

# Множественный доступ в сетях IEEE 802.11ad: открытые задачи и подходы к их решению\*

Артем Красилов, Антон Кирьянов, Евгений Хоров

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской  
академии наук (ИППИ РАН)  
{krasilov,kiryanov,khorov}@iitp.ru

**Аннотация** Одним из перспективных подходов к увеличению скорости передачи данных в беспроводных сетях следующих поколений, является использование диапазонов частот более 60 ГГц. Опубликованный в 2012 г. стандарт IEEE 802.11ad, определяющий принципы работы сетей Wi-Fi в диапазоне частот 60 ГГц, вводит новый метод доступа к беспроводному каналу. При этом стандарт определяет лишь базовые правила, по которым устройства сети могут получать доступ к каналу, но не определяет когда и какой объем канальных ресурсов необходимо выделить каждому устройству. В данной работе проведен анализ открытых задач, возникающих при использовании нового метода доступа для обслуживания различных типов трафика, а также приведен обзор возможных подходов к решению этих задач.

**Ключевые слова:** IEEE 802.11ad, множественный доступ, управление радиоресурсами, качество обслуживания, детерминированный доступ, случайный доступ

## 1 Введение

Одним из ключевых факторов, определяющим развитие беспроводных сетей, является все увеличивающаяся потребность пользователей в скорости передачи данных. Такая потребность вызвана как экспоненциальным ростом числа самих пользователей, так и увеличивающимся объемом данных, генерируемых современными приложениями [1]. Предполагается, что скорости передачи данных в сетях пятого поколения (5G), появление которых ожидается к 2020 году, должны достигать десятков, сотен гигабит в секунду.

Увеличение скорости передачи данных в двух доминирующих на сегодняшний день технологиях Wi-Fi и LTE достигалось с использованием следующих подходов, применяемых на физическом уровне. Во-первых, за счет введения новых сигнально-кодовых конструкций (СКК) повышалась спектральная эффективность использования частотно-временных ресурсов бес-

---

\* Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00150).

проводного канала. Во-вторых, увеличилась ширина используемых частотных каналов. В-третьих, были разработаны методы пространственного кодирования сигнала (Multiple Input Multiple Output, MIMO), которые за счет использования нескольких антенн на передающем и принимающем устройствах, позволяют увеличить число пространственных каналов, а, следовательно, и скорость передачи данных. Отметим, что дальнейшее применение данных подходов не позволит существенным образом увеличить пропускную способность сетей, работающих в традиционных диапазонах частот менее 6 ГГц (напомним, что современные сети Wi-Fi работают преимущественно в нелицензируемых диапазонах частот 2,4 и 5 ГГц, а сети LTE в лицензируемых диапазонах частот от 800 МГц до 2.7 ГГц). Связано это со следующими причинами. Во-первых, существующие СКК обеспечивают спектральную эффективность близкую к границе Шенона. Во-вторых, частотные ресурсы в диапазоне частот менее 6 ГГц ограничены, что позволяет использовать каналы шириной не более нескольких сотен МГц. В-третьих, использование более 8 пространственных каналов становится едва возможным ввиду ограничения на размеры устройства (расстояние между антеннами должно быть порядка длины волны).

Одним из перспективных подходов к увеличению скорости передачи данных в беспроводных сетях следующих поколений является использование диапазона частот 60 ГГц, в котором доступны каналы шириной в несколько ГГц. Так, в 2012 г. был опубликован новый стандарт IEEE 802.11ad [2], описывающий модификацию технологии Wi-Fi для работы в диапазоне частот 60 ГГц. Даже при отсутствии методов MIMO и использовании только одного частотного канала шириной 2,2 ГГц, IEEE 802.11ad обеспечивает скорость передачи данных около 7 Гбит/с на расстоянии до десяти метров. Такие показатели позволяют применять IEEE 802.11ad для построения высокоскоростных персональных сетей. В настоящее время в комитете по стандартизации локальных и городских сетей IEEE 802 LMSC создана рабочая группа IEEE 802.11ay [3], задачей которой является увеличение скорости передачи до 20-40 Гбит/с и зоны покрытия сети до 500 м. Для достижения этой цели планируется использовать описанные выше методы MIMO, методы агрегации каналов, а также новые СКК, обладающие большей спектральной эффективностью, чем в IEEE 802.11ad [4].

Переход из диапазона частот 5 ГГц в диапазон 60 ГГц приводит к необходимости изменения принципов работы как физического, так и канального уровней. В частности, увеличение частоты сигнала более чем в 10 раз, ведет к увеличению ослабления силы сигнала более чем на 20 дБ. Кроме того, миллиметровые волны имеют существенно более высокий коэффициент поглощения по сравнению с сантиметровыми волнами. В связи с этим, для обеспечения приемлемой зоны покрытия сети и высокой скорости передачи данных, в стандарте IEEE 802.11ad используются направленные передачи. Использование миллиметровых длин волн позволяет создавать антенные решетки, имеющие сравнительно малые размеры, с помощью которых можно формировать достаточно узкий пучок радиоволн. Например, антенная

решетка размером  $2 \times 8$  занимает площадь менее  $1 \text{ см}^2$  и позволяет формировать пучок радиоволн шириной порядка  $10^\circ$  [5].

Так как в сетях IEEE 802.11ad передачи являются направленными, разработчиками стандарта был изменен метод множественного доступа к каналу. Базовым методом доступа в сетях Wi-Fi является метод случайного множественного доступа с прослушиванием несущей и предотвращением коллизий (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, CSMA/CA). Метод CSMA/CA разрабатывался в предположении, что все устройства используют всенаправленные антенны и слышат передачу друг друга. В случае же направленных передач большинство устройств сети не слышат передачу другого устройства, что приводит к высокой вероятности коллизий, а, следовательно, к низкой вероятности успешной доставки данных. По этой причине, в стандарте IEEE 802.11ad метод CSMA/CA был заменен на новый метод множественного доступа с временным разделением (Time Division Multiple Access, TDMA). Доступ устройств к беспроводному каналу осуществляется в заранее выделенных временных интервалах, согласованных с центральным устройством, называемым координатором сети. Отметим, что стандарт описывает лишь базовые правила, по которым устройства могут согласовать передачу данных с координатором. Однако не описывает алгоритмы управления радиоресурсами, т.е. правила, по которым определяется в какой момент времени и какой объем канальных ресурсов необходимо выделить каждому устройству в зависимости от обслуживаемого этим устройством трафика и условий в беспроводном канале. Эти алгоритмы в конечном итоге оказывают прямое влияние на производительность сети. Целью данной работы является анализ открытых задач, возникающих при использовании нового метода доступа для обслуживания различных типов трафика, в том числе, трафика реального времени, предъявляющего жесткие требования к качеству обслуживания, а также поиск возможных решений этих задач.

Дальнейшее изложение работы построено следующим образом. В разделе 2 приведено краткое описание нового метода множественного доступа, введенного в стандарте IEEE 802.11ad. В разделе 3 анализируются открытые задачи, возникающие при управлении радиоресурсами в сетях IEEE 802.11ad, а также обсуждаются возможные подходы к решению этих задач. В разделе 4 резюмируются основные результаты работы.

## 2 Множественный доступ

Множественный доступ в сетях IEEE 802.11ad основан на методе множественного доступа с временным разделением TDMA. Временная шкала делится на интервалы одинаковой длительности, называемые бикон-интервалами. В свою очередь каждый бикон-интервал может содержать в себе следующие интервалы (см. рис. 1).

- Интервал передачи биконов (от англ. Beacon Transmission Interval, BTI). Биконы – это периодически отправляемые координатором сети служеб-



Рис. 1. Структура бикон-интервала

ные сообщения, которые используются для обнаружения и подключения к сети, для поддержания временной синхронизации, оповещения других устройств о расписании последующих передач, а также передачи другой служебной информации.

- Интервал для подключения к сети (от англ. Association Beamforming Training, A-BFT). Внутри данного интервала устройства устанавливают направленное соединение (определяют направление передачи, в котором достигается наилучшее качество канала) с координатором сети и осуществляют первичное подключение к сети.
- Интервал передачи оповещений (от англ. Announcement Transmission Interval, ATI). Данный интервал используется для обмена служебными сообщениями между координатором и устройствами сети. В частности, координатор может оповещать устройства о расписании последующих передач, а также опрашивать устройства о необходимости выделения для них канальных ресурсов.
- Интервал передачи данных (от англ. Data Transfer Interval, DTI). В данном интервале осуществляется передача пользовательских данных между различными устройствами сети, включая координатора.

Отметим, что не все описанные выше интервалы могут присутствовать в каждом бикон-интервале. Наличие интервалов, а также их длительность, сообщается координатором в биконах.

Рассмотрим теперь более подробно структуру DTI-интервала. DTI-интервал разделяется на временные интервалы ограниченной длительности. Доступ устройств к беспроводному каналу внутри этих интервалов может осуществляться с использованием либо метода случайного доступа CSMA/CA, либо метода детерминированного доступа. Интервалы первого типа называют СВАР-интервалами (от англ. Contention-Based Access Period). Внутри СВАР-интервала выделенная группа устройств получает доступ к каналу на конкурентной основе. Интервалы второго типа называют SP-интервалами. SP-интервал – это интервал выделенный для передачи одного устройства.

Расположение и длительность СВАР- и SP-интервалов, а также устройства, которые могут передавать в этих интервалах, определяются координатором сети. Координатор оповещает другие устройства о расписании СВАР-

и SP-интервалов с помощью специальных служебных сообщений, которые передаются в DTI- или ATI-интервалах. Чтобы уменьшить объем передаваемых служебных сообщений, координатор оповещает устройства не о каждом отдельном интервале а о группах интервалов, называемых резервированиями. Резервирование – это периодически повторяющаяся последовательность временных интервалов одинаковой длительности, которая задается следующими параметрами.

1. Тип резервирования (СВАР или SP), который определяет какой метод доступа – случайный или детерминированный – будет использоваться в резервируемых временных интервалах.
2. Адрес отправителя и получателя. Оба адреса могут быть как одноадресными, так и широковещательными. Если адрес отправителя широковещательный, то это означает, что любое устройство может начать передачу в назначенном интервале.
3. Идентификатор резервирования. Идентификатор используется для того, чтобы различать два резервирования, установленные для одной и той же пары отправителя и получателя.
4. Время начала первого зарезервированного интервала относительно начала бикон-интервала.
5. Длительность каждого зарезервированного временного интервала, относящегося к данному резервированию.
6. Период резервирования, т.е. расстояние между двумя последовательными зарезервированными интервалами.
7. Число временных интервалов из которых состоит данное резервирование.
8. Флаги, указывающие, в частности, на то, может ли быть сокращена или увеличена длительность зарезервированных интервалов в дальнейшем.

Заметим, что стандарт IEEE 802.11ad описывает лишь базовые правила, по которым устройства сети могут согласовывать параметры резервирований с координатором сети, а именно, правила, по которым устройства могут оповестить координатора о наличии у них данных для передачи и их требований к качеству обслуживания. Вместе с тем, стандарт не описывает конкретных алгоритмов, с помощью которым координатор будет определять параметры резервирований и размещать их внутри DTI-интервала. Иными словами, стандарт не описывает алгоритмов управления радиоресурсами. В разделе 3 рассмотрены открытые задачи, возникающие при управлении радиоресурсами в сетях IEEE 802.11ad, а также проанализированы возможные подходы к их решению.

### **3 Управление радиоресурсами**

Как описано в разделе 2, для того чтобы осуществлять передачу данных, устройства сети должны предварительно запросить каналные ресурсы у координатора. Стандарт IEEE 802.11ad описывает несколько процедур, с

помощью которых устройства сети могут запросить каналные ресурсы и согласовать параметры устанавливаемых резервирований с координатором сети. Рассмотрим их более подробно.

### 3.1 Резервирование ресурсов для передачи потоковых данных

Стандарт IEEE 802.11ad описывает специальную процедуру резервирования каналных ресурсов для передачи потоковых данных. Согласно этой процедуре при появлении нового потока данных устройство может отправить координатору служебное сообщение (запрос на резервирование каналных ресурсов), которое содержит следующую информацию. Во-первых, это параметры нового потока такие, как размер пакетов, интервал между приемами двух последовательных пакетов, интенсивность потока, а также адрес получателя. Во-вторых, устройство сообщает координатору требования к качеству обслуживания этого потока: ограничение на время доставки пакетов и долю потерянных пакетов. В-третьих, устройство сообщает координатору предполагаемые параметры резервирования и ограничения, накладываемые на эти параметры: тип резервируемых интервалов (СВАР или SP), максимальные период, с которым должны следовать зарезервированные временные интервалы, минимально допустимая и максимальная (желаемая) длительность резервируемых интервалов. В-четвертых, опционально устройство может сообщить координатору о временных интервалах, внутри которых устройство слышит передачу других устройств и которые, следовательно, не должны использоваться координатором для размещения резервирований.

Исходя из данных полученных в запросе, координатор определяет конкретные параметры резервирования и пытается разместить его в DTI-интервале. Если новое резервирование может быть размещено в DTI-интервале, то координатор устанавливает это резервирование и оповещает отправителя и получателя. В противном случае, резервирование не устанавливается и поток не обслуживается.

Заметим, что стандарт описывает лишь процедуру обмена служебными сообщениями, однако не описывает, как отправитель должен сформировать сам запрос (в частности, что указать в поле предполагаемые параметры резервирования), а также не описывает алгоритм, по которому координатор будет определять конкретные параметры резервирований и размещать их внутри DTI-интервала. Рассмотрим более подробно какие задачи необходимо решить для того, чтобы выполнить требования к качеству обслуживания при передаче потока данных.

**Выбор типа устанавливаемых резервирований.** В первую очередь отправитель и координатор должны определить тип устанавливаемого резервирования(й), т.е. какой метод доступа должен использоваться в резервируемых интервалах. Ответ на этот вопрос зависит от типа доставляемого трафика и его требований к качеству обслуживания.

Как показано во многих работах [6,7], при передаче мультимедийных потоков реального времени (например, аудио-, видеопотоков)<sup>1</sup>, предъявляющих жесткие требования к качеству обслуживания, следует использовать метод детерминированного доступа, т.е. в терминах стандарта IEEE 802.11ad устанавливать SP-резервирования. Использование только метода случайного доступа, т.е. установление только СВАР-резервирований, не гарантирует выполнения ограничения на время доставки пакетов и долю потерянных пакетов, что не позволяет применять его для доставки мультимедийных потоков реального времени. Вместе с тем, следует отметить, что СВАР-резервирования могут использоваться для доставки трафика нечувствительного к задержкам, например, веб-трафика, трафика межмашинного взаимодействия, служебного трафика.

Одним из перспективных подходов для доставки мультимедийных потоков реального времени является использование одновременно методов детерминированного и случайного доступа. Передача данных при этом организована следующим образом. Устройства выбирают параметры SP-резервирования(й) исходя из средней интенсивности потока. Кроме того, устройства устанавливают СВАР-резервирование, в котором могут осуществляться: (а) повторные попытки передачи пакетов, если передачи в SP-интервалах были неуспешными (например, из-за помех в канале), (б) дополнительные передачи пакетов при изменении интенсивности поступающего потока. В частности, в работе [8] исследована возможность применения данного подхода для доставки видеопотоков переменной интенсивности. Показано, что совместное использование методов случайного и детерминированного доступа позволяет снизить объем потребляемых канальных ресурсов по сравнению со случаями использования только метода детерминированного доступа или только метода случайного доступа. Однако существенным недостатком данной работы является то, что в ней не учитывалось влияния случайных помех. Как отмечено выше, даже внутри SP-интервала пакет может быть не доставлен из-за помех в канале. В связи с этим, одной из нерешенных задач при использовании описанного выше подхода является нахождение параметров устанавливаемых SP- и СВАР-резервирований при заданных вероятностях ошибочной передачи пакетов в SP- и СВАР-интервалах и требованиях к качеству обслуживания потока, так чтобы объем канальных ресурсов, потребляемых для передачи этого потока, был минимален.

**Выбор параметров резервирования.** После того как выбран тип устанавливаемого резервирования, координатор должен определить другие параметры резервирования, а именно: длительность резервируемых интервалов, периодичность и число интервалов, а также положение первого интервала относительно начала бикон-интервала. В литературе представлен ряд работ, в которых предложены аналитические модели, позволяющие оценивать параметры устанавливаемых резервирований при передаче мультиме-

<sup>1</sup> Согласно прогнозам [1] такие потоки будут составлять большую часть трафика, генерируемую пользователями.

дейных потоков реального времени с помощью метода детерминированного доступа. В частности, в работе [9] рассмотрен простейший случай передачи ординарного потока постоянной интенсивности с помощью строго периодических резервирований. При этом в каждом зарезервированном интервале может совершаться только одна попытка передачи пакета. Построена аналитическая модель, которая при заданной вероятности успешной попытки передачи пакета в зарезервированных интервалах позволяет определять максимальный период следования зарезервированных интервалов (т.е. такой период при котором потребление канальных ресурсов минимально), так чтобы при этом были выполнены требования потока к качеству обслуживания. В последствии данная модель была расширена на случаи, когда на передачу поступает: (а) ординарный марковский поток переменной интенсивности [10], (б) неординарный поток, т.е. пакеты поступают в очередь пачками случайного размера, а интервал между приходами двух последовательных пачек является постоянной величиной [11,12]. Последний случай описывает передачу видеопотоков.

Отметим, что в общем случае SP-резервирования, устанавливаемые в сетях IEEE 802.11ad, не являются строго периодическими: расстояние между последним зарезервированным интервалом и первым интервалом в двух последовательных DTI-интервалах может быть не равно периоду резервирования. Поэтому описанные выше работы не могут быть напрямую применены в сетях IEEE 802.11ad. В одной из первых работ [13], учитывающей данную особенность, рассмотрен случай передачи ординарных потоков постоянной интенсивности, когда зарезервированные интервалы могут размещаться произвольным образом внутри DTI-интервала. Построена аналитическая модель, которая при заданной вероятности успешной попытки передачи пакета в зарезервированных интервалах и заданном расположении интервалов, а также ограничении на время доставки пакетов, позволяет оценить среднюю долю потерянных пакетов. Используя эту модель, можно найти параметры резервирования, удовлетворяющие заданному ограничению на долю потерянных пакетов. Обобщение модели [13] на случаи передачи потоков переменной интенсивности, а также неординарных потоков на сегодняшний день является открытой задачей.

Важный вопрос, который следует отдельно учитывать при определении параметров устанавливаемых резервирований, является выбор их периода. Как показано в работе [14], если период устанавливаемых резервирований выбирается произвольным образом, то с высокой вероятностью возникает ситуация, когда новое резервирование не может быть установлено, так как оно перекрывается во времени с уже установленными резервированиями. При этом суммарная длительность не занятых временных интервалов интервалов много больше чем суммарная длительность интервалов для нового резервирования. Иными словами, возникает ситуация, когда свободных канальных ресурсов достаточно для установления нового резервирования, однако его период и период уже установленных резервирований таковы, что не возможно их разместить так, чтобы резервирования не перекрывались



во времени. Для решения этой проблемы, в работе [14] было предложено использовать принцип базовой периодичности. Согласно этому принципу, координатор должен выбрать некоторое максимальное значение периода устанавливаемых резервирований, называемое базовым периодом. Все устанавливаемые резервирования должны иметь период, который получается делением базового периода на некоторое целое число. Как показано [14], использование данного принципа позволяет уменьшить временную фрагментацию канала и тем самым увеличить долю успешно зарезервированных временных интервалов и число установленных резервирований.

### 3.2 Динамическое выделение канальных ресурсов (поллинг)

Описанная в предыдущем разделе процедура резервирования канальных ресурсов для передачи потоковых данных, позволяет устройствам заблаговременно согласовывать с координатором параметры устанавливаемых резервирований. Однако, интенсивность поступающих на передачу данных и условия в канале (например, вероятность успешной попытки передачи пакета) могут существенно меняться со временем. Поэтому, даже при условии, что устройства заблаговременно согласовали параметры резервирований с координатором на основе некоторой статистики о текущем состоянии канала и заданных параметрах потока, в некоторых временных интервалах выделенные для передачи данных канальные ресурсы могут быть недоиспользованы, и, наоборот, в других временных интервалах устройствам требуются дополнительные ресурсы.

Для решения этой проблемы и увеличения эффективности использования канальных ресурсов, стандарт IEEE 802.11ad предусматривает дополнительную процедуру динамического выделения канальных ресурсов. С помощью данной процедуры координатор может периодически опрашивать устройства (осуществлять поллинг) и в случае необходимости выделять дополнительные ресурсы для передачи данных. Кроме того, как описано более подробно в разделе 3.3, устройства могут сообщить координатору о том, что часть выделенных им заранее канальных ресурсов недоиспользуется, и поэтому координатор может использовать эти ресурсы для передачи данных других устройств. Иными словами, ресурсы могут быть динамически перераспределены.

Для того чтобы опрашивать устройства и выделять им дополнительные временные интервалы, координатор может установить специальное SP-резервирование, у которого адрес отправителя и получателя является ширококешательным. Будем далее называть такое резервирование ширококешательным SP-резервированием. В течении ширококешательных SP-резервирований, устройства ожидают получения специального служебного сообщения от координатора. При получении данного сообщения устройство отвечает сообщением-запросом, в котором оно указывает какой дополнительный объем канальных ресурсов необходим для передачи данных и адрес получателя этих данных. В зависимости от полученных сообщений-запросов координатор распределяет ресурсы ширококешательного SP-резервирования

между устройствами и оповещает их о начале и длительности выделенного им временного интервала.

Также как и для процедуры, описанной в разделе 3.1, стандарт описывает лишь правила обмена сообщениями, но не определяет (а) как координатор должен выбирать параметры широковещательных SP-резервирований, и (б) в какой последовательности координатор должен опрашивать устройства и выделять им дополнительные ресурсы. Для решения второй задачи могут быть использованы существующие работы по исследованию систем опроса (систем поллинга), например, см. монографию [15]. При этом следует учитывать важную особенность работы сетей IEEE 802.11ad, которая заключается в том, что опрос устройств может осуществляться не в любых интервалах времени, а только в предварительно зарезервированных широковещательных SP-резервированиях, либо в АТI-интервале. Решение первой задачи требует проведения дополнительных исследований. На первый взгляд может показаться, что в начале каждого бикон-интервала координатору достаточно устанавливать широковещательные SP-резервирования во всех свободных временных интервалах. Однако данный подход имеет два существенных недостатка. Во-первых, в течении широковещательных SP-резервирований все устройства должны работать в активном режиме (т.е. должны прослушивать среду и быть готовыми принимать сообщения от координатора и при необходимости отвечать), что существенно увеличивает энергопотребление устройств. Во-вторых, сценарии использования сетей IEEE 802.11ad предусматривают случаи, когда несколько сетей, у каждой из которых есть свой координатор, находятся в непосредственной близости друг от друга и работают в одном и том же частотном канале. В этом случае один координатор не может единолично зарезервировать все ресурсы. Таким образом, необходимо разработать алгоритм выбора параметров широковещательных SP-резервирований, так чтобы координатор мог удовлетворять дополнительные потребности устройств в канальных ресурсах и при этом суммарная длительность зарезервированных интервалов была минимальной.

### **3.3 Сокращение и увеличение длительности SP-интервалов**

Как отмечено в разделе 3.2, в виду того что интенсивность поступающих на передачу данных и условия в канале могут существенно меняться с течением времени, в некоторые моменты времени длительность зарезервированного SP-интервала может оказаться больше, чем необходимо для успешной доставки всех пакетов, находящихся на данный момент в очереди устройства, и, наоборот, длительности SP-интервала может быть недостаточно и требуются дополнительные канальные ресурсы. Для обеспечения гибкости в управлении радиоресурсами, стандарт IEEE 802.11ad предусматривает процедуры сокращения и увеличения длительности зарезервированных SP-интервалов.

Если в параметрах SP-резервирования установлен флаг, который указывает на то, что длительность зарезервированных интервалов, относящихся

к данному резервированию, может быть сокращена, отправитель может сообщить координатору о том, что он закончил передачу данных в рассматриваемом SP-интервале заранее. При получении данного сообщения координатор может использовать остаток SP-интервала для передачи данных другим устройствам. Для этого он выделяет дополнительные ресурсы другим устройствам, используя процедуру динамического выделения канальных ресурсов, описанную в разделе 3.2. При этом эти устройства должны работать в активном режиме, чтоб быть готовыми принимать сообщения от координатора.

Если в параметрах SP-резервирования установлен флаг, который указывает на то, что длительность зарезервированных интервалов, относящихся к данному резервированию, может быть увеличена (будем называть такое резервирование расширяемым), отправитель может сообщить координатору о необходимости увеличения длительности SP-интервала. При этом координатор может увеличить длительность SP-интервала только в том случае, когда непосредственно за данным SP-интервалом следует интервал, относящийся к ширококвещательному SP-резервированию. В этом случае координатор выделяет дополнительные ресурсы используя процедуру, описанную в разделе 3.2. Таким образом, для того чтобы иметь возможность увеличивать длительность SP-интервалов, координатор должен устанавливать дополнительные ширококвещательные SP-резервирования, которые следуют непосредственно за расширяемым SP-резервированием.

Расширяемые SP-резервирования удобно использовать, в частности, для передачи потоков переменной интенсивности, например, видеопотоков. В этом случае координатор устанавливает расширяемое SP-резервирование, выбирая его параметры исходя из средней или минимальной интенсивности потока, а также дополнительно устанавливает ширококвещательное SP-резервирование, которое будет использоваться при необходимости в случае увеличения интенсивности потока. Разработка конкретного алгоритма выбора параметров расширяемого и дополнительного ширококвещательного SP-резервирования является открытой задачей. Отметим, что при решении данной задачи могут применяться методы и модели, описанные в разделе 3.1.

### 3.4 Пространственное мультиплексирование

Важной особенностью работы сетей IEEE 802.11ad является то, что передачи между устройствами являются направленными. Если направления передачи и приема двух пар устройств разнесены в пространстве, то эти пары устройств потенциально могут осуществлять одновременную передачу данных в одном и том же частотном канале. Иными словами, в случае направленных передач возможно осуществлять пространственное мультиплексирование передач, которое, в свою очередь, позволит увеличить пропускную способность сети. Стандарт IEEE 802.11ad предусматривает специальную процедуру, с помощью которой координатор может определить, какие пары устройств могут вести одновременную передачу. Далее координатор может

использовать данную информацию для того, чтобы устанавливать для этих пар устройств перекрывающиеся во времени SP-резервирования.

Для определения того, какие пары устройств могут вести одновременную передачу, устройства проводят дополнительные измерения качества канала. Например, рассмотрим две пары устройств (A,B) и (C,D). Пусть для каждой пары устройств выделен SP-интервал для передачи данных, и эти интервалы изначально не перекрываются во времени. Координатор отправляет устройствам A и B запрос, согласно которому они должны измерять уровень принимаемого сигнала во время SP-интервала, в котором передачу осуществляют устройства C и D. Аналогичный запрос отправляется устройствам C и D. Получив измерения об уровне взаимной интерференции между парами (A,B) и (C,D), координатор определяет, возможно ли устанавливать перекрывающиеся во времени SP-интервалы для этих пар устройств. При этом стандарт не регламентирует конкретных значений уровня взаимной интерференции, при которых пары устройств могут вести одновременную передачу.

Таким образом, для того чтобы увеличить пропускную способность сети IEEE 802.11ad за счет пространственного мультиплексирования передач, необходимо решить две задачи. Во-первых, координатор должен выбрать, между какими именно парами устройств необходимо проводить измерения качества канала. Очевидно, что проведение измерения для всех возможных пар устройств приведет к увеличению как объема служебного трафика, так и времени необходимого для проведения этих измерений. Во-вторых, при заданном значении уровня взаимной интерференции координатор должен определить может ли данная пара устройств одновременно вести передачу. Для решения первой задачи в работе [16] предложено использовать дополнительные измерения, которые устройства проводят при установлении направленных соединений. Перед тем как установить направленное соединение устройства предварительно осуществляют измерения качества канала в разных направлениях. На основе этих измерений пары устройств выбирают для передачи и приема сигнала те направления, в которых мощность принимаемого сигнала является максимальной. Авторы [16] предлагают алгоритм, позволяющий на основе этих измерений предварительно выделить те пары устройств, которые потенциально будут иметь меньшее значение уровня взаимной интерференции. Данные пары устройств должны быть проверены координатором в первую очередь. Для решения второй задачи необходимо разработать алгоритм адаптивного выбора порога уровня взаимной интерференции, с помощью которого координатор будет определять, может ли данная пара устройств одновременно вести передачу. Заметим, что выбор этого порога зависит от целого ряда факторов таких, как скорости передачи, используемые данными парами устройств, размеры передаваемых пакетов, требуемая вероятность успешной доставки пакетов и другие.

## 4 Заключение

Стандарт IEEE 802.11ad, определяющий принципы работы сетей Wi-Fi в диапазоне частот 60 ГГц, вводит новый метод множественного доступа к беспроводному каналу. Представленный в данной работе анализ нового метода доступа показывает, что стандарт предусматривает широкую палитру возможных способов управления радиоресурсами, однако при этом описывает лишь правила обмена служебными сообщениями, но не определяет самих алгоритмов управления радиоресурсами. Выбор той или иной реализации этих алгоритмов, в свою очередь, оказывают прямое влияние на производительности сети в целом и возможность выполнения требований пользователей к качеству обслуживания.

В данной работе проанализированы открытые задачи, возникающие при управлении радиоресурсами в сетях IEEE 802.11ad. Среди них: задача определения параметров резервирования, устанавливаемых для передачи потоковых данных различного типа, в том числе, мультимедийных потоков реального времени, предъявляющих жесткие требования к качеству обслуживания; задача динамического выделения ресурсов при изменении условий в беспроводном канале и интенсивности поступающих потоков; задача увеличения пропускной способности сети за счет использования пространственного мультиплексирования передач и другие задачи. В работе приведен анализ существующих подходов к решению этих задач, представленных в литературе, а также определены возможные направления дальнейших исследований.

## Список литературы

1. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2013-2018. — 2014. — February.
2. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band, 2012.
3. C. Cordeiro et al. 802.11 NG60 SG Proposed PAR, IEEE 802.11-14/1151r3. — URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-1151-03-ng60-ng60-proposed-par.docx>.
4. Official website of IEEE 802.11 Next Generation 60GHz (NG60) Study Group. — URL: [http://www.ieee802.org/11/Reports/ng60\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/ng60_update.htm).
5. C. Cordeiro et al. Next Generation 802.11ad:30+ Gbps WLAN, IEEE 802.11-14/0606r0. — URL: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0606-00-0wng-next-generation-802-11ad.pptx>.
6. Красилов А.Н., Ляхов А.И. Использование МССА для предоставления QoS в сетях IEEE 802.11s // Тр. конф. «Информационные технологии и системы». — 2011. — С. 282–293.
7. G.R. Hiertz, S. Max, T. Junge, D. Denteneert, L. Berlemann. IEEE 802.11s – Mesh Deterministic Access // Proceedings of Wireless Conference. — 2008. — P. 1–8.

8. R. Zhang, R. Ruby, J. Pan, L. Cai, X. Shen. A Hybrid Reservation/Contention-Based MAC for Video Streaming over Wireless Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 2010. — Vol. 28, no. 3. — P. 388–398.
9. E. Shvets, A. Lyakhov, A. Safonov, E. Khorov. Analytical model of IEEE 802.11s MCCA-based streaming in the presence of noise // SIGMETRICS Perform. Eval. Rev. — 2011. — Vol. 39, no. 2. — P. 38–40.
10. E. Shvets, A. Lyakhov. Mathematical Model of MCCA-based Streaming Process in Mesh Networks in the Presence of Noise // Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). — 2012. — P. 1887–1892.
11. A. Ivanov, E. Khorov, A. Lyakhov. Qos support for bursty traffic in noisy channel via periodic reservations // IFIP Wireless Days (WD) / IEEE. — 2014. — P. 1–6.
12. A. Ivanov, A. Lyakhov, E. Khorov. Analytical model of batch flow multihop transmission in wireless networks with channel reservations // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, no. 7. — P. 1179–1192.
13. E. Khorov, A. Ivanov, A. Lyakhov, V. Zankin. Modelling deterministic channel access in millimetre wave Wi-Fi // Twelfth International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). — Brussels, Belgium, 2015.
14. E. Khorov. Choosing channel reservation periodicity in self-organizing wireless networks // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2015. — Vol. 60, no. 12.
15. Вишнеvский В.М., Семенова О.В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. — Москва : Техносфера, 2007.
16. Q. Chen, X. Peng, J. Yang, F. Chin. Spatial reuse strategy in mmWave WPANs with directional antennas // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) / IEEE. — 2012. — P. 5392–5397.