернет вещей: сценарии и характеристики

Согласно предварительному национальному стандарту Российской Федерации «Информационные технологии. Интернет вещей. Термины и определения» Интернет вещей (Internet of Things – IoT) – «Инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на неё» (см. пункт 3.13 ПНСТ 518 – 2021). Вначале системы интернета вещей работали на основе радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identification – RFID), а сейчас они построены на различных беспроводных технологиях, таких как Bluetooth, Zigbee, WiFi, SigFox, LoRa, NB-IoT (в зависимости от зоны покрытия) [1]. Интернет вещей применяется в здравоохранении, промышленности, сельском хозяйстве, экологии, городском управлении, в системах «умного» дома и других сферах.

Эта концепция включает в себя различные сценарии. Международный союз электросвязи в документе «Рекомендации МСЭ-R M.2150-1».

Подробные спецификации наземных радиоинтерфейсов Международной подвижной электросвязи 2020 (IMT-2020)» приводит два сценария систем интернета вещей для сетей 5G: массовая межмашинная связь (massive Machine-Type Communication – mMTC) и сверхнадежная передача данных с малой задержкой (Ultra-Reliable Low Latency Communications – URLLC). А в сетях 6G выделяют три сценария [2]: повсеместную мобильную сверхширокополосную связь (ubiquitous Mobile Ultra-Broadband – uMUB), сверхвысокую плотность данных (ultra-High Data Density – uHDD) и связь со сверхвысокой скоростью и малой задержкой (ultra-High Speed and Low-Latency Communications – uHSLLC). Наиболее популярным в настоящее время является сценарий mMTC [3], включающий большое число сенсоров и не обладающий жесткими требованиями к задержке и надежности доставки данных на базовую станцию. Этот сценарий лежит в основе современных систем мониторинга случайных событий, построенных на сенсорных сетях.

В сценариях с большим числом сенсоров используются алгоритмы случайного множественного доступа для передачи данных на базовую станцию. Одним из таких алгоритмов является алгоритм ALOHA. Он применяется в технологии LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [4,5], на которой построено большинство современных систем мониторинга [6]. LoRaWAN обладает рядом преимуществ: предоставляет несколько частотных каналов для передачи данных, использует нелицензируемый частотный диапазон и позволяет передавать небольшие объемы данных на дальние расстояния.

Если в системе находится N сенсоров, то идентификатор сенсора будет занимать $\log_2 N$ бит. При большом числе сенсоров ($N \rightarrow \infty$) идентификатор сенсора нельзя отправить в сообщении, так как он будет занимать неограниченное число бит. В работах [7-9] рассматривается подход к решению данной проблемы, который называют Unsourced Random Access (U-RA). В системах мониторинга случайных событий не требуется однозначная идентификация сенсора, поэтому для идентификации сенсоров в таких системах можно использовать координаты его местоположения, как предложено в работе [10].

В теории случайного множественного доступа базовыми характеристиками работы систем являются: средняя задержка, среднее число успешных передач и среднее число повторных передач. Данные характеристики уже достаточно хорошо изучены для различных систем, в том числе и для систем интернета вещей. Однако ни одна из этих характеристик не несет в себе информации о свежести передаваемых данных. Сравнительно недавно была предложена характеристика, которая позволяет оценить актуальность данных о происходящих в системе изменениях. Она получила название – возраст информации (Age of Information – AoI) [11].

Данная характеристика достаточно хорошо исследована для систем массового обслуживания, но мало исследована для систем случайного множественного доступа, в том числе и систем интернета вещей. Средний возраст информации является важной характеристикой для систем мониторинга случайных событий, ведь в таких системах необходимо получать информацию о событиях вовремя [12].

Существующие модели сенсорных сетей с зависимыми источниками

В работах [13-21] рассматриваются централизованные сенсорные сети с большим числом устройств и зависимыми источниками. Предполагается, что системы содержат ограниченное количество сенсоров, которые расположены в зоне действия общего центра сбора информации. В случайные моменты времени в системах происходят изменения условий окружающей обстановки (повышение уровня вредных веществ, повышение температуры воздуха и т.п.), которые в работах [13-21] называют случайными событиями. Считается, что сенсор способен обнаружить событие, если оно произошло недалеко от него.

Сенсоры передают данные на общий центр только в том случае, если обнаружили событие. Для передачи данных от сенсоров на общий центр используется алгоритм случайного множественного доступа АЛОХА или его модификации. В большинстве работ рассматриваются вопросы улучшения пропускной способности канала и повышения энергоэффективности сети. Предлагаются различные методы декодирования данных от близкорасположенных сенсоров, а также способы распределения ресурсов канала с учетом корреляции данных от соседних устройств.

В работе [13] рассматривается модель сети с алгоритмом случайного доступа многоканальная АЛОХА и предлагается адаптивный способ передачи данных, основанный на распределенном кодировании сигналов зависимых источников. Данный подход позволяет сократить общее время передачи данных и тем самым повысить энергоэффективность сети.

В работе [14] предлагается способ распределенной оценки целевого сигнала в сенсорных сетях на основе алгоритма АЛОХА с учетом корреляции данных от соседних сенсоров. Вероятность доступа к общему каналу связи в модифицированном алгоритме зависит от локальной оценки наблюдений сенсора, которая вычисляется как среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error – MSE). Предложенная схема передачи данных позволяет улучшить выполнение распределенной оценки целевого сигнала. Также рассматривается обобщенная схема передачи данных с несколькими подканалами, что равносильно алгоритму «многоканальная АЛОХА».

В работе [15] предлагаются алгоритмы распределения ресурсов канала с учетом зависимости данных от соседних сенсоров. Результаты, полученные в работе [15], показывают, что предложенные алгоритмы позволяют снизить вероятность конфликтов в системе и соответственно повысить пропускную способность канала. Работы [16,17] являются продолжением работы [15]. В этих работах рассматривается такая же модель только с расширениями. В обеих работах добавляется возможность декодирования сигналов от зависимых источников в случае конфликта. Декодирование сигналов осуществляется с применением технологии последовательного подавления помех (Successive Interference Cancellation – SIC). В отличие от работ [15,16], в работе [17] есть дополнительное расширение – повторные передачи. В работах [16,17] предлагаются стохастические алгоритмы распределения ресурсов канала для моделей с расширениями.

Модель сенсорной сети из работы [18] совмещает случайный доступ без идентификации источника и случайный доступ с зависимыми источниками. Для обоих типов доступа используется байесовский декодер на основе суперпозиции разреженных кодов (Sparse Superposition with Bayesian Detection). Анализируется взаимодействие двух типов доступа, а также проверяется их воздействие на характеристики системы.

В работе [19] изучается модель сенсорной сети с двумя видами передаваемых данных: обычными и аварийными. Такое разделение передаваемых данных позволяет увеличить вероятность декодирования аварийных сообщений, а также уменьшить вероятность их декодирования при ложных срабатываниях. Методы доступа, предложенные в [19], используют не только зависимость в активации сенсоров, но и в информационном наполнении данных.

В работах [20, 21] рассматривается модель, похожая на модель из работы [15]. В работе [20] исследуется среднее число успешно переданных сообщений об одном событии и предлагается способ определения оптимального числа сенсоров в системе. В работе [21] исследуется вероятность доставки информации о событии и предлагается аналитический способ вычисления этой характеристики.

Средний возраст информации для сенсорной сети с зависимыми источниками исследуется в работе [22]. Рассматривается два сценария: случайный доступ и доступ с разделением времени. В сценарии со случайным доступом модель описывается Марковской цепью и путем имитационного моделирования оценивается зависимость среднего возраста информации от количества соседей. Также в работе [22] рассматривается вопрос оптимизации политики передачи данных с целью экономии ресурсов на основе методов машинного обучения и с использованием среднего возраста информации.

В работе [23] рассматривается система с зависимыми источниками и исследуется характеристика, которую авторы работы называют ценностью информации (Value of Information – Vol). Эта характеристика включает в себя средний возраст сенсора, стоимость передачи данных от сенсора и средний возраст информации соседних с ним сенсоров. Для оценки этой характеристики предлагается две модели, которые можно описать Марковской цепью. С помощью имитационного моделирования и аналитического расчета получены зависимости ценности информации от вероятности передачи данных и от коэффициента стоимости.

Вопросы стабильности в работах [13-23] не рассматриваются, т.к. количество сенсоров в исследуемых системах конечно и повторные передачи отсутствуют. Однако существуют системы с зависимыми источниками и потенциально неограниченным числом сенсоров. Для таких систем необходимо исследовать вопросы стабильности. В работе [10] предлагается модель системы с зависимыми источниками и бесконечным числом сенсоров и приводится доказательство того, что она обеспечивает стабильную работу системы при любой интенсивности входного потока. Эта модель получила название – модель с множественным выходом. В данной модели абоненты покидают систему группами, поэтому даже при большой интенсивности входного потока задержка в системе остается конечной.

Модель с множественным выходом также рассматривается в работах [24,25]. В работе [24] исследуется средняя задержка, а в работе [25] – средний возраст информации.

В вышепересмотренных работах предложены различные модели систем со случайным доступом и зависимыми источниками, сохраняющие базовые особенности таких систем. Данные модели похожи и в то же время отличаются друг от друга. В настоящее время связь между существующими моделями отсутствует, т.к. они стали изучаться сравнительно недавно. В данной работе предлагается способ классификации и единая система допущений для описания моделей с зависимыми источниками.

Единая система допущений для моделей с зависимыми источниками

В системах случайного множественного доступа абонентские устройства называют абонентами, по этой причине устройства в системах интернета вещей, т.е. сенсоры, тоже будем называть абонентами. Событиями в системах интернета вещей называют различные изменения значений показателей экологической обстановки. Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками можно разделить на две группы: модели с появлением событий и модели с появлением абонентов. Данные группы моделей можно описать единой системой допущений.

Система допущений для моделей с появлением событий и моделей с появлением абонентов:

Допущение 1: В системе есть общий центр – базовая станция. Предполагается, что базовая станция может принимать данные от абонентов только в пределах некоторой области. Эта область называется зоной действия базовой станции.

Допущение 2: Время в системе разделено на окна – периоды времени одинаковой длины. Каждое окно содержит интервал для отправки данных, а также может включать интервалы для иных действий, например, для сбора информации об изменениях в системе. Как правило, интервал для отправки данных находится в начале окна. Все абоненты знают моменты разделения окон и отправляют данные только в выделенном для этого интервале, т.е. в начале окна.

Допущение 3: Считается, что система предоставляет K каналов для передачи данных. Все каналы разделены на окна одинаковым образом. В любом окне независимо от канала возможны три случая: никто из абонентов не передавал – «пусто»; передавал один абонент – «успех»; передавало несколько абонентов – «конфликт».

Допущение 4: В системе может существовать или отсутствовать обратная связь. Если в системе есть обратная связь, то в конце окна абоненты получают от базовой станции информацию о том, какой случай был в канале. В системе возможны два вида обратной связи: полная или частичная. При полной обратной связи базовая станция распознает три случая: успех, пусто и конфликт, а при частичной обратной связи – только два: успех или неуспех.

Допущение 5.1: Предполагается, что событие может быть обнаружено абонентом, находящимся в некоторой окрестности места появления события. Окрестность имеет форму круга радиуса r с центром в месте появления события. Абоненты, которые обнаружили событие переходят с активное

состояние и отправляют данные о событии на базовую станцию.

Допущение 5.2: Считается, что все абоненты, имеющиеся в системе, находятся в активном состоянии и готовы передавать данные на базовую станцию.

Допущение 6: Если в системе отсутствует обратная связь, абоненты, находящиеся в активном состоянии, передают данные на базовую станцию с вероятностью $p = 1$. Если в системе имеется обратная связь, то абоненты, находящиеся в активном состоянии, в начале каждого окна, согласно некоторому алгоритму, делают выбор: передавать данные в текущем окне или нет. Абоненты, которые собираются передавать в окне, определяют случайным образом один из K каналов для передачи данных.

Допущение 7.1: Число абонентов в системе ограничено и равняется N . Абоненты равномерно разбросаны внутри зоны действия базовой станции. Процесс возникновения случайных событий в зоне действия базовой станции задается пространственным точечным пуассоновским процессом с параметром λ .

Допущение 7.2: Процесс появления абонентов в зоне действия базовой станции задается пространственным точечным пуассоновским процессом с параметром λ . Считается, что при появлении абонента в системе, он уже имеет данные для передачи. Абонент выходит из системы после успешной передачи данных.

Допущение 8.1: Количество пакетов данных, выходящих из системы в одном окне, равняется количеству каналов, в которых был «успех».

Допущение 8.2: В одном окне выходят из системы: абонент, успешно передавший данные в этом окне, и абоненты, находящиеся на расстоянии не больше чем r от этого абонента.

В седьмом допущении говорится о пространственном точечном пуассоновском процессе с параметром λ . В англоязычной литературе он называется spatial Poisson point process. Строгое определение данного процесса дано в книге [45]. При использовании этого процесса в моделях сенсорных сетей временные промежутки между возникновениями событий/абонентов в системе имеют экспоненциальное распределение, а число событий/абонентов, возникших в одном окне на единице площади, имеет распределение Пуассона.

В большинстве моделей систем интернета вещей зона действия базовой станции представляет собой ограниченную часть плоскости, обычно являющуюся кругом или квадратом. В реальности зона действия базовой станции может быть круглой, если базовая станция находится на открытом пространстве, и квадратной, если базовая станция находится в городской среде. В таких моделях вероятность, что в радиусе r от сенсора возникнет событие, будет зависеть от положения сенсора относительно края зоны действия базовой станции. Такие проблемы называют «краевыми эффектами». «Краевые эффекты» усложняют имитационное моделирование и анализ моделей. Известны различные методы учета этих проблем. Например, в работах [14–16] для устранения «краевых эффектов» предлагается расширить область возникновения событий. Зоной действия базовой станции в этих работах является квадрат со стороной L , но предлагается генерировать события в квадрате со стороной $L+2r$.

Такой подход позволяет избавиться от «краевых эффектов», но увеличивает сложность анализа модели. В работе [10] рассматривается модель с появлением абонентов, в которой зона действия базовой станции является поверхностью сферы. Такая зона действия базовой станции позволяет избежать «краевых эффектов», но затрудняет анализ и имитационное моделирование модели.

Для исследования моделей с появлением событий и моделей с появлением абонентов можно использовать окружность в качестве зоны действия базовой станции. Во-первых, модель с окружностью отражает основные свойства систем интернета вещей. Во-вторых, эта модель, как и модель со сферой, не имеет «краевых эффектов», но, в отличие от модели со сферой, её легче моделировать и анализировать. На рисунке 1 представлены примеры моделей с окружностью: а – модель с появлением событий, б – модель с появлением абонентов. Впервые подобные модели рассматривались в работах [21, 24, 25].

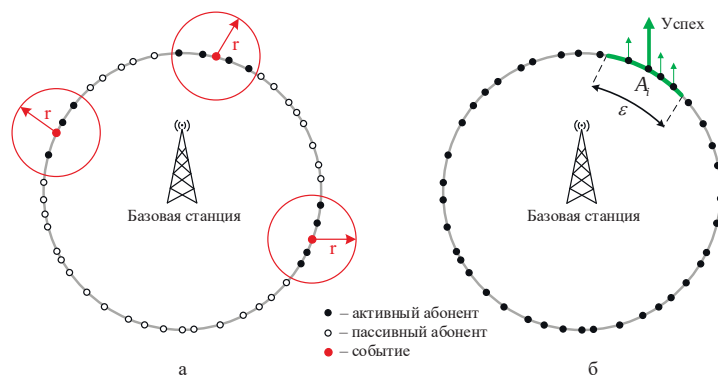


Рис. 1. Примеры моделей с окружностью: а – модель с появлением событий; б – модель с появлением абонентов

Средний возраст информации в сенсорных сетях с зависимыми источниками

В теории систем массового обслуживания возраст информации определяют, как функцию от времени, линейно возрастающую до момента окончания обслуживания очередной заявки и убывающую в момент, когда заявка покинула систему. Эту функцию обозначают следующим образом: $\Delta(t)$. Считается, что изначально $\Delta(0) = 0$. Допустим, что t_i и t_{i-1} – моменты возникновения заявок с номерами i и $i-1$, а l_i – момент окончания обслуживания заявки с номером i . В соответствии с этими обозначениями возраст информации в момент времени l_i снизится на $t_i - t_{i-1}$.

Средний возраст информации на интервале $[0, T]$ определяют, как отношение площади под графиком функции $\Delta(t)$ к времени наблюдения за системой T :

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

Средний возраст информации при $T \rightarrow \infty$ определяют следующим образом:

$$\bar{\Delta} = \lim_{T \rightarrow \infty} \bar{\Delta}_T.$$

В работах [11, 26-28] приведены способы вычисления среднего возраста информации для систем массового обслуживания $M|D|1$ и $M|M|1$ с прямым порядком обслуживания (First-Come-First-Served – FCFS) и получены замкнутые математические выражения следующего вида:

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

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

в которых λ – интенсивность возникновения заявок, μ – интенсивность обслуживания заявок, а $\rho = \lambda / \mu$. Заметим, что выражение среднего возраста информации для $M|D|1$ применимо только для асинхронной системы. Во многих современных системах передачи данных вводится синхронизация времени, поэтому больший интерес представляет получение выражения для синхронной системы $M|D|1$. Однако пока данный вопрос остается открытым.

Анализ среднего возраста информации в системах массового обслуживания с обратным порядком обслуживания (Last-Come-First-Served – LCFS) представлен в работах [29,30]. В работе [31] данная характеристика исследуется для систем массового обслуживания с несколькими очередями. Совсем недавно средний возраст информации начал исследоваться и для систем случайного множественного доступа [32-39], однако математические выражения этой характеристики для таких систем пока не получены.

В работах [22, 23, 25] средний возраст информации исследуется для сенсорных сетей со случайным доступом и зависимыми источниками. В работах [22, 23] рассматриваются модели с появлением событий, а в работе [25] – модель с появлением абонентов. В настоящее время проведено мало исследований в данной области и большинство результатов получено с помощью имитационного моделирования, поэтому задача исследования среднего возраста информации в таких системах по-прежнему является актуальной.

Заключение

В данной работе описаны основные сценарии и особенности систем интернета вещей. Определен сценарий с большим числом сенсоров, который является основой построения систем мониторинга случайных событий. Выполнен обзор работ, в которых рассматриваются системы случайного множественного доступа с зависимыми источниками. Предложен способ классификации и единая система допущений для моделей таких систем. Приведены примеры описания различных классов систем с зависимыми источниками упрощенной моделью, в которой зона действия базовой станции является окружностью.

Представленной моделью можно описывать как модели с появлением событий, так и модели с появлением абонентов. Преимуществами этой модели являются доступный анализ и простая реализация имитационного моделирования, а также отсутствие «краевых эффектов». Результаты, полученные для упрощенной модели, могут быть обобщены для более реалистичных моделей систем мониторинга случайных событий.

Таким образом, единая система допущений и упрощенная модель могут использоваться для теоретического анализа характеристик различных систем с зависимыми источниками.

Кроме того, в данной работе представлен обзор существующих исследований среднего возраста информации в различных системах связи, а точнее в системах массового обслуживания, в системах случайного множественного доступа и в системах с зависимыми источниками.

По результатам обзора выявлено, что эта характеристика является важной для систем с зависимыми источниками, но на данный момент практически не исследована в таких системах. Цель дальнейших исследований – получение теоретических значений или оценок среднего возраста информации для систем со случайным доступом и зависимыми источниками.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищённых систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Литература

1. Ding J., Nemati M., Ranaweera C., Choi J. IoT connectivity technologies and applications: A survey // *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 67646–67673. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932
2. Araniti G., Iera A., Pizzi S., Rinaldi F. Toward 6G non-terrestrial networks // *IEEE Network*, 2021, vol. 36(1), pp. 113–120. doi: 10.1109/MNET.011.2100191
3. Burkov A. A. Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems // *Information and Control Systems*, 2021, № 5 (114), pp. 51–58. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-51-58
4. Silva F. S. D., Neto E. P., Oliveira H., Rosario D., Cerqueira E., Both C., Zeadally S., Neto A. V. A Survey on Long-Range Wide-Area Network Technology Optimizations // *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106079–106106, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3079095
5. Kim D. K., Georgiev G. D., Markovskaya N. V. A Model of Random Multiple Access in Unlicensed Spectrum Systems // *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/WECONF55058.2022.9803810
6. Ragnoli M., Leoni A., Barile G., Ferri G., Stornelli V. LoRa-Based Wireless Sensors Network for Rockfall and Landslide Monitoring: A Case Study in Pantelleria Island with Portable LoRaWAN Access // *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2022, vol. 12, № 3, pp. 47. doi:10.3390/jlpea12030047
7. Kotaba R., Kalør A. E., Popovski P., Leyva-Mayorga I., Soret B., Guillaud M., Ordóñez L. G. How to Identify and Authenticate Users in Massive Unsourced Random Access // *IEEE Communications Letters*, 2021, vol. 25(12), pp. 3795–3799. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3118882
8. Polyanskiy Y. A perspective on massive random-access // *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2017, pp. 2523–2527. doi: 10.1109/ISIT.2017.8006984
9. Calderbank R., Thompson A. CHIRUP: a practical algorithm for unsourced multiple access // *Information and Inference: A Journal of the IMA*, 2020, vol. 9, №4, pp. 875–897. doi: 10.48550/arXiv.1811.00879
10. Foss S., Turlikov A., Grankin M. Spatial random multiple access with multiple departure // *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2017, pp. 2728–2731. doi:10.1109/ISIT.2017.8007025
11. Kaul S., Yates R., Gruteser M. Real-time status: How often should one update? // *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, IEEE, 2012, pp. 2731–2735. doi: 10.1109/INFOCOM.2012.6195689
12. Abd-Elmagid M. A., Pappas N., 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
13. Choi J. On Multichannel Random Access for Correlated Sources // *IEEE Transactions on Communications*, 2018, vol. 66, №8, pp. 3444–3454. doi: 10.1109/TCOMM.2018.2823318
14. Choi J. Local reliability aware random access for correlated sources in WSNs // *IEEE Transactions on Communications*, 2017, vol. 66, №3, pp. 1153–1163. doi: 10.1109/TCOMM.2017.2775226
15. Kalør A. E., Hanna O. A., Popovski P. Random access schemes in wireless systems with correlated user activity // *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445866
16. Zheng C., Egan M., Clavier L., Kalør A. E., Popovski P. Stochastic resource optimization of random access for transmitters with correlated activation // *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(9), 3055–3059. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3090110
17. Zheng C., Egan M., Clavier L., Kalør A. E., Popovski P. Stochastic Resource Allocation for Outage Minimization in Random Access with Correlated Activation // *In 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2022, pp. 1635–1640. doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771709
18. Agostini P., Utkovski Z., Stańczak S. Sparse Superposition Coding with Bayesian Detection for Correlated Unsourced Random Access // *2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2021, pp. 1470–1476. doi: 10.1109/IEEECONF53345.2021.9723293
19. Stern K., Kalør A. E., Soret B., Popovski P. Massive random access with common alarm messages // *In 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISIT.2019.8849678
20. Борисовская А. В., Тюрликов А. М. Методика определения числа сенсоров в системах мониторинга экологической обстановки с использованием LPWAN сетей // *Вопросы радиоэлектроники*, 2022, С. 93–100.
21. Борисовская А. В. Определение вероятности доставки информации о событии в системах мониторинга на основе сетей, построенных по технологии LoRaWAN // *Успехи современной радиоэлектроники*, 2022, Т. 76, № 12, С. 82–89. doi:10.18127/j20700784-202212-11
22. Zancanaro A., Cusotto G., Badia L. Tackling Age of Information in Access Policies for Sensing Ecosystems // *Sensors*, 2023, vol. 23, № 7, pp. 3456. doi: 10.3390/s23073456
23. Zancanaro A., Cusotto G., Badia L. Modeling value of information in remote sensing from correlated sources // *Computer Communications*, 2023, vol. 203, pp. 289–297. doi: 10.1109/NetComNet55087.2022.9810457
24. Borisovskaya A., Glebov A., Turlikov A. Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure // *2021 XVII International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY)*, IEEE, 2021, pp. 28–33. doi:10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606453
25. 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
26. Kosta A., Pappas N., 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
27. Sun Y., Kadota I., Talak R., Modiano E. Age of information: A new metric for information freshness // *Synthesis Lectures on Communication Networks*, 2019, vol. 12(2), pp. 1–224. doi: 10.1007/978-3-031-79293-9

28. Yates R. D., Sun Y., Brown D. R., Kaul S. K., Modiano E., 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
29. Inoue Y., Masuyama H., Takine T., 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
30. Kaul S. K., Yates R. D., Gruteser M. Status updates through queues // 2012 46th Annual conference on information sciences and systems (CISS), 2012, pp. 1-6. doi: 10.1109/CISS.2012.6310931
31. 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
32. Chen X., Gatsis K., Hassani H., Bidokhti S. S. Age of information in random access channels // *IEEE Transactions on Information Theory*, 2022, vol. 68, №10, pp. 6548-6568. doi: 10.1109/ISIT44484.2020.9174254
33. 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
34. 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.
35. Munari A., and Frolov A. Average age of information of irregular repetition slotted ALOHA // *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference*, IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322355
36. Chen H., Gu Y., and Liew S. C. Age-of-information dependent random access for massive IoT networks // *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, IEEE, 2020, pp. 930-935. doi: 10.1109/INFOCOM-WKSHPS50562.2020.9162973
37. Yates R. D., and Kaul S. K. Age of information in uncoordinated unscheduled updating // *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2020, pp. 1759-1764. doi: 10.1109/ISIT44484.2020.9174098
38. 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
39. 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

MODELS OF SENSOR NETWORKS WITH CORRELATED SOURCES

Anna V. Borisovskaya, State University of Aerospace Instrumentation, St-Petersburg, Russia, borisovskaya@k36.org

Abstract

One of the important scientific directions in the research of the Internet of things is the analysis of monitoring systems for random events with correlated sources based on random multiple access. Taking into account the correlation of data from nearby sensors increases the energy efficiency of the system and ensures the stability of its operation. There are various models of such systems, but there is no connection between them. The purpose of this paper is to develop a unified system of assumptions for describing models of systems with random access and correlated sources. In this paper, the main scenarios of the Internet of Things are described and a scenario with a large number of sensors is selected, on the basis of which systems for monitoring random events are built. A review of papers in which systems with random access and correlated sources are studied is carried out. A method for separating existing models into two classes is proposed: models with the arrival of events and models with the arrival of users. A unified system of assumptions for models of both classes is proposed, which allows describing and comparing different models with each other. A simplified model of a system with random access and dependent sources is presented, which retains the main properties of the Internet of things systems. This model is easy to analyze and has no "edge effects". A brief overview of the research on the average age of information in various data transmission systems is also given. The results of the review showed that this characteristic is important for systems with correlated sources, but at the moment it is practically not studied in such systems. The proposed system of assumptions for describing various models with correlated sources and the presented simplified model with a circle can be used in the theoretical analysis of monitoring systems for random events.

Keywords: Internet of Things; sensor networks; correlated sources; Age of Information; random multiple access.

References

1. J. Ding, M. Nemati, C. Ranaweera, J. Choi IoT connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 67646-67673. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932
2. G. Araniti, A. Iera, S. Pizzi, F. Rinaldi Toward 6G non-terrestrial networks. *IEEE Network*, 2021, vol. 36(1), pp. 113-120. doi: 10.1109/MNET.011.2100191
3. A. A. Burkov Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems. *Information and Control Systems*, 2021, no. 5 (114), pp. 51-58. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-51-58
4. F. S. D. Silva, E. P. Neto, H. Oliveira, D. Rosario, E. Cerqueira, C. Both, S. Zeadally, A. V. Neto A Survey on Long-Range Wide-Area Network Technology Optimizations. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106079-106106, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3079095

5. D. K. Kim, G. D. Georgiev, N. V. Markovskaya A Model of Random Multiple Access in Unlicensed Spectrum. 2022 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF55058.2022.9803810
6. M. Ragnoli, A. Leoni, G. Barile, G. Ferri, V. Stornelli LoRa-Based Wireless Sensors Network for Rockfall and Landslide Monitoring: A Case Study in Pantelleria Island with Portable LoRaWAN Access. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 47. doi:10.3390/jlpea12030047
7. R. Kotaba, A. E. Kalr, P. Popovski, I. Leyva-Mayorga, B. Soret, M. Guillaud, L. G. Ordonez How to Identify and Authenticate Users in Massive Unsourced Random Access. *IEEE Communications Letters*, 2021, vol. 25(12), pp. 3795-3799. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3118882
8. Y. Polyanskiy A perspective on massive random-access. 2017 *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2017, pp. 2523-2527. doi: 10.1109/ISIT.2017.8006984
9. R. Calderbank, A. Thompson CHIRUP: a practical algorithm for unsourced multiple access. *Information and Inference: A Journal of the IMA*, 2020, vol. 9, no.4, pp. 875-897. doi: 10.48550/arXiv.1811.00879
10. S. Foss, A. Turlikov, M. Grankin Spatial random multiple access with multiple departure. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2017, pp. 2728-2731. doi:10.1109/ISIT.2017.8007025
11. S. Kaul, R. Yates, M. Gruteser Real-time status: How often should one update? 2012 *Proceedings IEEE INFOCOM*, IEEE, 2012, pp. 2731-2735. doi: 10.1109/INF-COM.2012.6195689
12. M. A. Abd-Elmagid, N. Pappas, H. S. Dhillon 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
13. J. Choi On Multichannel Random Access for Correlated Sources. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, vol. 66, no.8, pp. 3444-3454. doi: 10.1109/TCOMM.2018.2823318
14. J. Choi Local reliability aware random access for correlated sources in WSNs. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, vol. 66, no.3, pp. 1153-1163. doi: 10.1109/TCOMM.2017.2775226
15. A. E. Kalor, O. A. Hanna, P. Popovski. Random access schemes in wireless systems with correlated user activity. 2018 *IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445866
16. C. Zheng, M. Egan, L. Clavier, A. E. Kalor, P. Popovski Stochastic resource optimization of random access for transmitters with correlated activation. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(9), pp. 3055-3059. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3090110
17. C. Zheng, M. Egan, Clavier, L., Kalr, A. E., Popovski, P. Stochastic Resource Allocation for Outage Minimization in Random Access with Correlated Activation. 2022 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2022, pp. 1635-1640. doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771709
18. P. Agostini, Z. Utkovski, S. Stanczak Sparse Superposition Coding with Bayesian Detection for Correlated Unsourced Random Access. 2021 *55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2021, pp. 1470-1476. doi: 10.1109/IEEECONF53345.2021.9723293
19. K. Stern, A. E. Kalor, B. Soret, P. Popovski Massive random access with common alarm messages. In 2019 *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ISIT.2019.8849678
20. A. V. Borisovskaya, A. M. Turlikov Methodology for determining the number of sensors in environmental monitoring systems using LPWAN networks. *Questions of Radioelectronics*, 2022, pp. 93-100.
21. A.V. Borisovskaya Event information delivery probability calculation in monitoring systems based on networks with LoRaWAN technology. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2022, vol. 76, no. 12, pp. 82-89. doi:10.18127/j20700784-202212-11
22. A. Zancanaro, G. Ciotto, L. Badia Tackling Age of Information in Access Policies for Sensing Ecosystems. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 7, pp. 3456. doi: 10.3390/s23073456
23. A. Zancanaro, G. Ciotto, L. Badia Modeling value of information in remote sensing from correlated sources. *Computer Communications*, 2023, vol. 203, pp. 289-297. doi: 10.1109/NetComNet55087.2022.9810457
24. A. Borisovskaya, A. Glebov, A. Turlikov Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure. 2021 *XVII International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY)*, IEEE, 2021, pp. 28-33. doi:10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606453
25. A. V. Borisovskaya, A. M. Turlikov Estimation of the average age of information in random access systems with multiple departure. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2023, no. 1, pp. 51-60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-1-51-60
26. A. Kosta, N. Pappas, V. Angelakis 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
27. Y. Sun, I. Kadota, R. Talak, E. Modiano Age of information: A new metric for information freshness. *Synthesis Lectures on Communication Networks*, 2019, vol. 12(2), pp. 1-224. doi: 10.1007/978-3-031-79293-9
28. R. D. Yates, Y. Sun, D. R. Brown, S. K. Kaul, E. Modiano, S. Ulukus Age of information: An introduction and survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, vol. 39(5), pp. 1183-1210. doi: 10.1109/JSA.2021.3065072
29. Y. Inoue, H. Masuyama, T. Takine, T. Tanaka 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
30. S. K. Kaul, R. D. Yates, M. Gruteser Status updates through queues. 2012 *46th Annual conference on information sciences and systems (CISS)*, 2012, pp. 1-6. doi: 10.1109/CISS.2012.6310931
31. R. D. Yates, S. K. Kaul 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
32. X. Chen, K. Gatsis, H. Hassani, S. S. Bidokhti Age of information in random access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2022, vol. 68, no.10, pp. 6548-6568. doi: 10.1109/ISIT44484.2020.9174254
33. H. Pan, T. T. Chan, J. Li, V. C. Leung 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
34. J. Feng, H. Pan, T. T. Chan Low-Power Random Access for Timely Status Update: Packet-based or Connection-based? arXiv preprint arXiv:2210.03962, 2022.
35. A. Munari, A. Frolov Average age of information of irregular repetition slotted ALOHA. *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference*, IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322355
36. H. Chen, Y. Gu, S. C. Liew Age-of-information dependent random access for massive IoT networks. *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, IEEE, 2020, pp. 930-935. doi: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162973
37. R. D. Yates, S. K. Kaul Age of information in uncoordinated unslotted updating. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2020, pp. 1759-1764. doi: 10.1109/ISIT44484.2020.9174098
38. A. Munari 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
39. G. G. M. De Jesus, J. L. Rebelatto, R. D. Souza 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

Information about author:

Borisovskaya Anna, Assistant of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, State University of Aerospace Instrumentation, St-Petersburg, Russia