

УДК 004.724.4

## АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ АЛГОРИТМОВ ДОСТУПА К СРЕДЕ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ

Казakov М.Ф., Казakov Ф.А., Сиротинина Н.Ю.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск,  
e-mail: fkazakov@sfu-kras.ru

В современных информационных системах различных автономных технических объектов прослеживаются тенденции увеличения числа компонентов бортовой аппаратуры, это приводит к усложнению бортовой сети передачи данных. При использовании традиционных интерфейсов резко возрастает число кабельных линий и общий вес системы. Одним из вариантов решения данной проблемы может быть использование беспроводных технологий передачи данных. Использование среды общего доступа в беспроводных сетях делает их характеристики зависимыми от большого числа условий, например числа активных узлов. В работе рассматривается влияние различных алгоритмов управления доступом к среде на технические характеристики системы. Оценивается возможность применения отдельных алгоритмов для построения бортовых беспроводных сетей. На основе анализа качественных показателей выделяются два наиболее перспективных и проводится их моделирование в среде OMNeT++. Показано изменение их характеристик при росте числа активных узлов. Сделаны выводы о возможности использования в беспроводных сетях автономных объектов. Результаты моделирования отражают преимущества отдельных алгоритмов при разном количестве узлов. Это позволяет сделать вывод о перспективности дальнейших исследований с целью построения комбинированного алгоритма, который бы сочетал лучшие свойства каждого алгоритма.

**Ключевые слова:** беспроводные бортовые сети, методы управления доступом к среде, TDMA, CSMA/CA, имитационное моделирование, OMNeT++

## ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THE ENVIRONMENTAL ACCESS ALGORITHMS FOR THE CONSTRUCTION OF WIRELESS ON-BOARD NETWORKS

Kazakov M.F., Kazakov F.A., Sirotinina N.Yu.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: fkazakov@sfu-kras.ru

In modern information systems of various autonomous technical objects, there is a tendency to an increase in the number of components of on-board equipment, this leads to a complication of the on-board data transmission network. Using traditional interfaces dramatically increases the number of cable lines and the overall weight of the system. One of the options for solving this problem may be the use of wireless data transmission technologies. The use of a shared medium in wireless networks makes their performance dependent on a large number of conditions, such as the number of active nodes. The paper examines the influence of various algorithms for controlling access to the environment on the technical characteristics of the system. The possibility of using individual algorithms for building on-board wireless networks is being evaluated. Based on the analysis of qualitative indicators, two of the most promising are identified and simulated in the OMNeT++ environment. The change in their characteristics is shown with an increase in the number of active nodes. Conclusions are made about the possibility of using autonomous objects in wireless networks. The simulation results reflect the advantages of individual algorithms for different numbers of nodes. This allows us to conclude that further research is promising in order to build a combined algorithm that would combine the best properties of each algorithm.

**Keywords:** wireless on-board networks, media access control techniques, TDMA, CSMA/CA, simulation, OMNeT++

В современных информационных системах различных автономных технических объектов – от автомобиля до космического аппарата – прослеживаются тенденции увеличения числа компонентов бортовой аппаратуры, расширения перечня исполняемых функций и увеличения объема информации, транслируемой от одних подсистем к другим. Следствием этого является усложнение бортовой сети передачи данных. В случае проводной сети это приводит к увеличению массы кабельной системы, которая может составлять до 20% от общей массы и стоимости автономных систем [1]. Проблема становится еще более значимой для объектов ответственного применения, когда вследствие особых условий эксплуатации и повышенных требований к надеж-

ности сети передачи данных дублируются, для них применяются кабели и разъемы с повышенными характеристиками, содержащие дорогостоящие материалы, такие как золото или платина.

Решением данной проблемы может быть использование беспроводных технологий передачи данных, которые позволят избавиться от кабельной системы. Однако использование беспроводного канала в этом случае имеет определенные особенности, обусловленные тем, что для бортовых сетей важно обеспечивать заданные временные параметры вне зависимости от условий функционирования, объема генерируемого трафика и числа участвующих в обмене узлов. В беспроводных сетях обмен данными происходит в среде общего доступа,

при этом в каждый момент времени передача может вестись только одним узлом. Попытка одновременной передачи несколькими участниками приводит к коллизиям, повторным передачам, задержкам и потерям пакетов. Чем больше узлов в сети, тем более остро стоит данная проблема. Для ее решения используются различные методы разделения доступа к среде, относящиеся к подуровню MAC канального уровня.

Выделяют пять основных методов управления доступом к среде: множественный доступ с частотным разделением каналов (FDMA), множественный доступ с кодовым разделением каналов (CDMA), множественный доступ с временным разделением каналов (TDMA), множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA) и множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий (CSMA/CD).

Необходимо сравнить и оценить применимость основных принципов построения протоколов MAC уровня для построения бортовых сетей автономных систем.

#### *Краткое описание сравниваемых алгоритмов*

FDMA – один из наиболее распространенных методов аналогового множественного доступа, реализуемый за счет выделения своего частотного диапазона каждому узлу. Полоса частот разделена на каналы с равной шириной полосы [2, 3]. Определенная полоса частот назначается одному узлу, она согласуется путем прослушивания каждой частоты на принимающей стороне. Между соседними спектрами сигналов используются защитные полосы, чтобы минимизировать перекрестные помехи между каналами. Данный метод часто используется в аналоговых мобильных телефонах.

К преимуществам FDMA можно отнести:

- относительную простоту реализации;
- возможность гибкой конфигурации, которая позволяет регулировать качество аналогового сигнала за счет скорости передачи данных;

- небольшое количество битов, требуемое для синхронизации, поскольку передача является непрерывной.

Недостатками FDMA считаются:

- сложность схемотехнической реализации и, следовательно, увеличение стоимости за счет использования узкополосных фильтров, которые не могут быть реализованы в СБИС;

- зависимость повышения пропускной способности от снижения отношения сигнал/помеха или от отношения сигнал/шум;

- максимальная скорость передачи на канал фиксирована и невелика;

- потеря мощности из-за необходимости защитных полос;

- ограничения на максимальное число узлов, участвующих в обмене.

TDMA – это метод доступа к каналу для сетей с общей средой, реализуемый за счет выделения каждому узлу своего временного интервала (слота) фиксированной продолжительности. TDMA используется в цифровых системах мобильной радиосвязи.

Метод позволяет без помех использовать одну и ту же частоту многим пользователям, синхронизируя время передачи для каждого узла в рамках общего расписания. В большинстве случаев на передачу информации узлу выделяется не вся полоса пропускания системы, а определенный ее диапазон, при этом в каждом диапазоне независимо друг от друга используется свое расписание. Системы, в которых используется данный метод, называются системами с несколькими несущими [4, 5]. TDMA требует точной синхронизации времени между приемником и передатчиком.

Преимущества TDMA:

- гибкая настройка скорости передачи за счет выделения одному узлу нескольких слотов;

- предсказуемость изменений и стабильность временных характеристик канала;

- простота аппаратной реализации, так как метод не требует сложных аналоговых решений.

Недостатки TDMA:

- сложность алгоритмов динамического распределения временных интервалов, преимущественно используемая в сетях с централизованным управлением;

- большого количества дополнительных битов для синхронизации и контроля из-за пакетного режима;

- необходимость синхронизации времени в сети, например, путем передачи текущего времени узла в каждом слоте;

- сложная обработка сигналов для синхронизации в короткие промежутки времени.

CDMA позволяет различным узлам занимать один канал передачи, используя различные алгоритмы кодирования сигнала. Эта технология обычно используется в сотовых телефонных системах сверхвысоких частот. При этом каждый узел имеет доступ ко всей полосе пропускания все время, а разделение среды осуществляется за счет того, что каждому источнику информации назначается индивидуальный код, при помощи которого он кодирует передаваемое сообщение. Информационный сигнал ко-

дируется, затем смешивается с несущей, спектр которой предварительно расширяется перемножением с сигналом источника псевдослучайного шума. Приемник информации также знает этот код, и его задача состоит в том, чтобы выделить закодированное сообщение нужного отправителя из общего потока сообщений [6, 7].

Преимущества CDMA:

- незначительное взаимное влияние при одновременной работе нескольких абонентов в одной и той же полосе частот;
- высокая помехозащищенность в условиях мощных импульсных (узкополосных) помех, так как такая помеха поражает только часть спектра полезного сигнала и ее можно подавить фильтром;
- отсутствие необходимости решать проблему распределения частот между абонентами, так как все абоненты работают в одной и той же полосе частот.

Недостатки CDMA:

- сложность высокочастотного тракта для обеспечения требуемой скорости передачи на заданном расстоянии;
- необходимость тщательного контроля мощности передачи для выравнивания уровня сигналов всех узлов в пределах сети;
- требуется высокоточная кодовая синхронизация для восстановления исходного сигнала основной полосы частот;
- ухудшение параметров работы сети с увеличением количества узлов.

CSMA/CD – технология множественного доступа к общей передающей среде в случайные моменты времени с контролем коллизий. Узел прослушивает и определяет, занят ли общий канал для передачи данных, в случае занятости откладывает передачу до тех пор, пока канал не освободится. В процессе передачи узлы также прослушивают среду, отслеживая наличие переданной информации от других узлов сети для определения коллизий. При ее обнаружении узел прекращает передачу и запускает алгоритм разрешения коллизий [8, 9].

Алгоритм заключается в том, что узел продолжает передачу текущего кадра в течение определенного промежутка времени вместе с сигналом помехи, чтобы гарантировать, что все другие узлы обнаружат коллизию, после чего увеличивает счетчик повторных передач. Если достигается максимальное количество попыток повторной передачи, узел прерывает передачу. В противном случае узел ожидает периода отсрочки передачи, который обычно зависит от количества коллизий, и перезапускает основной алгоритм.

Преимущества CSMA/CD:

- высокий процент передаваемой полезной информации по отношению к служебной;

- возможность при отсутствии коллизий использования всей возможной пропускной способности канала.

Недостатки CSMA/CD:

- значительное снижение производительности сети при возрастании интенсивности передачи несколькими узлами за счет увеличения количества коллизий;
- снижение производительности сети в геометрической прогрессии по мере добавления узлов участвующих в передаче;
- отсутствие возможности приоритизации узлов.

Множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA) – технология множественного доступа к общей передающей среде в случайные моменты времени с предотвращением коллизий. В отличие от CSMA/CD, CSMA/CA предотвращает коллизии до их возникновения путем предварительного прослушивания среды и подачи защитного сигнала [10, 11].

Алгоритм предотвращения коллизий CSMA/CA состоит в следующем. Когда кадр готов к передаче, узел проверяет, свободен канал или нет. Если канал занят, узел ждет, пока канал освободится. Если канал свободен, узел передает защитный сигнал и ожидает определенный промежуток времени, после чего выполняет передачу. После отправки кадра узел запускает таймер и ожидает подтверждения от приемника. Если подтверждение получено до истечения таймера, то передача прошла успешно. В противном случае узел ожидает периода отсрочки и перезапускает алгоритм.

Преимущества CSMA/CA:

- предотвращение коллизии;
- благодаря подтверждению передачи контролируется факт успешной передачи данных.

Недостатки CSMA/CA:

- снижение производительности с ростом количества передающих узлов в сети из-за увеличения вероятности коллизий;
- снижение производительности сети при наличии узлов с низкой пропускной способностью;
- высокое энергопотребление.

#### *Анализ возможности применения рассмотренных методов в бортовых сетях*

Описанные выше методы разделения доступа к радиоканалу обеспечивают приемлемые характеристики в широко распространенных бытовых беспроводных сетях. Однако возможность их применения в бортовых сетях требует тщательного анализа с учетом специфики их организации

и требований к временным и надежностным характеристикам.

Методы, которые связаны со сложной организацией высокочастотного тракта (FDMA, CDMA), не являются перспективными для применения в области бортовых сетей из-за низкой помехоустойчивости, ограничения максимального количества узлов, участвующих в передаче данных, сложности аппаратной реализации.

При реализации методов CSMA/CA и CSMA/CD и TDMA используются алгоритмические решения, которые не приводят к повышению сложности аппаратуры, поэтому они могут рассматриваться как основа для разработки специализированных протоколов для бортовых сетей [12].

Бортовые сети отличаются большим количеством узлов и высокой плотностью их размещения. Режимы активности узлов также изменяются в широком диапазоне. Протокол, используемый при построении бортовых сетей, должен обеспечивать высокую производительность при активности небольшого числа узлов и показывать удовлетворительные характеристики при пиковых нагрузках.

#### Сравнение протоколов

На основе анализа алгоритмов работы протоколов можно оценить изменения основных характеристик при росте числа узлов.

Основные качественные характеристики протоколов приведены в табл. 1.

Для более точной оценки и получения количественных результатов необходимо произвести моделирование.

#### Моделирование протоколов TDMA и CSMA/CA

Для сравнения работы TDMA и CSMA/CA в различных условиях функционирования, в том числе и в критических ситуациях, была разработана программная имитационная модель. В качестве инструментального средства выбрана среда имитационного моделирования OMNeT++. Основной целью проведения моделирования являлась оценка влияния числа активных узлов сети на ее временные характеристики.

Для создания тестовой нагрузки в модели используются узлы, генерирующие в заданный интервал времени (200 с) одинаковый по характеристикам трафик, что обеспечивает в среднем равное количество пакетов отправляемых узлом. Чтобы избежать эффекта наложения симметричного трафика, который возникает при его использовании в постоянных характеристиках и приводит к некорректным результатам моделирования, интервал отправки пакетов изменяется случайным образом по экспоненциальному закону распределения с математическим ожиданием 3 с. При моделировании число узлов изменялось от 1 до 40 с шагом 5.

Данный эксперимент позволяет выполнить сравнительную оценку характеристик различных алгоритмов доступа при возрастающей нагрузке на сеть.

В табл. 2 приведены результаты моделирования сети для выбранных протоколов. При моделировании CSMA/CA не учитывались ограничения на длину очереди на сетевых интерфейсах узлов и моделирование завершалось, когда очереди пакетов полностью обрабатывались.

Таблица 1

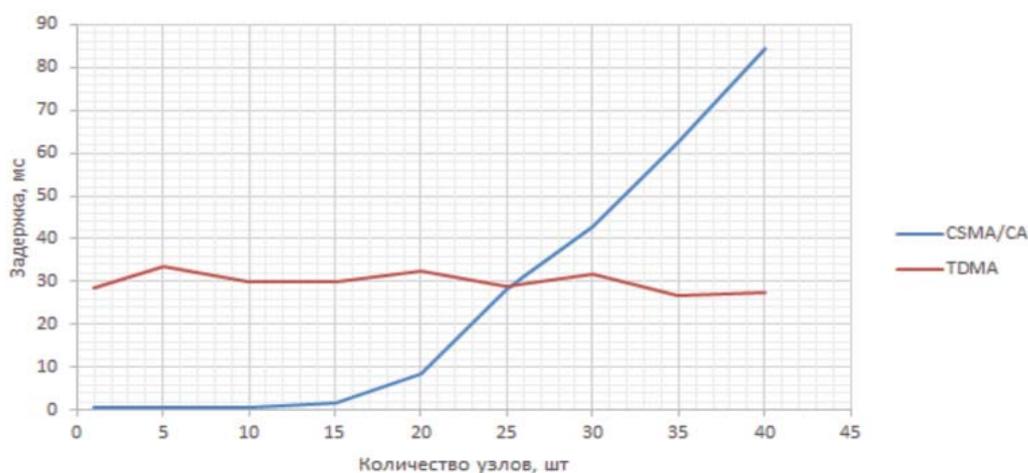
Сравнение характеристик

Характеристики	CSMA/CA	CSMA/CD	TDMA
Управление конфликтами	Первоначально узел передает защитный сигнал, после ожидания отправляет данные	Повторно отправляет кадр данных в случае возникновения коллизии во время передачи	Синхронизация времени работы всех устройств до начала передачи
Возможность динамического изменения сети	Высокая	Высокая	Ограниченная
Эффект ошибки передачи пакета	Задержка	Низкий	Задержка
Зависимость характеристик от количества узлов	Высокая	Высокая	Низкая
Синхронизация	Не требуется	Не требуется	Критичная
Потребляемая мощность	Высокая	Высокая	Низкая
Стандарты IEEE	Является частью стандарта IEEE 802.11	Является частью стандарта IEEE 802.3	Включен в несколько стандартов (напр: IEEE 802.11, IEEE 802.16a)

Таблица 2

Результаты моделирования

Количество узлов	Общее кол-во пакетов	Среднее кол-во пакетов на узел	Общее время передачи	Средняя длина очереди	Задержка
CSMA/CA					
1	70	70	199,2	1	0,5
5	356	71,2	200,1	1,6	0,6
10	685	68,5	200,9	2,1	0,8
15	1030	68,7	203,8	2,9	1,6
20	1314	65,7	228,0	7,5	8,4
25	1714	68,6	275,8	16,6	28,2
30	1992	66,4	294,9	21,6	42,9
35	2303	65,8	349,7	26,5	62,4
40	2712	67,8	392,6	32	84,3
TDMA					
1	70	70	238,2	13	28,7
5	356	71,2	254,2	16,8	33,7
10	685	68,5	264,3	14,9	30,1
15	1039	69,3	267,2	15,4	29,8
20	1359	67,9	287,5	15,6	32,4
25	1665	66,6	286,2	14,8	29,0
30	2061	68,7	280,5	16,1	31,6
35	2343	66,9	280,1	14,3	26,7
40	2656	66,4	308,1	14,9	27,3



Задержка при передаче

На рисунке изображен график, отражающий зависимость между количеством узлов, участвующих в передаче данных, и задержкой прохождения пакета, от генерации на узле, передающем информацию, до появления на принимающей стороне.

Для алгоритма CSMA/CA полученные результаты подтверждают предположение, что при минимальном числе узлов (до 20) задержка при передаче пакетов незначительна (по результатам моделирования в преде-

лах 10 мс), однако при дальнейшем росте числа активных узлов значительно растет.

Для алгоритма TDMA задержка приближенно равна 30 мс для всех значений количества узлов. Это объясняется тем, что при моделировании использовалось фиксированное значение временных интервалов в одном цикле. Для обеспечения работоспособности алгоритма TDMA число временных интервалов было равно максимальному числу узлов.

Результат моделирования показал, что при небольшом количестве активных узлов сеть с использованием протокола CSMA/CA показывает лучшие характеристики, чем построенная с использованием TDMA. Однако при росте числа узлов ситуация меняется и более предпочтительным выглядит протокол TDMA.

#### Заключение

Выбор протоколов CSMA/CA либо TDMA как единственного базового протокола снижает производительность сети при крайних значениях числа активных узлов.

Для оптимизации характеристик сети в такой ситуации необходимо либо выбрать протокол доступа к среде в зависимости от конкретных требований к общим условиям функционирования устройства в целом, либо, что более перспективно, создать модифицированный протокол, совмещающий в себе преимущества различных методов доступа к среде.

#### Список литературы

1. Magness R. A comparison of can and bluetooth protocols a study for application of can over bluetooth for wireless on-board data handling for a spacecraft sensor network: DASIA of ESA Special Publication. 2003. 532 p.

2. Pan Haoyuan & Liew Sounng Chang. Information Update: TDMA or FDMA? IEEE Wireless Communications Letters. 2020. P. 1–1. DOI: 10.1109/LWC.2020.2973384.

3. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. 2-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2006. 288 с.

4. Cionca Victor & Neue, Thomas & Ilat, Dadã. TDMA Protocol Requirements for Wireless Sensor Networks. Sensor Technologies and Applications. 2008. P. 30–35. DOI: 10.1109/SENSORCOMM.2008.69.

5. Ergen S.C., Varaiya P. TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks. Wireless Netw. 2010. № 16. P. 985–997. DOI: 10.1007/s11276-009-0183-0.

6. Аль Мафтул О.А. Принципы работы CDMA // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2016. № 10. С. 218–220.

7. Васильев К.К. Прием сигналов с дискретным временем: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 104 с.

8. Денисенко В.В., Киреева К.А., Борникова Е.М. Метод управления обменом CSMA/CD // Аллея науки. 2018. № 7 (23). С. 948–951.

9. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2016. 960 с.

10. Хабаров С.П., Думов М.И. Анализ работы протокола CSMA/CA в среде omnet++ с использованием inet framework // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. № 5. С. 692–700.

11. Оруджева М.Я. Модели беспроводных локальных сетей с методом коллективного доступа CSMA/CA // Телекоммуникации. 2010. № 6. С. 15–18.

12. Laufer Rafael & Kleinrock L. The Capacity of Wireless CSMA/CA Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking (to appear). 2015. DOI: 10.1109/TNET.2015.2415465.