

СЛОТОВЫЙ ALOHA С ИТЕРАЦИОННОЙ ПРОЦЕДУРОЙ РАЗРЕШЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ. СТАБИЛЬНОСТЬ И НЕСТАБИЛЬНОСТЬ

Н. В. Матвеев^а, ассистент, n.matveev@vu.spb.ru

А. М. Тюрликов^а, доктор техн. наук, профессор, turlikov@vu.spb.ru

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Постановка проблемы: в настоящее время в сотовых сетях нового поколения рассматриваются сценарии крупномасштабных систем межмашинной связи (Massive Machine Type Communication) и класс алгоритмов случайного множественного доступа слотовый ALOHA с итерационной процедурой разрешения коллизий (Coded Random Access). Алгоритмы этого класса позволяют поддерживать большое число устройств, но являются нестабильными. Нестабильность приводит к увеличению времени доставки сообщения от абонента до базовой станции в процессе работы крупномасштабных систем межмашинной связи. **Цель:** обоснование нестабильности класса алгоритмов слотового ALOHA с итерационной процедурой разрешения коллизий при любой интенсивности входного потока; предложение метода его стабилизации; определение интенсивности, до которой система будет стабильна. **Результаты:** введена модель системы случайного множественного доступа для класса алгоритмов Coded Random Access и пуассоновского входного потока. Функционирование модели описано с помощью марковской цепи со счетным числом состояний. Доказано, что марковская цепь является невозвратной при любой отличной от нуля интенсивности входного потока. Таким образом доказана нестабильность системы множественного доступа для любого алгоритма из класса Coded Random Access и предложена модификация этих алгоритмов. Функционирование модели для предложенной модификации описано с помощью двумерной марковской цепи со счетным числом состояний. Если интенсивность входного потока не превышает некоторое предельное значение, то двумерная марковская цепь является эргодической. Это предполагает, что предложенная модификация алгоритмов обеспечивает стабильную работу системы. Для любого алгоритма из рассматриваемого класса предложен способ определения численного значения предельной интенсивности входного потока, до которого система будет стабильна. **Практическая значимость:** предложенная модификация алгоритмов может быть использована при разработке протоколов, ориентированных на сценарий с большим числом устройств, низкой интенсивностью появления сообщения в расчете на одно устройство и большой входной суммарной интенсивностью в расчете на систему в целом.

Ключевые слова — уровень доступа к среде, слотовый ALOHA, крупномасштабные системы межмашинной связи, последовательное погашение интерференции, случайный кодовый доступ, 5G, Irregular Repetition Slotted ALOHA.

Цитирование: Матвеев Н. В., Тюрликов А. М. Слотовый ALOHA с итерационной процедурой разрешения коллизий. Стабильность и нестабильность // Информационно-управляющие системы. 2018. № 3. С. 89–97. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.89

Citation: Matveev N. V., Turlikov A. M. Slotted ALOHA with Iterative Procedure for Resolving Collisions. Stability and Non-Stability. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 89–97 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.89

Введение

В настоящее время разрабатывается новый стандарт мобильной связи 5G. Идея стандарта пятого поколения неразрывно связана с парадигмой massive Machine Type Communication (mMTC), которая характеризуется полностью автоматизированными генерацией, изменением, передачей и обработкой данных электронными устройствами с минимальным вмешательством человека. Предполагается, что количество mMTC-устройств к 2020 г. составит порядка одного миллиона на квадратный километр, и каждое устройство нерегулярно будет передавать небольшой объем данных [1]. Текущая организация сетей не позволит справиться с таким количеством устройств. Очевидно, что необходима разработка алгоритмов повышения скорости передачи данных. Так, в рамках проекта

METIS показано, что для сценария множественного доступа некоординированный доступ является эффективным в случае возникновения большого количества абонентов, что характерно для mMTC [2]. А одной из возможных технологий множественного доступа, позволяющих увеличить скорость передачи данных, является Coded Random Access (CRA), или слотовый ALOHA (SA) с итерационной процедурой разрешения коллизий. CRA — это технология случайного множественного доступа с использованием алгоритма последовательного погашения интерференции (SIC), в которой теория и инструменты исправления стираний в системах с LDPC применены для увеличения производительности SA [2–4]. Алгоритмы, основанные на данном подходе, описываются в работах [2–4]. Самым эффективным по средней скорости передачи данных алгоритмом CRA является Irregular Repetition

Slotted ALOHA (IRSA) [3]. Несмотря на эффективность, прямое использование технологии CRA невозможно из-за ее нестабильности при случайном входном потоке, что приводит к увеличению задержки в системе [5–8].

Основной целью данной работы является доказательство нестабильности алгоритмов, предложенных в работах [2–4] в сценарии со случайным входным потоком, разработка метода стабилизации и доказательство его работоспособности.

Модель системы

Будем рассматривать модель системы, базирующуюся на следующих допущениях.

Допущение 1: в системе имеется множество абонентов и базовая станция (БС). Каждый абонент генерирует сообщение и по общему каналу множественного доступа передает на БС. БС по обратному широкополосному каналу передает управляющую информацию абонентам, БС точно знает число активных абонентов в системе.

Допущение 2: все время разделено на равные отрезки — фреймы. Каждый фрейм состоит из n слотов. Количество слотов в каждом фрейме — постоянная величина. Длительность слота равна времени передачи сообщения. Границы фреймов и слотов точно известны всем абонентам. Абонент может передавать сообщение только в соответствии с некоторым алгоритмом A из класса алгоритмов случайного множественного доступа (класс алгоритмов будет определен далее). Алгоритм A известен каждому абоненту.

Допущение 3: абонент в соответствии с алгоритмом A передает одну или несколько копий сообщения, каждое сообщение содержит номера слотов, в которых передавались копии. На БС работает процедура погашения интерференции.

Допущение 4: в каждом слоте может произойти одно из трех событий:

- успех — когда в слоте передавал только один абонент;
- пусто — когда в слоте ни один абонент не передавал;
- конфликт — когда в слоте передавали два и более абонентов.

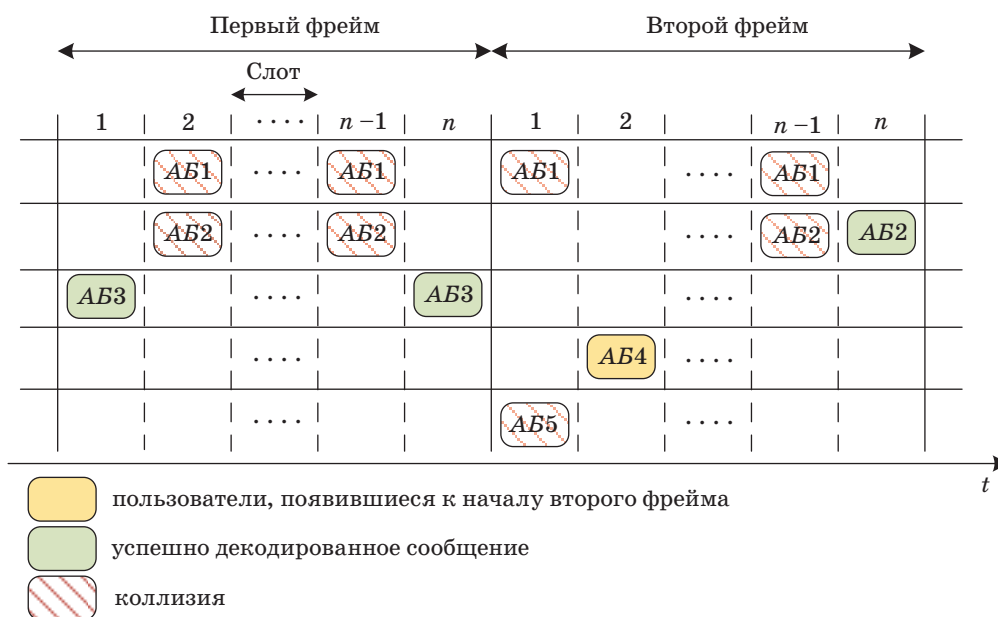
В системе возможно разрешение конфликта. Для этого используется процедура погашения интерференции, которая также называется итерационной процедурой погашения интерференции.

Допущение 5: в каждом фрейме количество пришедших абонентов фиксировано. Абоненты пытаются передать сообщение и затем уходят из системы.

Допущения 1–5 взяты из статей [3, 4], в работах рассматривалось повышение эффективности алгоритмов SA.

Алгоритм последовательного погашения интерференции

Для разрешения некоторых конфликтов используется процедура погашения интерференции. Покажем пример работы процедуры SIC на рис. 1.



■ **Рис. 1.** Пример работы алгоритма CRA: AB — абонент
 ■ **Fig. 1.** Example of operation of the CRA algorithm: AB — subscriber

Два сообщения от АБЗ были приняты успешно в первом фрейме. Однако АБ1 и АБ2 выбрали для передачи одни и те же слоты. В связи с этим БС не удалось декодировать сообщения, эти абоненты будут передавать в следующем фрейме. Во втором фрейме вторая копия сообщения от АБ2 была принята успешно. Зная номер слота, в котором АБ2 передавал вторую копию, можно восстановить сообщения от АБ1. Повторяя данную процедуру, можно восстановить сообщение от АБ5.

Все алгоритмы CRA можно разделить по количеству копий на два класса:

— *регулярные* — когда количество копий одного сообщения в фрейме от каждого абонента фиксировано, например:

- всегда передается одна копия — алгоритм SA;

- всегда передаются две копии — алгоритм Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CDRSA);

— *нерегулярные* — когда количество копий сообщения в фрейме выбирается случайно из фиксированного набора копий, например алгоритм IRSA.

В общем виде любой алгоритм А можно записать с помощью полинома

$$\Pi_A = \sum_{i=0}^k \pi_i x^i,$$

где π_i — вероятность передачи i копий; k — максимальное число копий.

Соответственно, представим перечисленные алгоритмы:

- алгоритм SA $\Pi_{SA} = 1x^1$;

- алгоритм CDRSA $\Pi_{CDRSA} = 1x^2$;

- алгоритм IRSA $\Pi_{IRSA} = 0,5x^2 + 0,28x^3 + 0,22x^8$.

В работах [3, 4] повышалась такая характеристика алгоритма SA, как максимизация числа успешных переданных сообщений. В рамках модели для алгоритма случайного множественного доступа А и для фиксированного количества слотов в фрейме, равного n , для фиксированного числа абонентов в начале фрейма m можно ввести функцию

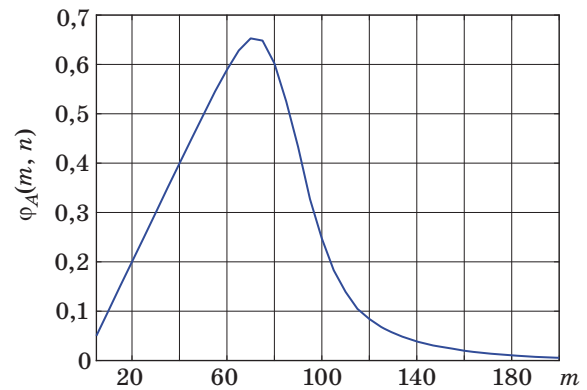
$$\varphi_A(m, n) = \frac{E[M_t | m]}{n}, \quad (1)$$

где M_t — число успешно переданных сообщений.

Для выражения (1) можно ввести следующую лемму.

Лемма 1. Функция $\varphi_A(m, n)$ является унимодальной и $\lim_{m \rightarrow \infty} \varphi_A(m, n) = 0$.

Справедливость леммы следует непосредственно из определения функции $\varphi_A(m, n)$.



■ **Рис. 2.** Зависимость функции $\varphi_A(m, n)$ от m при $n = 100$

■ **Fig. 2.** The function $\varphi_A(m, n)$ versus m for $n = 100$

Наглядный вид функции $\varphi_A(m, n)$ из леммы 1 представлен на рис. 2. При этом в качестве алгоритма А выбран алгоритм IRSA [3] из класса CRA. Далее в статье все представленные графики и численные расчеты приведены для этого алгоритма и числа слотов во фрейме $n = 100$.

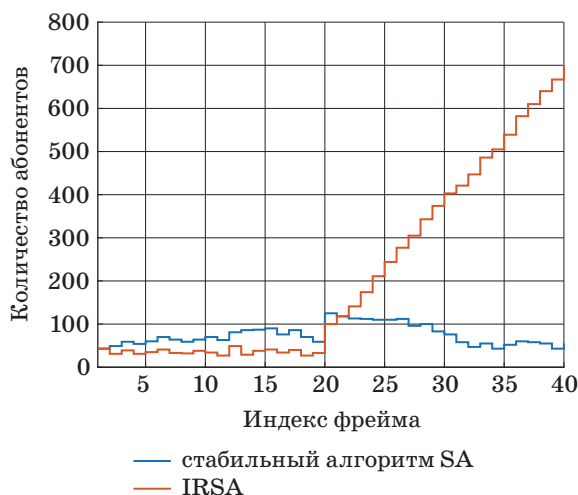
Нестабильность класса алгоритмов CRA

Нужно отметить, что изначальная модель системы не подходит для моделирования систем mMTC, вследствие допущения 5. Изменим его, чтобы приблизить модель к реальности.

Допущение 5: в каждом слоте количество пришедших абонентов распределено по закону Пуассона с параметром λ . Новые абоненты, которые появились в фрейме t , пытаются передать сообщение в фрейме $t + 1$ вместе с абонентами, которым не удалось передать свое сообщение в предыдущих фреймах.

Недостатком технологии CRA является увеличение задержки в системе при случайном входном потоке, что доказано в работе [6]. Так как число абонентов, поступающих в систему в каждом фрейме, случайно, в один момент времени в систему может поступить очень большое количество сообщений. Отличием стабильной системы от нестабильной является то, что в этом случае абоненты все равно будут покидать стабильную систему, и если некоторое время выходной поток будет превышать входной, число абонентов в системе будет стабильно уменьшаться, в то же время в нестабильной системе абоненты будут накапливаться, и в итоге задержка станет бесконечно большой.

Для иллюстрации нестабильности версии алгоритма IRSA проведено моделирование системы при низкой интенсивности входного потока и искусственно введено в систему дополнительно не-



■ **Рис. 3.** Пример нестабильной работы алгоритма IRSA и стабильной работы SA с интенсивностью входного потока $\lambda = 0,34$ и $n = 100$

■ **Fig. 3.** Example of unstable operation of IRSA and stable operation of ALOHA with average arrival rate $\lambda = 0.34$ and $n = 100$

которое число абонентов, которое можно оценить как достаточное для перегрузки системы, этот эффект продемонстрирован на рис. 3. Такое событие может возникнуть, даже если не вмешиваться в работу системы, однако, так как вероятность такого события достаточно маленькая, то для проявления такого эффекта нужно достаточно длительное время моделировать систему.

Описание функционирования модели с помощью случайных процессов

В рамках описанной модели процесс появления и ухода сообщений из системы может быть представлен в виде следующего рекуррентного соотношения:

$$L_{t+1} = L_t - M_t + V_t, \tag{2}$$

где L_t — число абонентов в фрейме t ; M_t — количество абонентов, успешно передавших свое сообщение в фрейме t ; V_t — количество абонентов, появившихся в системе за время фрейма t .

Последовательность дискретных случайных величин L_t образует цепь Маркова со счетным числом состояний. Из допущений принятой модели следует, что данная цепь является однородной, неприводимой, аperiodической. В зависимости от выбранной стратегии и интенсивности входного потока марковская цепь L_t может быть невозвратной или эргодической. Для определения условий невозвратности и эргодичности будем использовать критерий Фостера [9]. Дадим формулировку критерия Фостера в форме, представленной в работе [10].

Пусть L_t для $t = 0, 1, \dots$ — однородная неприводимая аperiodическая цепь Маркова, принимающая значения из счетного множества $\{0, 1, \dots\}$. Тогда:

— если существуют такие числа $\delta > 0$ и $K > 0$, что для всех $l > K$ справедливо

$$E[L_{t+1} - L_t | L_t = l] < -\delta \tag{3}$$

и для $l \leq K$ справедливо

$$E[L_{t+1} | L_t = l] < \infty, \tag{4}$$

то L_t — эргодическая цепь;

— если существует такое число $K > 0$, что для всех $l > K$

$$E[L_{t+1} - L_t | L_t = l] < 0, \tag{5}$$

то L_t — возвратная цепь;

— если существуют такие числа $\delta > 0$ и $K > 0$, что для всех $l > K$ справедливо

$$E[L_{t+1} - L_t | L_t = l] \geq \delta, \tag{6}$$

то L_t — невозвратная цепь.

Доказательство нестабильности класса алгоритмов CRA

Основываясь на критерии Фостера, нестабильность класса алгоритмов CRA можно сформулировать в виде следующей теоремы.

Теорема 1. Цепь Маркова L_t , каждое состояние которой равно числу абонентов в системе, является невозвратной при любых значениях входного потока.

Доказательство: Для доказательства возьмем математическое ожидание от рекуррентного соотношения (2):

$$E[L_{t+1}] = E[L_t] - E[M_t] + E[V_t]. \tag{7}$$

Пусть число абонентов в фрейме t будет фиксировано: $L_t = l$, тогда

$$E[M_t | L_t = l] = \varphi_A(l, n)n \text{ и } E[V_t] = \lambda n.$$

Получим выражение

$$E[L_{t+1} - L_t | L_t = l] = -\varphi_A(l, n)n + \lambda n.$$

Поскольку $\lim_{l \rightarrow \infty} \varphi_A(l, n) = 0$ (см. лемму 1), при любых фиксированных λ и n всегда найдутся числа $\delta > 0$ и $K > 0$ такие, что для всех $l > K$

$$\lambda n - \varphi_A(l, n)n \geq \delta.$$

Согласно критерию Фостера, такая цепь является невозвратной. Из этого следует, что данная

система является нестабильной при любом алгоритме A из класса алгоритмов CRA и любой интенсивности λ .

Стабилизация класса алгоритмов CRA

Для достижения стабилизации расширим класс алгоритмов CRA следующим образом: БС устанавливает вероятность передачи сообщения p , каждый абонент в текущем фрейме передает с вероятностью p и не передает с вероятностью $1 - p$, где $p \in [0, 1]$.

Введем вспомогательную модель, оставим допущения 1–4 без изменений, изменим допущение 5 следующим образом:

— число абонентов m в начале каждого фрейма случайно и распределено по пуассоновскому закону, среднее число абонентов $E[m] = g$;

— абоненты, которым не удалось передать в фрейме t , уходят из системы.

Для этой модели введем вспомогательную функцию и лемму.

Для алгоритма случайного множественного доступа A и для фиксированного количества слотов в фрейме, равного n , можно ввести следующую функцию:

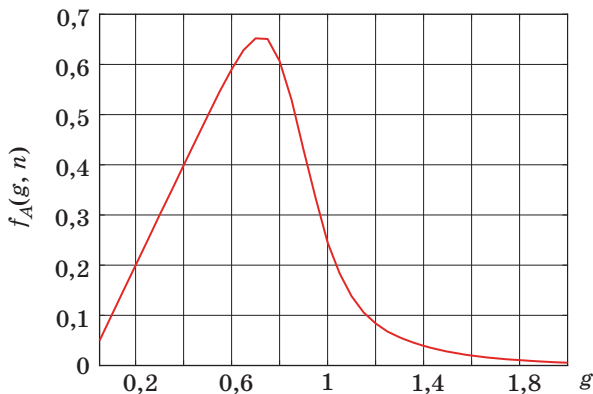
$$f_A(g, n) = \frac{E[M_t; g]}{n} \quad (8)$$

Лемма 2. Функция $f_A(g, n)$ является унимодальной и $\lim_{g \rightarrow \infty} f_A(g, n) = 0$.

Справедливость леммы следует непосредственно из определения функции $f_A(g, n)$.

Наглядный вид функции $f_A(g, n)$ из леммы 2 представлен на рис. 4.

Введем вспомогательную модель, оставим допущения 1–4 без изменений, изменим допущение 5:



■ **Рис. 4.** Зависимость функции $f_A(g, n)$ от g при $n = 100$

■ **Fig. 4.** The function $f_A(g, n)$ versus g for $n = 100$

— зафиксируем число абонентов в начале фрейма $L_t = m$;

— все абоненты передают сообщение с вероятностью p (с вероятностью $1 - p$ не передают);

— абоненты, которым не удалось передать в фрейме t , уходят из системы.

Для этой модели введем вспомогательную функцию и лемму.

Пусть к началу фрейма в системе находится m абонентов, которые используют стратегию A . Для фиксированных n , p , и A введем функцию

$$\gamma_A(p, m, n) = \frac{E[M_t]}{n} \quad (9)$$

Будем задавать вероятность передачи сообщения для фиксированных параметров g, n, m следующим образом:

$$p(g, m, n) = \begin{cases} 1, & \text{если } m/n < g; \\ g \frac{n}{m} & \text{иначе.} \end{cases} \quad (10)$$

Лемма 3. Найдется число $K > 0$ такое, что для всех $m > K$ верно следующее утверждение:

$$\gamma_A(p(g_0, m, n), m, n) \geq f_A(g_0, n),$$

где $g_0 = \max[f_A(g, n)]$ (функция $f_A(g, n)$ определена в лемме 2).

Для наглядного примера вида функции $\gamma_A(p(g_0, m, n), m, n)$ из леммы 3 использован метод Монте-Карло. Результат моделирования представлен на рис. 5 для $n = 100$.

Тогда стабильность расширенного класса алгоритмов CRA можно сформулировать в виде следующей теоремы.

Теорема 2. Цепь Маркова L_t , каждое состояние которой равно числу абонентов в системе, является эргодической при значениях входного потока $0 < \lambda < f_A(g_0, n)$, где g_0 — точка максимума для функции $f_A(g_0, n)$.

Доказательство: Для доказательства возьмем математическое ожидание (7).

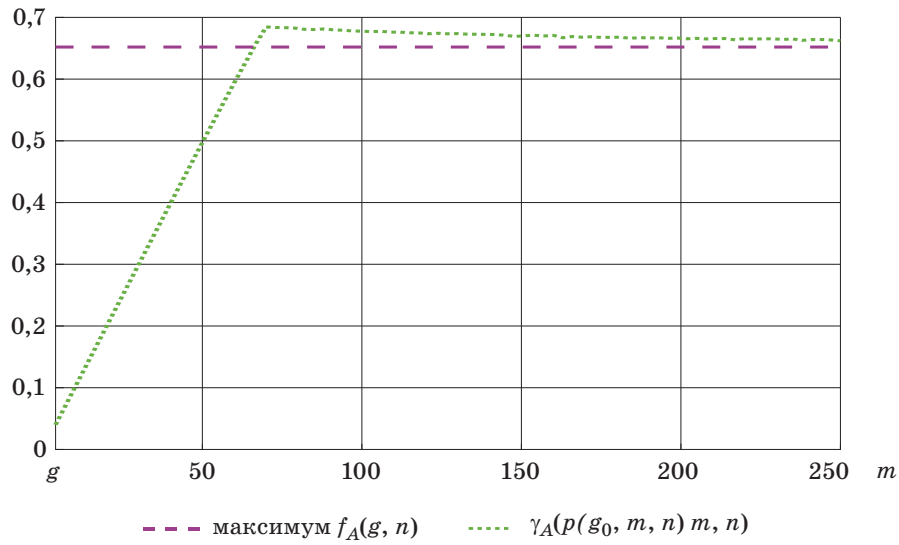
Пусть число абонентов в фрейме t будет фиксировано: $L_t = l$, тогда

$$E[M_t | L_t = l] = \gamma_A(p(g_0), l, n) \text{ и } E[V_t] = \lambda n.$$

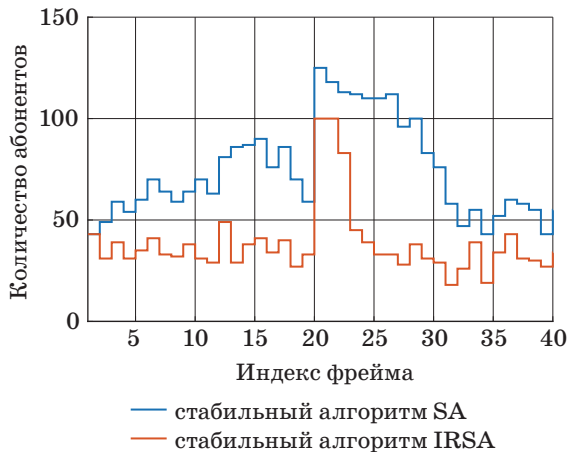
Получим выражение

$$E[L_{t+1} - L_t | L_t = l] = -\gamma_A(p(g_0), l, n)n + \lambda n.$$

Докажем первое условие (3) критерия Фостера для эргодической цепи. Согласно лемме 3, при значениях входного потока $0 < \lambda < f_A(g_0, n)$ и



■ **Рис. 5.** Зависимость функции $\gamma_A(p(g_0, m, n), m, n)$ от m при $n = 100$
 ■ **Fig. 5.** The function $\gamma_A(p(g_0, m, n), m, n)$ versus m for $n = 100$



■ **Рис. 6.** Пример стабильной работы алгоритма IRSA с предлагаемой модификацией с интенсивностью входного потока $\lambda = 0,34$ и $n = 100$
 ■ **Fig. 6.** Example stable operation of IRSA with proposed modification with average arrival rate $\lambda = 0.34$ and $n = 100$

любом конечном n всегда найдутся числа $\delta > 0$ и $K > 0$ такие, что для всех $l > K$

$$\lambda n - \gamma_A(p(g_0), l, n)n \leq -\sigma.$$

Докажем второе условие (4) критерия Фостера для эргодической цепи. Вследствие того, что порог K конечен из первого условия критерия Фостера, при значениях входного потока $0 < \lambda < f_A(g_0, n)$ и любом конечном n для всех $l \leq K$ справедливо

$$E[L_{t+1} | L_t = l] < \infty.$$

Из критерия Фостера следует, что данная система является стабильной.

Предложенный способ позволил стабилизировать алгоритм IRSA при интенсивности входного потока $\lambda \in (0; 0,65)$ и значении $n = 100$. Данный подход для любого алгоритма из класса CRA для фиксированного значения n позволяет получить g_0 и значения входного потока, при которых гарантируется стабильность.

На рис. 6 представлена производительность алгоритма IRSA с предложенной модификацией с входными параметрами, аналогичными на рис. 3.

Как видно из графика, после появления 100 абонентов в начале 20-го фрейма IRSA показывает стабильность. Увеличение количества абонентов не наблюдается.

Оценка числа активных абонентов в системе при случайном входном потоке

Примем, что БС не известно точное число активных абонентов. Поэтому БС после принятия сообщений за текущий фрейм вычисляет количество слотов, в которых не было передано сообщений, — N^{empty} , количество слотов, в которых были переданы все сообщения, — $N^{success}$, количество слотов с коллизиями после процедуры SIC — $N^{collision}$. На основании полученных значений для следующего фрейма вычисляется оценка числа активных абонентов. Для этого воспользуемся подходом, предложенным в работе [11], для алгоритма адаптивный АЛОНА и обобщенным в работе [12] на случай, когда абонент передает несколько копий одного сообщения, однако в от-

сутствие на БС итерационной процедуры разрешения коллизии.

Следуя работе [11], составим рекуррентное выражение для оценки числа активных абонентов

$$S_{t+1} = \max(1, S_t + aN_t^{empty} + bN_t^{succes} + cN_t^{collision}),$$

где S_t — оценка числа активных абонентов в фрейме t ; a, b, c — коэффициенты, которые влияют на работу алгоритма и являются константами; N_t^{empty} — количество пустых слотов в фрейме t ; N_t^{succes} — количество слотов, в которых произошел успех в фрейме t ; $N_t^{collision}$ — число слотов с неразрешенными конфликтами в фрейме t .

В рамках описанной модели процесс появления и ухода сообщений из системы может быть представлен в виде следующего рекуррентного соотношения:

$$L_{t+1} = L_t - M_t(S_t, L_t) + V_t. \quad (11)$$

Последовательность пар случайных величин (L_t, S_t) образует двумерную марковскую цепь. Найдем средний снос случайных величин (L_t, S_t)

$$E[L_{t+1} - L_t | L_t = l, S_t = s] = E[M_t(l, s)] - \lambda,$$

$$E[S_{t+1} - S_t | L_t = l, S_t = s] = aE[N^{empty}] + bE[N^{succes}] + c[N^{collision}].$$

Следуя работе [9], рассмотрим предельный переход $\sqrt{l^2 + s^2} \rightarrow \infty$, введем величину $k = l/s$ и найдем граничную вектор-функцию среднего сноса $\mu = (\mu_l(k), \mu_s(k))$

$$\mu_l(k) = E[M_t(k)] - \lambda,$$

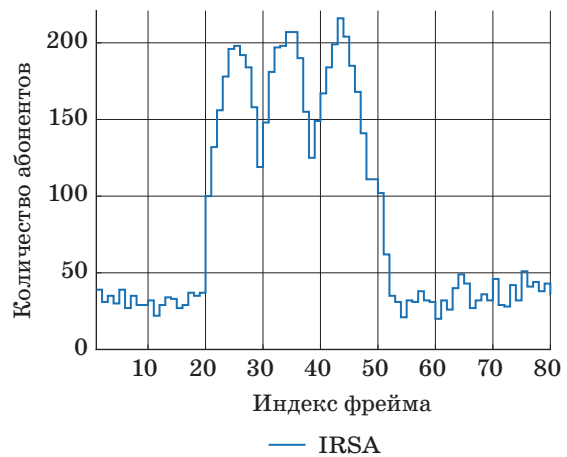
$$\mu_s(k) = aE[N^{empty}] + bE[N^{succes}] + c[N^{collision}].$$

Рассмотрим уравнение

$$\mu_l(k) = k\mu_s(k).$$

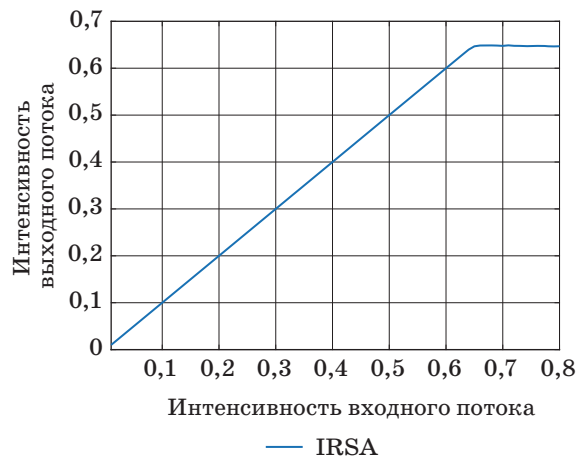
Цепь Маркова (L_t, S_t) будет эргодической, если для любого корня k уравнения имеют место неравенства $\mu_l(k) < 0$ и $\mu_s(k) < 0$ [9]. Всегда возможно подобрать коэффициенты a, b, c и корень k , при которых система будет стабильна до предельной интенсивности входного потока (см. предыдущий раздел).

Для решения уравнения зафиксировали алгоритм IRSA, интенсивность входного потока $\lambda = 0,65$, коэффициенты: $a = -1, b = -1$. Найти с помощью численного метода c и k . В итоге $c = 9, k = 9$.



■ **Рис. 7.** Пример работы алгоритма IRSA при использовании оценки числа активных абонентов в системе с интенсивностью входного потока $\lambda = 0,34$ и $n = 100$

■ **Fig. 7.** Example stable operation of IRSA using the estimation of the number of active users in the system with average arrival rate $\lambda = 0.34$ and $n = 100$



■ **Рис. 8.** Интенсивность выходного потока от входного

■ **Fig. 8.** Intensity of the input stream from the output

Для проверки стабильности алгоритма IRSA построен график (рис. 7), аналогичный графикам на рис. 3 и 6. В фрейме с номером 20 в систему искусственно добавлено 100 абонентов, что привело к бесконечному росту числа абонентов. Из графика видно, что число абонентов не стремится к бесконечности.

Из графика зависимости интенсивности выходного потока от интенсивности входного (рис. 8) видно, что алгоритм стабилен при использовании предложенного алгоритма до предельной интенсивности входного потока.

Заключение

В данной работе была доказана нестабильность класса алгоритмов случайного множественного доступа CRA, предложенного в статьях [3, 4], для сценария со случайным входным потоком при любой интенсивности. Для стабилизации исходных алгоритмов предложено расширение класса алгоритмов CRA за счет введения специальной процедуры управления передачей абонентов. Доказано, что предложенный способ

позволяет стабилизировать алгоритмы CRA до определенной интенсивности входного потока. Для конкретного алгоритма CRA предложен способ получения значения максимальной интенсивности входного потока, до которой система будет стабильна. Для модели, приближенной к реальности, когда БС не известно число активных абонентов в системе, предложена оценка числа активных абонентов в системе, которая гарантирует стабильную работу системы до максимального значения интенсивности входного потока.

Литература

1. Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015). IMT Vision Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf (дата обращения: 18.04.2018).
2. ICT-317669-METIS/D2.4. Proposed Solutions for New Radio Access. https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D2.4_v1.pdf (дата обращения: 18.04.2018).
3. Liva G. Graph-based Analysis and Optimization of Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA // *IEEE Transactions on Communications*. 2011. N 59. P. 477–487. doi:10.1109/TCOMM.2010.120710.100054
4. Paolini E., Stefanovic C., Liva G., Popovski P. Coded Random Access: Applying Codes on Graphs to Design Random Access Protocols // *IEEE Communications Magazine*. 2015. N 53 P. 144–150. doi:10.1109/MCOM.2015.7120031
5. Apanasenko N., Matveev N., Turlikov A. Stability and Delay of Algorithms of Random Access with Successive Interference Cancellation // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Springer, Cham, 2017. P. 510–518. doi:10.1007/978-3-319-67380-6_47
6. Апанасенко Н. В., Матвеев Н. В., Тюрликов А. М. Метод стабилизации алгоритмов множественного доступа с последовательным погашением интерференции // Научная сессия ГУАП: сб. докл. 2017. С. 260–266.
7. Meloni A., Murrone M. CRDSA, CRDSA++ and IRSA: Stability and Performance Evaluation // 2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), Baiona, 2012. P. 220–225. doi:10.1109/ASMS-SPSC.2012.6333080
8. Kissling C. On the Stability of Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CRDSA) // *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, Kathmandu, 2011. P. 1–6. doi:10.1109/GLOCOM.2011.6134329
9. Foster F. G. On the Stochastic Matrices Associated with Certain Queuing Processes // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1953. N 24. P. 355–360. doi:10.1214/aoms/1177728976
10. Цыбаков Б. С., Михайлов В. А. Свободный синхронный доступ пакетов в широкополосный канал с обратной связью // *Проблемы передачи информации*. 1978. Т. 14. № 4. С. 32–59.
11. Михайлов В. А. Геометрический анализ устойчивости цепей Маркова в R_+^n и его приложение к вычислению пропускной способности адаптивного алгоритма случайного множественного доступа // *Проблемы передачи информации*. 1988. Т. 24. Вып. 1. С. 61–73.
12. Galinina O., Turlikov A., Andreev S., Koucheryavy Y. Stabilizing Multi-Channel Slotted ALOHA for Machine-Type Communications // 2013 IEEE Intern. Symp. on Information Theory, Istanbul, 2013. P. 2119–2123. doi:10.1109/ISIT.2013.6620600

UDC 004.728.3.057.4

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.89

Slotted ALOHA with Iterative Procedure for Resolving Collisions. Stability and Non-Stability

Matveev N. V.^a, Assistant Professor, n.matveev@vu.spb.ru

Turlikov A. M.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, turlikov@vu.spb.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Cellular networks of the new generation consider Massive Machine Type Communication scenarios and a class of multiple random access algorithms Slotted ALOHA with coded random access. The algorithms of this class allow you to maintain a

large number of devices, but they are unstable. Their non-stability leads to a longer time of delivering a message from a subscriber to the base station during the operation of large-scale systems of inter-machine communication. **Purpose:** Substantiation of non-stability of Slotted ALOHA algorithms with coded random access at any intensity of the input stream; proposal of a method for its stabilization; determination of the intensity at which the system will be stable. **Results:** A model of a random multiple access system is introduced for coded random access and a Poisson input flow. The functioning of the model is described with the use of a Markov chain with a countable number of states. It is proved that the Markov chain is non-returnable for any non-zero intensity of the input stream. Thus, the non-stability of a multiple access system for any coded random access algorithm is proved, and a modification of these algorithms is proposed. The operation of the model for the proposed modification is described using a two-dimensional Markov chain with a countable number of states. If the intensity of the input stream does not exceed a certain value limit, the two-dimensional Markov chain is ergodic. This suggests that the proposed modification of the algorithms ensures stable operation of the system. For any algorithm from the considered class, a method is proposed for determining the numerical value of the limiting intensity of the input stream at which the system is stable. **Practical relevance:** The proposed modification of the algorithms can be used to develop protocols oriented to a scenario with a large number of devices, a low message rate per device and a large total input intensity in the whole system.

Keywords — Medium Access Control, Slotted ALOHA, Massive Machine Type Communication, Successive Interference Cancellation, Coded Random Access, 5G, Irregular Repetition Slotted ALOHA.

Citation: Turlikov A. M., Matveev N. V. Slotted ALOHA with Iterative Procedure for Resolving Collisions. Stability and Non-Stability. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 89–97 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.89

References

1. *Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015). IMT Vision — Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf (accessed 18 April 2018).
2. *ICT-317669-METIS/D2.4. Proposed Solutions for New Radio Access*. Available at: https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D2.4_v1.pdf (accessed 18 April 2018).
3. Liva G. Graph-based Analysis and Optimization of Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, no. 59, pp. 477–487. doi:10.1109/TCOMM.2010.120710.100054
4. Paolini E., Stefanovic C., Liva G., Popovski P. Coded Random Access: Applying Codes on Graphs to Design Random Access Protocols. *IEEE Communications Magazine*, 2015, no. 53, pp. 144–150. doi:10.1109/MCOM.2015.7120031
5. Apanasenko N., Matveev N., Turlikov A. Stability and Delay of Algorithms of Random Access with Successive Interference Cancellation. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, Springer, Cham, 2017, pp. 510–518. doi:10.1007/978-3-319-67380-6_47
6. Apanasenko N. V., Matveev N. V., Turlikov A. M. Method of Stabilization of Random Access Algorithms with Successive Interference Cancellation. *Sbornik dokladov Nauchnoi sessii GUAP*, 2017, pp. 260–266 (In Russian).
7. Meloni A., Murrone M. CRDSA, CRDSA++ and IRSA: Stability and Performance Evaluation. *2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*, Baiona, 2012, pp. 220–225. doi:10.1109/ASMS-SPSC.2012.6333080
8. Kissling C. On the Stability of Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CRDSA). *Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2011)*, Kathmandu, 2011, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOCOM.2011.6134329
9. Foster F. G. On the Stochastic Matrices Associated with Certain Queuing Processes. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1953, no. 24, pp. 355–360. doi:10.1214/aoms/1177728976
10. Tsybakov B. S., Mikhailov V. A. Free Synchronous Packet Access in a Broadcast Channel with Feedback. *Problemy peredachi informatsii*, 1978, vol. 14, no. 4, pp. 32–59 (In Russian).
11. Mikhailov V. A. Geometrical Analysis of the Stability of Markov Chains in and its Application to Throughput Evaluation of the Adaptive Random Multiple Access Algorithm. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission], 1988, vol. 24, iss. 1, pp. 47–56 (In Russian).
12. Galina O., Turlikov A., Andreev S., Koucheryavy Y. Stabilizing Multi-Channel Slotted ALOHA for Machine-Type Communications. *2013 IEEE Intern. Symp. on Information Theory*, Istanbul, 2013. pp. 2119–2123. doi:10.1109/ISIT.2013.6620600