Научная статья
УДК 621.391
https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-3-97-107
EDN:GUNCQI

Корпоративный алгоритм множественного доступа в киберпространстве

Наталья Аркадьевна Верзун ✉, verzun.n@unecon.ru
Михаил Олегович Колбанёв, mokolbanev@mail.ru
Борис Яковлевич Советов, bysovetov@etu.ru

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. *Неотъемлемым компонентом киберпространства являются системы доступа, обеспечивающие распределение инфокоммуникационных ресурсов киберпространства между пользователями. Развитие и внедрение цифровых технологий требуют внесения корректив в архитектуру и принципы функционирования систем доступа. При этом необходимо учитывать, что требования, предъявляемые к ним, могут быть разнообразными, противоречивыми и определяются спецификой предметной области.*

Цель проведенного исследования: *предложить корпоративный алгоритм множественного доступа, основная идея которого – отказ от принципа состязательности источников нагрузки. «Корпоративность» алгоритма проявляется в использовании принципа «справедливого распределения» общего ресурса – канала передачи таким образом, чтобы все данные от всех источников нагрузки собирались и передавались организационно без задержек / без потерь. Главное требование к функционированию корпоративной системы множественного доступа – удовлетворение общему критерию оптимальности. Таким критерием может быть: средневзвешенная доля блоков данных принятых безошибочно и вовремя, или средневзвешенное среднее время задержки передачи блоков данных, или средневзвешенная доля потерянных блоков данных. В статье изложена концепция корпоративного алгоритма множественного доступа, за основу взят комбинированный* ***метод*** *разделения общего канала передачи: между группами источников нагрузки используется временно́е разделение, а внутри каждой группы – случайный синхронный доступ. Для реализации принципа корпоративного доступа используется процедура динамического регулирования доступом.*

Результаты. *Разработана математическая модель сети корпоративного множественного доступа и выражения для расчета вероятностно-временны́х характеристик передачи блоков данных. Сформулирована задача оптимизации: выбор наилучшего режима работы сети доступа, который предусматривает такое распределение временны́х окон между источниками нагрузки, что достигается экстремум общего критерия оптимальности. Для решения этой задачи предложен трехэтапный алгоритм: 1 этап – расчет всех возможных значений выбранного критерия оптимизации, за который принята средневзвешенная доля принятых безошибочно и вовремя блоков данных; 2 этап – построение графической модели задачи оптимизации; 3 этап – нахождение кратчайшего пути для построенного графа, совокупность ребер составляющих такой путь и будет решением задачи. Представлена апробация данного алгоритма.*

Теоретическая значимость *заключается в формализации описания архитектуры киберпространства, развитии методов, технологий и математических моделей множественного доступа в киберпространстве, а также в полученных расчетных выражениях, алгоритмах оптимизации процессов функционирования систем, реализующих корпоративный подход к множественному доступу.*

Ключевые слова: *киберпространство, система доступа, корпоративный алгоритм множественного доступа, общий критерий оптимальности*

Ссылка для цитирования: Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Советов Б.Я. Корпоративный алгоритм множественного доступа в киберпространстве // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 3. С. 97–107. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-3-97-107. EDN:GUNCQI

Original research
https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-3-97-107
EDN:GUNCQI

Corporate Algorithm of Multiple Access in Cyberspace

Natalia A. Verzun ✉, verzun.n@unecon.ru
Mikhail O. Kolbanev, mokolbanev@mail.ru
Boris Ya. Sovetov, bysovetov@etu.ru

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
St. Petersburg, 197022, Russian Federation

Annotation

Relevance*. An integral component of cyberspace are access systems that ensure the distribution of cyberspace information and communication resources among users. The development and implementation of digital technologies requires making adjustments to the architecture and principles of functioning of access systems. At the same time, it should be borne in mind that the requirements imposed on them can be diverse, contradictory and determined by the specifics of the subject area.* ***The purpose of the research*** *is to propose a competitive algorithm for multiple access, the main idea of which is the rejection of the principle of adversarial load sources. The "corporativeness" of the algorithm is manifested in the use of the principle of "fair distribution" of a common resource, the transmission channel, so that all data from all sources of the load is collected and transmitted corporately without delay/loss. The main requirement for the functioning of a corporate multiple access system is to meet the general criterion of optimality. Such criteria can be: the weighted average proportion of data blocks received correctly and on time, or the weighted average delay time in transmitting data blocks, or the weighted average proportion of lost data blocks.*

Methods. *The article outlines the concept of a corporate multiple access algorithm based on a combined method for dividing a common transmission channel: temporary separation is used between groups of load sources, and random synchronous access is used within each group. To implement the corporate access principle, a dynamic access control procedure is used.*

Results. *A mathematical model of a corporate multiple access network and expressions for calculating the probabilistic-temporal characteristics of data block transmission have been developed. The optimization problem is formulated: choosing the optimal mode of operation of the access network, which provides for such a distribution of time windows between load sources that the extremum of the general optimality criterion is achieved. A three–stage algorithm for solving the optimization problem is proposed: stage 1 is the calculation of all possible values of the selected optimization criterion, for which the weighted average proportion of data blocks received correctly and on time is taken, stage 2 is the construction of a graphical model of the optimization problem, and stage 3 is the finding of the shortest path for the constructed graph, the set of edges that make up such a path will be solving the problem. The approbation of this algorithm is presented.*

The theoretical significance *is the expansion in the formalization of the description of the architecture of cyberspace, the development of methods, technologies and mathematical models of multiple access in cyberspace, as well as in the calculated expressions obtained, algorithms for optimizing the functioning of systems that implement a corporate approach to multiple access.*

Keywords: *cyberspace, access system, corporate multiple access algorithm, general optimality criterion*

For citation: Verzun N.A., Kolbanev M.O., Sovetov B.Ya. Corporate Algorithm of Multiple Access in Cyberspace. *Proceedings of Telecommunication Universities.* 2025;11(3):97–107. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-3-97-107. EDN:GUNCQI

Введение

Киберпространство (кибернетическое пространство) относится к искусственным материальным пространствам, которое представляет собой комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом цифровых систем, используемых в процессах деятельности для сохранения, распространения и переработки информации, представленной в

форме цифровых данных. В [1, 2] дается ряд определений киберпространства:

– ISO/IEC 27032:2012 (заменен ISO/IEC 27032:2023): «Киберпространство – сложная среда, которая возникает в результате взаимодействия людей, программного обеспечения и услуг в интернете и поддерживается распределенными по всему миру физическими устройствами информационных и коммуникационных технологий и подключенными сетями»;

– США: Глобальная информационная среда, состоящая из взаимозависимых сетей, информационной инфраструктуры и данных, включая интернет, телекоммуникационные сети, компьютерные системы, а также встроенные процессоры и контроллеры;

– Япония: Пространство, основанное на сети интернет, которая расширена за счет развития цифровых технологий и множества независимых участников; в этой среде создается интеллектуальная собственность в форме технологических инноваций и новых бизнес-моделей, которые способствуют устойчивому развитию экономики;

– Китай: Киберпространство состоит из интернета, коммуникационных сетей, компьютерных систем, систем автоматического управления, цифровых устройств и приложений, услуг и данных.

Общее понимание термина «Киберпространство» содержит два элемента:

1) рукотворный глобальный объект, объединяющий в общую технологическую среду всевозможные цифровые системы и данные множества участников;

2) использование этой общей технологической среды ведет к созданию недоступных ранее моделей деятельности в широком круге предметных областей и росту экономики.

Киберпространство, как сложная система, включает в себя несколько подсистем (рисунок 1).

Рис. 1. Подсистемы киберпространства

Fig. 1. Subsystems of Cyberspace

Пользователями выступают люди и программы. Больше половины жителей Земли являются пользователями интернета, в РФ – это более 75 % населения [3].

Инфраструктура представляет собой три типа систем со следующими объемными характеристиками:

1) центры хранения данных – предназначены для хранения от сотен терабайт до нескольких эксабайт данных;

2) сети передачи данных со скоростями, достигающими гигабит в секунду на участках доступа и терабит в секунду на магистральных участках;

3) системы обработки данных (скорость обработки до нескольких эксафлопс).

Системы доступа в киберпространстве обеспечивают распределение ресурсов между пользователями, их функционирование основано на принципах и идеях, предложенных специалистами в те времена, когда появлялись первые сети связи: почтовые, телеграфные, телефонные. Используемые в этой подсистеме механизмы доступа позволяют задавать разграничительные политики, регламентировать процедуры распределения общего ресурса в целях эффективного и безопасного его использования [4].

Специфика систем доступа в киберпространстве

Многие принципы функционирования систем доступа, разработанные раньше, сохранились и полезны для современных систем доступа к киберпространству. К ним можно отнести следующее:

– применение процедур идентификации, аутентификация, авторизации пользователей;

– согласование технических характеристик доступа с затребованной услугой;

– идея применения технологий множественного доступа к общим ресурсам – для большой группы пользователей выделяется ограниченный объем ресурсов, который по определенным правилам и алгоритмам распределяется между ними и др.

Общим, разделяемым для реализации передачи данных от множества источников, ресурсом системы доступа выступает физическая среда распространения сигналов [5]. Задача системы доступа – распределение между пользователями этой физической среды таким образом, чтобы обеспечить качество предоставляемых услуг при рациональном потреблении ресурсов. Среда передачи может быть естественной (эфирные сети) или искусственно созданной (сети кабельные: электрические, оптические). Для передачи данных при этом используют электромагнитные колебания, свойства которых, а также природа канала передачи, позволяют применять разнообразные способы разделения физической среды между абонентами [6, 7]: пространственное деление – технология MIMO; временно́е деление – TDMA4; частотное деление – FDMA; кодовое разделение – CDMA; волновое разделение – WDMA и пр. Также используются комбинации всех вышеприведенных способов деления канала.

Доступ к среде передачи абонентов (источников нагрузки) носит состязательный характер и может быть реализован с применением:

– состязательного принципа, когда абоненты случайным образом пытаются захватить канал для передачи своих данных (это большая группа случайных методов доступа, к которой относят синхронный случайный доступ, ALOHA, семейство методов с контролем несущей CSMA и пр.);

– определенных правил, обеспечивающих некоторую очередность доступа абонентов к общим ресурсам и выделение каждому абоненту своей «части» канала для передачи данных. К подобным методам можно отнести методы: временно́го разделения, маркерный доступ, методы опроса и пр.

Системы доступа являются важным элементом киберпространства и требования, предъявляемые к ним, могут быть разнообразными, противоречивыми и определяются спецификой предметной области [8–12]. Это, в частности, может быть:

– огромное разнообразие видов терминалов;

– поддержка мобильности терминалов;

– большие объемы передаваемых данных;

– широкий диапазон скоростей передачи;

– малые временны́е задержки и поддержка режима реального времени;

– требования к масштабированию, надежности, скорости восстановления после сбоев;

– высокая плотность сети (появление сверхплотных сетей) и пр.

Развитие цифровых технологий требует внесения корректив в архитектуру и принципы функционирования сетей доступа. Необходимо отметить следующие аспекты, влияющие на эволюцию систем доступа:

– рост объемов передаваемых данных;

– увеличение числа подключенных терминальных устройств, прежде всего, за счет роста числа подключенных умных вещей;

– увеличение числа мобильных терминалов и, соответственно, рост значимости беспроводных технологий передачи;

– множество вариантов доступа терминальных устройств к глобальным инфокоммуникационным ресурсам через эфирные сети, использующие разнообразные технологии и образующие в совокупности гетерогенную беспроводную сеть;

– конвергенция различных, созданных на протяжении нескольких десятилетий, сетей электросвязи и образование единой гетерогенной инфокоммуникационной сети.

В киберпространстве требования к доступу меняются. В частности, можно выделить предложенную авторами концепцию шеринговых сетей доступа [13, 14]. Предусматривается не постоянное подключение абонентов к определенной сети, а аренду канала у одного из множества доступных в определенной точке пространства провайдера – соответственно тип канала / технология передачи может различаться. Т. е. вариативность системы доступа, которая предполагает, что на этапе доступа к ресурсам киберпространства можно выбирать разные сети доступа, процедуры, протоколы, операторов и пр.

Кроме того, данные сообщений, передаваемые через сети доступа киберпространству как в одном,

так и в другом направлении, «превратились» в контент, который несет те или иные смыслы пользователям и / или от них и, соответственно, может нарушить или оказать какое-либо негативное влияние на когнитивную безопасность киберпространства. Также можно отметить интеллектуализацию систем доступа.

Изменения в архитектуре систем доступа

Все эти требования так или иначе находят отражение в развитии архитектуры системы доступа в киберпространство. Теперь недостаточно, как раньше, только осуществить техническое подключение пользователя к ресурсам сети. Кроме этого, необходимо: выбрать оператора; обеспечить требуемую скорость интерфейса доступа, которая может изменяться в широком диапазоне значений; реализовывать функции информационного фильтра, который должен «работать» в двух направлениях: ограждать и защищать от опасностей проникновения как к пользователю, так и в киберпространство нежелательного и запрещенного контента. Учет новых (вышеперечисленных) требований киберпространства к системам доступа заставляет менять их архитектуру.

Во-первых, если описывать архитектуру сети доступа языком OSI, то это означает добавление еще одного подуровня к канальному (2-му) уровню модели OSI подобно тому, как это делалось, например, в MPLS (рисунок 2).

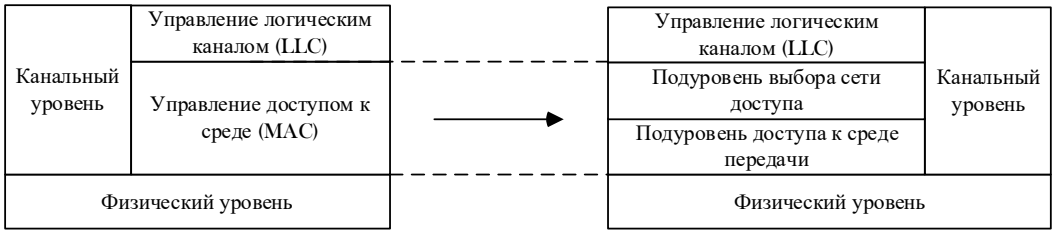

Рис. 2. Архитектура протоколов доступа устройств к глобальным инфокоммуникационным ресурсам [13]

Fig. 2. Architecture of Device Access Protocols to Global Infocommunication Resources

В архитектуре (см. рисунок 2) уровень управления доступом к среде передачи (MAC) разделен на два подуровня: выбора сети доступа и доступ к среде передачи.

В соответствии с данной архитектурой, сценарий предоставления услуги доступа к ресурсам реализуется в два шага.

Шаг 1. Выбор сети для доступа.

Шаг 2. Передача пользовательских данных.

Во-вторых, еще одним возможным новшеством при организации передачи данных является отказ от принципа состязательности источников нагрузки. Необходимость отказа возникает в случаях, когда, например:

– речь идет о передаче данных в интернете вещей, если предметная область требует непременного своевременного получения данных обязательно от всех устройств (например, в медицине для постановки диагноза или принятия решения о состоянии пациента, необходимо без опоздания получить данные от всех датчиков);

– организуется рой беспилотных автономных устройств, и без информации о координатах каждого устройства невозможно принимать решение о дальнейшей траектории движения роя в целом.

Отказ от принципа состязательности может быть реализован путем создания системой множественного доступа дополнительных канальных ресурсов, которые способны обеспечить уменьшение задержек при передаче критически важных данных (состояние пациента, координаты беспилотного устройства, регистрация атаки системой информационной безопасности и т. п).

Алгоритм, отвечающий данным требованиям, предлагается назвать *корпоративным алгоритмом множественного доступа*. Термин «корпоративный» используется в данном случае в том же смысле, что и в теории игр (корпоративные игры). Так, в [15] следующим образом описывается специфика понятия «корпоративный»: «Основное внимание кооперативной теории концентрируется на описании и изучении вариантов возможных стабильных и справедливых «дележей» (распределения) общественного продукта». В основе этого утверждения лежит принцип «справедливого распределения общественного продукта», т. е. распределение канала передачи таким образом, чтобы все данные от всех источников нагрузки собирались и передавались корпоративно без задержек / без потерь.

Главное требование к функционированию корпоративной системы множественного доступа – удовлетворение *общему критерию оптимальности*. Таким критерием может быть, например: средневзвешенная доля принятых безошибочно и вовремя блоков данных; средневзвешенное среднее время задержки передачи блоков данных; средневзвешенная доля потерянных блоков данных.

Концепция корпоративного алгоритма множественного доступа

Изложим суть алгоритма в терминах интернета вещей и за основу возьмем синхронно-временно́й метод доступа к каналу передачи [16, 17]. Объектом исследования является беспроводная сенсорная сеть интернета вещей с M типами источников нагрузки (M типов сенсоров), число источников каждого типа m_i, i = 1, …, M. Физическая структура сети показана на рисунке 3.

Таким образом, имеем M групп источников нагрузки, для каждой из которых (т. е. для каждого типа сенсора) могут быть определены свои параметры передаваемых блоков (длина k, бит) и требования к качеству передачи. Например: среднее допустимое время старения данных $\overline{T_{дi}}$, с; допустимая вероятность потерь блоков данных $p_{дi}$, $i = \overline{1, M}$ и пр.

На вход источников нагрузки поступают бернуллиевские потоки пакетов данных с интенсивностью λ_i, $i = \overline{1, M}$, на интервалах T_0:

$$T_0 = 1/V_c,$$

где V_c – скорость передачи сигналов в физической среде, бит/с.

Для физической среды определены скорость передачи бит в среде V_c, б/с, и качество среды передачи (определяется вероятностью искажения 1 бита информации – p).

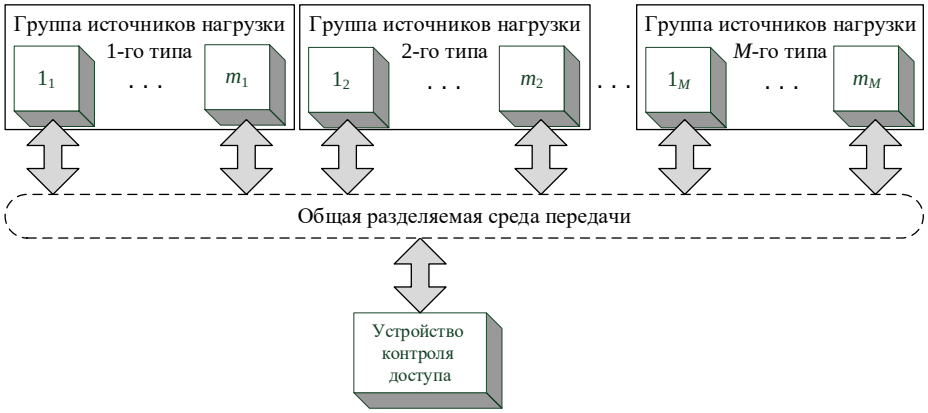

Рис. 3. Физическая структура сети корпоративного множественного доступа

Fig. 3. The Physical Structure of the Corporate Multiple Access Network

Предположим комбинированный метод разделения общего канала передачи: между группами источников нагрузки (между разными типами сенсоров) используется временно́е разделение, а внутри каждой группы – случайный синхронный доступ [17]. Для управления доступом источников нагрузки предусмотрено устройство контроля доступа (УКД), работающее в режиме временно́го разделения канала. УКД принимает запросы на передачу данных от источников нагрузки и отправляет ответ-разрешение на передачу с указанием числа временны́х окон, основываясь при принятии решения о выделении определенного числа окон для передачи данных в следующем цикле на текущем состоянии системы – на расчете используемого *общего критерия оптимальности*. Будем предполагать, что обмен служебными сообщениями между УКД и источниками нагрузки реализуется по отдельному каналу и в математической модели не учитывается.

Для реализации принципа корпоративного доступа используется процедура динамического регулирования. Предусматривается неравномерное распределение имеющихся в наличии временны́х окон. N – количество временны́х окон, доступных для передачи данных в цикле ($N > M$). Идея динамического регулирования доступом состоит в том, что для тех групп источников нагрузки, где требования к скорости / качеству передачи выше, в цикле предоставляется большее число временны́х окон для передачи. Для каждой группы источников нагрузки предоставляется минимум одно временно́е окно для передачи, а максимальное число окон, соответственно, равно ($N – M$). Распределение временны́х окон происходит *согласно общему критерию оптимальности*.

Длительность временны́х окон для передачи блоков данных будем считать постоянной и определим по выражению:

$$T_{ок} = kV_c^{-1}. \quad (1)$$

Математическая модель сети корпоративного множественного доступа

Математическая модель сети корпоративного множественного доступа представляется в виде совокупности моделей групп источников нагрузки ее составляющих [17]. Всего M групп для M типов источников нагрузки. Каждая группа источников

описана системой массового обслуживания *M/G/1* в дискретном времени на интервалах T_0 [18].

Блоки данных, поступающие от источников, считаются обслуженными, если:

– в них не обнаружено ошибки в результате применения помехоустойчивого кодирования (вероятность необнаружения ошибки $Q_к$):

$$Q_к = (1-p)^k; \quad (2)$$

– разрешен доступ источника к сети с вероятностью $q_{дi}$ (в соответствии с протоколом ССД):

$$q_{дi} = \frac{1}{m_i}, i = \overline{1,M}; \quad (3)$$

– отсутствовали мешающие воздействия других источников нагрузки того же типа, т. е. не было конфликтов при передаче (вероятность отсутствия мешающих воздействий других источников того же типа $Q_{мi}$):

$$Q_{мi} = (1-q_{дi}\Theta_i)^{m_i-1}, i = \overline{1,M}, \quad (4)$$

где Θ_i – вероятность занятости источника нагрузки *i*-го типа.

В противном случае доставка блока данных источником повторяется.

Используется временно́е разделение канала между группами источников нагрузки, но общее число выделяемых для передачи блоков данных временны́х окон (N) больше числа подсетей (M) и в цикле передачи источникам нагрузки определенного типа может выделяться j = 1, 2, … (N – M) временны́х окон.

В этом случае интервал однократной передачи блоков в интервалах T_0 в каждой группе будет определяться следующим образом:

$$C_i = \frac{Nk}{n_i}, \sum_i^M n_i = N, i = \overline{1,M}, \quad (5)$$

где k – длительность временно́го окна для передачи блока данных в интервалах T_0; n_i – число окон, выделенных для передачи блоков данных от источника *i*-го типа, $i = \overline{1,M}$.

z-преобразования рядов распределения (z-ппр) интервалов однократной передачи в интервалах T_0 для всех групп источников будут иметь вид:

$$g_{si}(z) = z^{-C_i}, \ i = \overline{1,M}, \quad (6)$$

Тогда z-ппр интервала обслуживания при передаче блоков данных от источников *i*-го типа в интервалах T_0 (для режима «бесконечное число переспросов») будет иметь вид:

$$g_i(z) = \frac{Q_{ci}}{z^{C_i} - P_{ci}}, \ Q_{ci} = q_{дi}Q_к Q_{мi}, \quad P_{ci} = 1 - Q_{ci}, i = \overline{1,M}, \quad (7)$$

где $Q_к$, $q_{дi}$ и $Q_{мi}$ определяется из (2, 3 и 4).

z-ппр интервала обслуживания при передаче блоков данных от источников *i*-го типа в интервалах T_0 (для режима «прямая передача без переспросов») будет иметь вид:

$$g_i(z) = g_{si}(z) = z^{-C_i}, \ i = \overline{1,M}, \quad (8)$$

где z-ппр времени задержки при передаче блоков данных от источников *i*-го типа:

$$f_i(z) = \frac{(1-\Theta_i)(1-z)g_i(z)}{1 - zp_i - q_i z g_i(z)}, q_i = \lambda_i T_0, \quad p_i = 1 - q_i, i = \overline{1,M}, \quad (9)$$

где $g_i(z)$ – z-ппр интервала обслуживания при передаче информации от источников нагрузки *i*-го типа определяется из (7) или (8) в зависимости от используемого режима передачи блоков данных.

Взаимовлияние групп различных типов источников нагрузки учитывается в системе уравнений интерференции:

$$\Theta_i = q_i\overline{n_{si}}, \overline{n_{si}} = g_i'(1) = (d/dz^{-1})g_i(z)|_{z=1}, \quad \Theta_i < 1, i = \overline{1,M}. \quad (10)$$

Подставив в (10) выражения (2, 3, 4 и 7) и упростив, найдем следующую систему уравнений для режима «бесконечное число переспросов»:

$$\Theta_i = \frac{q_i C_i}{Q_{ci}}, \ \Theta_i < 1, i = \overline{1,M}. \quad (11)$$

Подставив в (10) выражения (2, 3, 4 и 8) и упростив, найдем следующую систему уравнений для режима «прямая передача без переспросов»:

$$\Theta_i = q_i C_i, \Theta_i < 1, i = \overline{1,M}. \quad (12)$$

Вероятностно-временны́е характеристики

Среднее время задержки при передаче блоков данных *i*-й группы источников можно найти, используя формулу Хинчина – Полячека [19]:

$$\overline{t_i} = \overline{n_i}T_0, \overline{n_i} = g_i'(1) + \frac{q_i g''_i(1)}{2(1-\Theta_i)}, \quad g_i''(1) = (d/dz^{-2})g_i(z)|_{z=1}, \ \Theta_i < 1, i = \overline{1,M}. \quad (13)$$

Для режима «бесконечное число переспросов» в (13) надо подставить выражения (2, 3, 4, 7 и 11), а для режима «прямая передача без переспросов» в (13) надо подставить выражения (2, 3, 4, 8 и 12).

Выражения для расчета вероятности своевременной доставки блоков данных блоков данных *i*-й группы источников предлагаются для случая стохастического ограничения на время обслуживания блоков, при котором допустимые времена передачи блоков данных задаются геометрическими распределениями с параметрами $s_{дi}$, $i = \overline{1,M}$:

$$\Pi_i = f_q(z)\big|z = s_{дi}^{-1},\ s_{дi} = 1 - T_0/\overline{T_{дi}},\ i = \overline{1,M}, \quad (14)$$

где $\overline{T_{дi}},\ i = \overline{1,M}$ – средние допустимые времена старения блоков данных передаваемых источниками i-го типа; $f_q(z)$ z-прр времени задержки при передаче блоков данных определяется из (9).

Сформулируем задачу оптимизации

Предположим, что для M групп источников нагрузки внутри цикла опроса выделяется N временны́х окон, причем $N > M$. Поставим задачу оптимального распределения N временны́х окон между источниками нагрузки таким образом, чтобы средневзвешенная доля потери передаваемых блоков данных была минимальной.

Целевая функция принимает следующий вид:

$$\sum_{i=1}^{M} \frac{\lambda_i}{\lambda} Q_i(n_i) \to \min, \quad \sum_{i=1}^{M} \lambda_i = \lambda, \quad \sum_{i}^{M} n_i = N, \quad (15)$$

где $Q_i(n_i)$ – вероятность потери пакетов, поступающих от i-й группы источников нагрузки в случае выделения для этой группы n_i временны́х окон, определяется из выражения:

$$Q_i(n_i) = 1 - \Pi_i(n_i),\ i = \overline{1,M}. \quad (16)$$

где $\Pi_i(n_i)$ – вероятность своевременной безошибочной доставки пакетов, поступающих от i-й группы источников нагрузки в случае выделения для этой группы n_i временны́х окон, определяется из (14); дополнительно могут быть введены ограничения на количество временны́х окон выделяемых каждой группе источников нагрузки.

Задача оптимизации (15) относится к области динамического программирования и может быть решена [20, 21] при помощи рекуррентного уравнения Беллмана (в три этапа).

Решение задачи оптимизации.

Этап 1. Расчет всех возможных значений вероятностей потерь пакетов.

Этап 2. Построение графической модели задачи оптимизации.

Этап 3. Нахождение кратчайшего пути для построенного графа, совокупность ребер составляющих такой путь и будет решением задачи.

Численный пример решения задачи оптимизации

Исходные данные для расчетов:

$M = 3$ – число групп источников нагрузки;

$N = 5$ – число временны́х окон;

$m_i = 5, i = \overline{1,3}$ – число источников нагрузки в каждой группе;

предположим, что для каждой группы источников может быть выделено от 1 до 3-х временны́х окон, т. е. $n_i = \overline{1,3}, i = \overline{1,3}$;

$\lambda_i = 10$ блок/с $, i = \overline{1,3}$ – интенсивность входных потоков блоков данных для всех типов источников;

$k = 1024$ бит – длина передаваемых блоков данных;

$V_c = 10^6$ бит/с – скорость передачи;

$p = 10^{-7}$ – вероятность искажения 1 бит при передаче в физической среде;

$\overline{T_{д1}} = 0{,}5$ с – среднее допустимое время старения данных для источников нагрузки 1-й группы;

$\overline{T_{д2}} = 1$ с – среднее допустимое время старения данных для источников нагрузки 2-ой группы;

$\overline{T_{д3}} = 3$ с – среднее допустимое время старения данных для источников нагрузки 3-й группы.

Этап 1. Расчет всех возможных значений вероятностей потерь блоков данных производился по формулам, представленным выше. Результаты расчетов показаны в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов вероятностей потерь блоков данных

TABLE 1. Results of Calculations of Data Block Loss Probabilities

	$n_i=1, i = \overline{1,3}$	$n_i=2, i = \overline{1,3}$	$n_i=3, i = \overline{1,3}$
$Q_1(n_i)$	$Q_1(1) = 0{,}0913$	$Q_1(2) = 0{,}0322$	$Q_1(3) = 0{,}0197$
$Q_2(n_i)$	$Q_2(1) = 0{,}0477$	$Q_2(2) = 0{,}0163$	$Q_2(3) = 0{,}0099$
$Q_3(n_i)$	$Q_3(1) = 0{,}0164$	$Q_3(2) = 0{,}0055$	$Q_3(3) = 0{,}0033$

Этап 2. Представим все возможные варианты распределения временны́х окон в системе корпоративного множественного доступа в виде графа (рисунок 4). На графе $\hat{n}_i$ обозначено суммарное количество временны́х окон, выделяемых первой, второй … и i-й (в данном случае 3-й) группе источников нагрузки. Каждому ребру графа соответствует значение $Q_i(n_i)$ из таблицы 1.

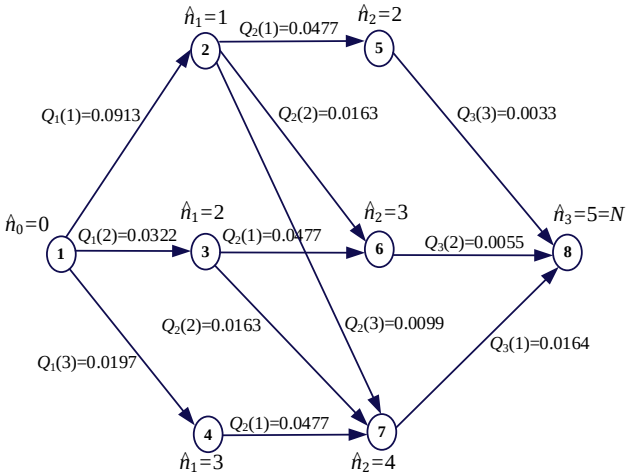

Рис. 4. Графическая модель задачи оптимизации

Fig. 4. Graphical Model of the Optimization Problem

Этап 3. Найдем кратчайший путь для построенного графа. Графическая модель (см. рисунок 4) показывает все возможные варианты распределения пяти временны́х окон между тремя группами источников нагрузки. Например, путь графа, который проходит через вершины 1–2–5–8, соответствует тому случаю, когда для 1-й группы источников нагрузки выделено одно временно́е окно для передачи, для 2-й – одно, а для 3-ей группы – три временны́х окна. Получаемая при этом средневзвешенная доля потери передаваемых блоков данных (15) определяется следующим образом:

$$\frac{10}{30}(0.0913 + 0.0477 + 0.0033) = 0{,}0474.$$

Таким образом, задача оптимизации сведена к поиску пути графа, имеющего минимальную длину из всех возможных. После того, как кратчайший путь будет найден, по ребрам, составляющим этот путь, можно определить искомое распределение временны́х окон между группами источников нагрузки.

В данном случае решением задачи оптимизации будет путь графа, проходящий через вершины 1–4–7–8. Получаемая при этом средневзвешенная доля потери передаваемых блоков данных будет наименьшей:

$$\frac{10}{30}(0.0197 + 0.0477 + 0.0164) = 0{,}0279.$$

Путь 1–4–7–8 соответствует случаю, когда для 1-й группы источников нагрузки выделено три временны́х окна для передачи, а для 2-ой и 3-й групп – по одному временно́му окну. Именно такое распределение временны́х окон между группами источников нагрузки даст наиболее эффективное разделение среды передачи с точки зрения выбранного для оптимизации критерия – средневзвешенной доли потери передаваемых блоков данных.

Заключение

В статье изложена концепция корпоративного алгоритма множественного доступа, которая состоит в отказе от принципа состязательности источников нагрузки в процессе разделения общей среды передачи. «Корпоративность» предполагает «справедливое распределение» канала передачи таким образом, чтобы данные, поступающие от всех источников нагрузки, собирались и передавались совместно без задержек (или без потерь). Для оценки качества функционирования системы корпоративного множественного доступа предлагается использовать общий критерий оптимальности. Это может быть: средневзвешенная доля принятых безошибочно и вовремя блоков данных, или средневзвешенное среднее время задержки передачи блоков данных, или средневзвешенная доля потерянных блоков данных. За основу корпоративного алгоритма множественного доступа взят комбинированный метод разделения общего канала передачи: между группами источников нагрузки используется временно́е разделение, а внутри каждой группы – случайный синхронный доступ.

В работе предложена математическая модель сети корпоративного множественного доступа, приведен метод расчета вероятностно-временны́х характеристик передачи блоков данных, а также сформулирована задача оптимизации. Выбор наилучшего режима работы сети доступа обеспечивает такое распределение временны́х окон между источниками нагрузки, при котором достигается экстремум общего критерия оптимальности.

Предложен трехэтапный алгоритм решения задачи оптимизации: расчет всех возможных значений выбранного критерия оптимизации, за который принята вероятность потерь блоков данных; построение графической модели задачи оптимизации; нахождение кратчайшего пути для построенного графа, совокупность ребер составляющих такой путь и будет решением задачи.

Представлены численные расчеты, которые иллюстрируют возможности применения рассмотренных в статье моделей, методов и алгоритмов.

Список источников

1. Аналитический отчет. Стратегии кибербезопасности. URL: https://www.infowatch.ru/sites/default/files/publication_file/analiticheskiy-otchet-strategii-kiberbezopasnosti.pdf (дата обращения 18.06.2025)

2. ISO/IEC 27032:2023. Cybersecurity – Guidelines for Internet security. 2023. URL: https://www.iso.org/standard/76070.html (Accessed 18.06.2025)

3. Digital 2024: Global Overview Report // Kepios. 2024. URL: https://datareportal.com/reports/digital-2024-global-overview-report (Accessed 18.06.2025)

4. Верзун Н.А., Колбанёв М.О. Глава 5. Модели опасности доступа в киберпространстве // Модели цифровой опасности в кибернетическом и когнитивном пространствах. СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет. 2023. С. 93–123. EDN:AAHVOZ

5. Vaezi M., Ding Z., Poor H.V. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond. Cham: Springer, 2019. DOI:10.1007/978-3-319-92090-0

6. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б., Панкратов Д.Ю, Смирнов А.Э. Многостанционный доступ в системах связи пятого и последующих поколений // Электросвязь. 2022. № 5. С. 16–21. DOI:10.34832/ELSV.2022.30.5.002. EDN:KCCLIL

7. Basharat M., Ejaz W., Naeem M., Khattak A.M., Anpalagan A. A survey and taxonomy on nonorthogonal multiple-access schemes for 5G networks // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2018. Vol. 29. Iss. 1. P. e3202. DOI:10.1002/ett.3202

8. Росляков А.В. Сети фиксированной связи пятого поколения. М.: ООО «ИКЦ «Колос-с», 2024. 232 с. EDN:DXGSFN

9. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 3. С. 608–617. DOI:10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617. EDN:JWPOKM

10. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Маколкина М.А., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Дунайцев Р.А. и др. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1–12. DOI:10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12. EDN:LHLYEM

11. Захаров М.В., Киричек Р.В. Методы построения сверхплотной сети e-health с использованием граничных вычислений // 75-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. С. 145–147. EDN:XVIGBJ

12. Росляков А.В., Герасимов А.В. Детерминированные сети связи и их стандартизация. // Стандарты и качество. 2024. № 7. С. 42–47. DOI:10.35400/0038-9692-2024-7-70-24. EDN:UTBDXB

13. Verzun N., Kolbanev M., Shamin A. The Architecture of the Access Protocols of the Global Infocommunication Resources // Computers. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P.49. DOI:10.3390/computers9020049. EDN:KJCHRF

14. Verzun N., Kolbanev M., Vorobeva D. Access Control Model to Global Infocommunication Resources // Proceedings of The Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems (Saint Petersburg, Russian Federation, 12–13 December 2019). Vol. 11. Saint Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research University ITMO" Publ., 2020. PP. 218–221. EDN:RDFFNM

15. Маракулин В.М. Элементы теории кооперативных игр. URL: http://old.math.nsc.ru/~mathecon/Marakulin/CooGAMES.pdf (дата обращения 18.06.2025)

16. Гезалов Э.Б. Модель неоднородной локальной сети связи с протоколом синхронного временного доступа с учетом надежности ее элементов // T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2021. Т. 15. № 3. С. 25–29. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-2-25-29. EDN:WDTOSM

17. Верзун Н.А., Воробьёв А.И., Пойманова Е.Д. Моделирование процесса передачи информации с разграничением прав доступа пользователей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 9. С. 33–37. EDN:SMPASB

18. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера. 2003. 512 с.

19. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988. 208 с.

20. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. Пер. с англ. М.: Наука, 1965.

21. Рачков М.Ю. Оптимальное управление в технических системах. М.: Юрайт, 2023. 120 с.

References

1. *Analytical report. Cybersecurity strategies*. (in Russ.) URL: https://www.infowatch.ru/sites/default/files/publication_file/analiticheskiy-otchet-strategii-kiberbezopasnosti.pdf. [Accessed 18.06.2025]

2. ISO/IEC 27032:2023. *Cybersecurity – Guidelines for Internet security*. 2023. URL: https://www.iso.org/standard/76070.html [Accessed 18.06.2025]

3. Digital 2024: Global Overview Report // Kepios. 2024. URL: https://datareportal.com/reports/digital-2024-global-overview-report (Accessed 18.06.2025)

4. Verzun N.A., Kolbanev M.O. Chapter 5. Models of access hazards in cyberspace. *In: Models of digital danger in cybernetic and cognitive spaces.* St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics Publ.; 2023. p.93–123. (in Russ.) EDN:AAHVOZ

5. Vaezi M., Ding Z., Poor H.V. *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Cham: Springer; 2019. DOI:10.1007/978-3-319-92090-0

6. Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.K., Kreindelin V.B., Mironov Yu.B., Pankratov D.Yu., Smirnov A.E. Multiple Access Schemes for 5G And Next Generations Communication Systems. *Electrosvyaz.* 2022;5:16–21. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.30.5.002. EDN:KCCLIL

7. Basharat M., Ejaz W., Naeem M., Khattak A.M., Anpalagan A. A survey and taxonomy on nonorthogonal multiple-access schemes for 5G networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2018;29(1):e3202. DOI:10.1002/ett.3202

8. Roslyakov A.V. *Fifth–Generation Fixed-Line Networks*. Moscow: Kolos-S Publ.; 2024. 232 p. (in Russ.) EDN:DXGSFN

9. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2023;23(3):608–617 (in Russ.) DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617. EDN:JWPOKM

10. Koucheryavy A., Paramonov A., Makolkina A., Muthanna A. S. A., Vybornova A., Dunaytsev R., et al. 3 Dimension Multilayer Heterogenous Ultra Dense Networks. *Telecom IT*. 2022;10(3):1–12. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-1-12. EDN:LHLYEM

11. Zakharov M.V., Kirichek R.V. Methods of building a super-dense e-health network using edge computing. *Proceedings of the 75th Scientific and Technical Conference of the St.* Petersburg NTO RES named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day. Saint-Petersburg: SPbSETU "LETI" Publ.; 2020. p.145–147. (in Russ.) EDN:XVIGBJ

12. Roslyakov A.V., Gerasimov A.V. Deterministic Networks and Their Standardization. *Standards and Quality.* 2024;7:42-47. (in Russ.) DOI:10.35400/0038-9692-2024-7-70-24. EDN:UTBDXB
13. Verzun N., Kolbanev M., Shamin A. The Architecture of the Access Protocols of the Global Infocommunication Resources. *Computers*. 2020;9(2):49. DOI:10.3390/computers9020049. EDN:KJCHRF
14. Verzun N., Kolbanev M., Vorobeva D. Access Control Model to Global Infocommunication Resources. *Proceedings of the Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems, 12–13 December 2019, Saint Petersburg, Russian Federation, vol.11.* Saint Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research University ITMO" Publ.; 2020. p.218–221. EDN:RDFFNM
15. Marakulin V.M. *Elements of the theory of cooperative games*. (in Russ.) URL: http://old.math.nsc.ru/~mathecon/Marakulin/CooGAMES.pdf [Accessed 18.06.2025]
16. Gezalov E.B. Model of heterogeneous local communication network with synchronous time access protocol, considering the reliability of its elements. *T-Comm.* 2021;15(3):25–29. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-2-25-29. EDN:WDTOSM
17. Verzun N.A., Vorobyov A.I., Poimanova E.D. Modeling information transfer process in network with access rights differentiation. *Journal of Instrument Engineering*. 2014;57(9):33–37. (in Russ.) EDN:SMPASB
18. Vishnevsky V.M. *Theoretical foundations of computer network design*. Moscow: Technosphere Publ.; 2003. p. 512. (in Russ.)
19. Wentzel E.S. *Investigation of surgery. Tasks, principles, methodology*. Moscow: Nauka Publ.; 1988. 208 p. (in Russ.)
20. Bellman R., Dreyfus S. *Applied Dynamic Programming*. Princeton: University Press; 1962. DOI:10.1515/9781400874651
21. Rachkov M.Y. *Optimal control in technical systems*. Moscow: Yurait Publ.; 2023. 120 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 28.05.2025; принята к публикации 04.06.2025.
The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 28.05.2025; accepted for publication 04.06.2025.

Информация об авторах:

ВЕРЗУН Наталья Аркадьевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
https://orcid.org/0000-0002-0126-2358

КОЛБАНЁВ Михаил Олегович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
https://orcid.org/0000-0003-4825-6972

СОВЕТОВ Борис Яковлевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
https://orcid.org/0000-0003-3116-8810

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.
The authors declare no conflicts of interests.