

М.А. ПЕРЕГУДОВ, А.С. СТЕШКОВОЙ  
**МОДЕЛЬ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ СО  
СЛУЧАЙНЫМ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ К СРЕДЕ  
ТИПА CSMA/CA**

*Перегудов М.А., Стешковой А.С.* **Модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA.**

**Аннотация.** Большой интерес представляет централизованная синхронизация элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, от эффективности которой зависит процесс установления сеанса связи. При этом оценка эффективности централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA не проводилась. Также не проводилась оценка вклада потенциально возможных деструктивных воздействий со стороны злоумышленника в снижение эффективности такой синхронизации. Представлена аналитическая модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA. При теоретических исследованиях в модели используют вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета, а при экспериментальных исследованиях — частоту успешной доставки такого пакета. Модель учитывает потенциально возможные деструктивные воздействия со стороны злоумышленника в аналитических выражениях для известных вероятностных показателей. Приведено экспериментальное исследование централизованной синхронизации элементов сети цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA. В качестве такой сети рассмотрена наиболее распространенная сеть цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi). Результаты экспериментального исследования отличаются от результатов теоретического исследования незначительно, что свидетельствует об адекватности разработанной аналитической модели. Установлено, во-первых, что вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета не зависит от количества абонентских терминалов в сетях цифровой радиосвязи; во-вторых, при средней длительности передачи пакета данных таким терминалом меньше 0,85 мс целесообразно использовать не случайный, а зарезервированный множественный доступ к среде, а, в-третьих, централизованная синхронизация устойчива к деструктивным воздействиям. Модель применима при проектировании сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, а также при оптимизации работы таких сетей.

**Ключевые слова:** аналитическая модель, централизованная синхронизация, сеть цифровой радиосвязи, случайный множественный доступ к среде, CSMA/CA, деструктивное воздействие, вероятность передачи.

**1. Введение.** Сегодня особое внимание уделяется оцениванию эффективности функционирования сетей цифровой радиосвязи. Данная оценка необходима, с одной стороны, на этапе проектирования таких сетей, а с другой — на этапе их эксплуатации, причем в условиях де-

структивных воздействий. Цель данных воздействий — нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации легитимных элементов сети цифровой радиосвязи. Они реализуются и на физическом, и на канальном, и даже на вышестоящих уровнях сетей цифровой радиосвязи. Причем наиболее опасными являются деструктивные воздействия, реализуемые на канальном уровне сетей цифровой радиосвязи, так как данный уровень отвечает за доступ абонентских терминалов к среде передачи данных.

К основным процедурам канального уровня сетей цифровой радиосвязи относятся процедуры синхронизации, случайного множественного доступа к среде, зарезервированного доступа к среде и управления мощностью передатчиков абонентских терминалов. Причем при отсутствии синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи функционирование остальных процедур канального уровня невозможно. В [1-4] приведены аналитические модели случайного множественного доступа к среде, зарезервированного доступа к среде и управления мощностью передатчиков абонентских терминалов в условиях деструктивных воздействий. Однако модели синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи в условиях деструктивных воздействий нет, поэтому оценить вклад деструктивных воздействий в снижение эффективности синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи и, как следствие, на этапе эксплуатации своевременно скорректировать значения характеристик таких сетей в целях обеспечения их оптимального функционирования не представляется возможным.

Одними из основных способов синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи являются широковещательная рассылка средством коммутации и управления (централизованный способ) и абонентскими терминалами (распределенный способ) синхронизирующих пакетов. Модели синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи приведены в работах [5-14]. Однако модели [5-13] не учитывают централизованный способ синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи (далее — централизованная синхронизация), а модель [14] не позволяет количественно оценить эффективность такой синхронизации. Данная синхронизация применяется в сетях цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA. К ним относятся сети цифровой радиосвязи стандартов IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee) [15-17], которые сегодня используются в каждом доме. Также в таких сетях известно множество деструктивных воздействий [4, 18-23] со стороны злоумышленника.

Цель работы — разработать аналитическую модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи с случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, позволяющей количественно оценивать эффективность такой синхронизации в условиях деструктивных воздействий.

**2. Анализ существующих работ.** В настоящее время известен ряд трудов [5-14], в которых приведены модели синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи. В моделях [5-13] оценивается эффективность распределенной синхронизации элементов самоорганизующихся сетей цифровой радиосвязи с использованием времени, затрачиваемого на синхронизацию элементов таких сетей [5-6], разницы локального времени между всеми такими элементами [7-10] и вероятности успешной доставки синхронизирующих пакетов [11] при условии масштабируемости самоорганизующихся сетей цифровой радиосвязи [12-13]. Причем во всех моделях, кроме [11], рассмотрены самоорганизующиеся сети цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA. В [14] представлена модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, в которой в качестве показателя эффективности синхронизации элементов таких сетей используется среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета. Однако с помощью такого показателя оценить эффективность централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA возможно только качественно. Также существующие модели не оценивают влияния потенциально возможных деструктивных воздействий со стороны злоумышленника. Таким образом, разработка аналитической модели, позволяющей количественно оценивать эффективность централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA в условиях деструктивных воздействий, является актуальной задачей.

**3. Описательная модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA в условиях деструктивных воздействий.** В результате анализа описаний функционирования процедуры синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи стандартов IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee), приведенных в спецификациях [15-17], и учета потенциально возможных деструктивных воздействий [4, 18-23] пред-

ложена обобщенная описательная модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA в виде представленной на рисунке 1 функциональной схемы, в состав которой входят средство коммутации и управления, абонентские терминалы и злоумышленник. В качестве средства коммутации и управления может выступать точка доступа или ведущий радиомост.

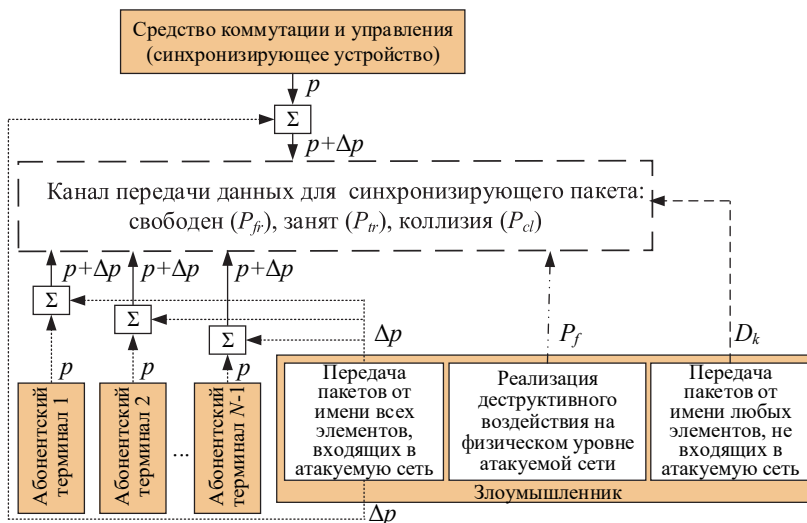


Рис. 1. Функциональная схема централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом типа CSMA/CA в условиях деструктивных воздействий

В сетях цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA абонентскими терминалами и средством коммутации и управления осуществляются на конкурирующей основе с вероятностью  $p$  передачи пакетов данных. При этом среди пакетов данных встречаются не только пакеты пользовательских данных, но и пакеты служебных данных, отвечающие за установление, поддержание и прекращение сеанса связи. К пакетам служебных данных относятся пакеты синхронизирующих данных (далее – синхронизирующие пакеты). При централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA широковещательная рассылка синхронизирующих пакетов осуществляется только средством коммутации и

управления. При передаче синхронизирующего пакета средством коммутации и управления используется уменьшенный межпакетный интервал, что обеспечивает приоритетную передачу такого пакета в канале передачи данных со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA относительно пакетов пользовательских и служебных данных, отвечающих за установление сеанса связи. Причем передача синхронизирующего пакета осуществляется периодически каждый раз в начале повторяющегося интервала синхронизации, задаваемого средством коммутации и управления, при свободном канале передачи данных или по окончании передачи абонентским терминалом. Однако средство коммутации и управления не рассылает абонентским терминалам время начала и конца повторяющегося интервала синхронизации. В результате этого в канале передачи данных возможна коллизия синхронизирующего пакета с пакетом пользовательских или служебных данных абонентского терминала (далее — коллизия синхронизирующего пакета). При получении синхронизирующего пакета все абонентские терминалы устанавливают единое время в соответствии с принятым значением. Только с установленным единым временем для всех участников информационного взаимодействия в сетях цифровой радиосвязи возможно эффективное функционирование процедур случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA и управления мощностью передатчиков абонентских терминалов.

Таким образом, при передаче средством коммутации и управления синхронизирующего пакета в сетях цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA возможно наступление двух событий:

- успешная доставка синхронизирующего пакета;
- коллизия синхронизирующего пакета.

На рисунке 2 представлены возможные исходы при передаче синхронизирующего пакета *Beacon* в сетях цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) с основным алгоритмом случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA [15].

В качестве уменьшенного межпакетного интервала в сетях цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi), учитываемого средством коммутации и управления перед передачей синхронизирующего пакета *Beacon*, используется межпакетный интервал *PIFS*. Межпакетный интервал *PIFS* меньше межпакетного интервала *DIFS*, учитываемого и абонентским терминалом, и средством коммутации и управления перед передачей пакетов пользовательских данных *Data*

и служебных данных *RTS*. При начале повторяющегося интервала синхронизации *TBTT* средство коммутации и управления осуществляет по истечении межпакетного интервала *PIFS* передачу синхронизирующего пакета *Beacon*. При этом абонентский терминал откладывает передачу, ожидает окончания передачи *Beacon* и по истечении межпакетного интервала *DIFS* передает пакет пользовательских данных *Data* или пакет служебных данных *RTS*, отвечающий за установление сеанса связи в зависимости от алгоритма случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA [15].

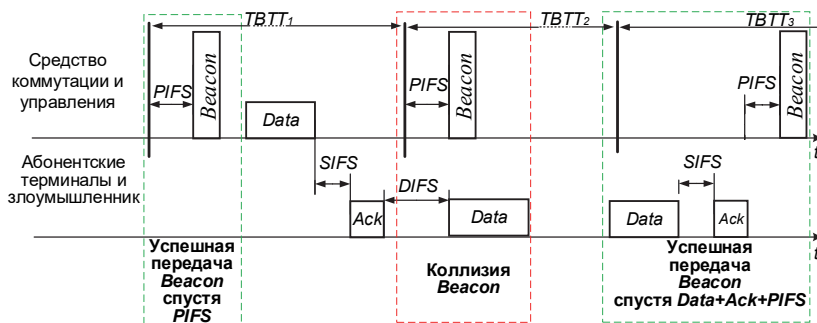


Рис. 2. Возможные события при передаче средством коммутации и управлении синхронизирующего пакета в сетях цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi)

Из анализа работ [4, 18-23] следует, что злоумышленник может осуществлять следующие деструктивные воздействия, направленные на создание коллизии синхронизирующего пакета:

- передача пакетов данных от имени всех  $N$  легитимных элементов, входящих в атакуемую сеть, с вероятностью  $\Delta p$ ;
- передача пакетов данных от имени любых  $K$  элементов, не входящих в атакуемую сеть, с вероятностью  $D_k$ ;
- формирование помехи на физическом уровне атакуемой сети с вероятностью  $P_f$ .

**4. Аналитическая модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA в условиях деструктивных воздействий.** Из приведенной описательной модели централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA в условиях деструктивных воздействий видно, что для доведения до каждого абонентского терминала единого времени требуется в каждом

повторяющемся интервале синхронизации успешно передавать средством коммутации и управления синхронизирующий пакет. Поэтому в качестве показателя эффективности централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA предлагается использовать вероятность успешной доставки средством коммутации и управления синхронизирующего пакета до каждого абонентского терминала в каждом повторяющемся интервале синхронизации (далее — вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета).

Вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета  $\Omega_{syn}$  будем определять как отношение среднего времени успешной доставки синхронизирующего пакета от момента начала повторяющегося интервала синхронизации без учета возможной коллизии такого пакета  $\bar{T}_{BATSC}$  (благоприятный исход передачи синхронизирующего пакета) к среднему времени успешной доставки синхронизирующего пакета с учетом коллизии  $\bar{T}_{BAT}$  (общее число исходов передачи синхронизирующего пакета):

$$\Omega_{syn} = \frac{\bar{T}_{BATSC}}{\bar{T}_{BAT}}. \quad (1)$$

Однако приведенная вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета может использоваться только при теоретических исследованиях, так как на практике из-за отсутствия рассылки средством коммутации и управления информацией о повторяющемся интервале синхронизации неизвестно время начала такого интервала. Поэтому для экспериментальных исследований предлагается использовать в качестве показателя частоту успешной доставки синхронизирующего пакета, определяемую следующим выражением:

$$\eta_{syn} = \frac{\Delta T(S_0)}{\Delta T(S_1)}, \quad (2)$$

где  $S_0$  — состояние функционирования сети цифровой радиосвязи при условии отсутствия передач пакетов пользовательских данных;  $S_1$  — состояние функционирования сети цифровой радиосвязи при условии наличия передач таких пакетов;  $\Delta T$  — среднее время между появлениями синхронизирующего пакета в канале передачи данных.

В состоянии  $S_0$  при отсутствии пакетов пользовательских данных в канале передачи данных синхронизирующий пакет всегда будет успешно доставлен элементам сети цифровой радиосвязи, а в состоянии

$S_1$  возможна коллизия синхронизирующего пакета с пакетом пользовательских данных.

Среднее время между появлениями  $i+1$  и  $i$ -го синхронизирующих пакетов в канале передачи данных рассчитывается по формуле:

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^K (T_{syn_{i+1}} - T_{syn_i})}{K}, \quad (3)$$

где  $T_{syn_i}$  — время появления  $i$ -го синхронизирующего пакета в канале передачи данных;  $K$  — количество повторяющихся интервалов синхронизации, определяющееся длительностью эксперимента.

Для расчета вероятности успешной доставки синхронизирующего пакета определим среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета от момента начала повторяющегося интервала синхронизации (далее — среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета)  $\bar{T}_{BAT}$  на примере стандарта цифровой радиосвязи IEEE 802.11 (Wi-Fi).

С учетом описания известного события успешной доставки синхронизирующего пакета [14] и возможной коллизии синхронизирующего пакета в канале передачи данных среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета примет уточненное графическое отображение, представленное на рисунке 3, в зависимости от времени после окончания подтверждения передачи абонентским терминалом.

В насыщенных сетях цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, к которым относятся и сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi), передачи пакетов данных следуют друг за другом [4, 24]. При этом по окончании подтверждения передачи абонентским терминалом по истечении межпакетного интервала *DIFS* длительностью  $T_{DIFS}$  готов к передаче другой абонентский терминал или средство коммутации и управления. Причем передача осуществляется с общей длительностью  $\bar{T}_m$ . Однако между такими передачами при наступлении повторяющегося интервала синхронизации *TBTT* длительностью  $T_{TBTT}$  средство коммутации и управления отправляет приоритетный синхронизирующий пакет *Beacon*. С учетом рисунка 3 рассмотрим полное описание возможных событий успешной доставки и коллизии синхронизирующего пакета *Beacon* и соответствующее этим событиям среднее время успешной доставки такого синхронизирующего пакета.



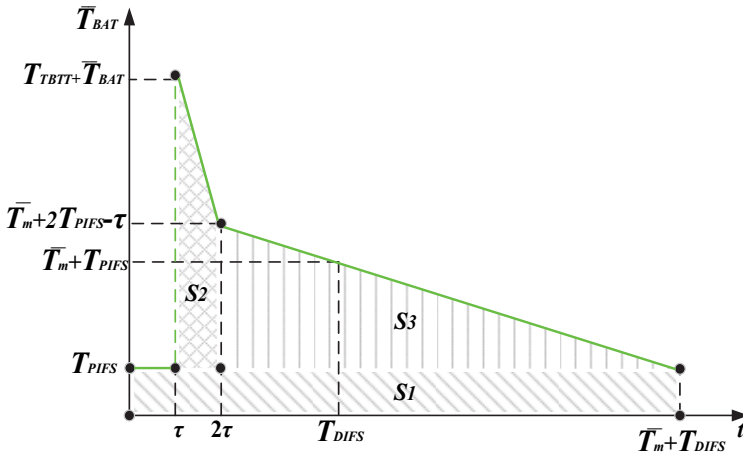


Рис. 3. Зависимость среднего времени успешной доставки синхронизирующего пакета от времени после окончания подтверждения передачи абонентским терминалом

1. Если повторяющийся интервал синхронизации  $T_{BTT}$  наступит в течение временного интервала  $\tau$  после окончания передачи абонентским терминалом, то произойдет успешная доставка синхронизирующего пакета *Beacon* по истечении межпакетного интервала  $PIFS$ . При этом среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета равняется длительности  $T_{PIFS}$ .

2. Если повторяющийся интервал синхронизации  $T_{BTT}$  наступит по истечении временного интервала  $\tau$  после окончания передачи абонентским терминалом, то произойдет коллизия синхронизирующего пакета *Beacon* и его повторная передача может осуществиться в следующем интервале  $T_{BTT}$ . При этом среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета увеличится на длительность повторяющегося интервала синхронизации  $T_{BTT}$  и, соответственно, равняется  $\bar{T}_{BAT} + T_{TBT}$ .

3. Если повторяющийся интервал синхронизации  $T_{BTT}$  наступит по истечении двух временных интервалов  $\tau$  после окончания передачи абонентским терминалом, то произойдет успешная доставка синхронизирующего пакета *Beacon* только уже по окончании передачи пакета данных абонентским терминалом. При этом среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета равняется  $\bar{T}_m + 2T_{PIFS} - \tau$ .

Пункт 3 описывает занятость канала передачи данных при наступлении повторяющегося интервала синхронизации  $T_{BTT}$ .

Из рисунка 3 видно, что среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета определяется как отношение суммы площадей прямоугольника, трапеции и треугольника, образующей площадь под кривой, к основанию:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{BAT} &= \frac{S_1 + S_2 + S_3}{T_m + T_{DIFS}} = \\ &= T_{PIFS} + \frac{(T_{TBTT} + \bar{T}_{BAT} + \bar{T}_m - \tau)\tau}{2(T_m + T_{DIFS})} + \frac{(\bar{T}_m + T_{PIFS} - \tau)^2}{2(T_m + T_{DIFS})}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\bar{T}_m$  — средняя длительность передачи пакета данных абонентским терминалом;  $T_{TBTT}$  — длительность повторяющегося интервала синхронизации  $T_{BTT}$ ;  $T_{PIFS}$  — длительность межпакетного интервала  $PIFS$ ;  $T_{DIFS}$  — длительность межпакетного интервала  $DIFS$ ;  $\tau$  — длительность минимального временного интервала, из которого состоят межпакетные интервалы и пакеты данных.

Выражение (4) справедливо для насыщенных сетей цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi). Однако на практике такие сети не всегда насыщены и их канал передачи данных может простаивать. Поэтому уточним выражение (4) в части коэффициентов  $k_a$  и  $k_b$  перед слагаемыми, учитывающими коллизию синхронизирующего пакета  $Beacon$  и его успешную передачу в результате занятости канала передачи данных:

$$\bar{T}_{BAT} = T_{PIFS} + k_a \frac{(T_{TBTT} + \bar{T}_{BAT} + \bar{T}_m - \tau)\tau}{2(T_m + T_{DIFS})} + k_b \frac{(\bar{T}_m + T_{PIFS} - \tau)^2}{2(T_m + T_{DIFS})}, \quad (5)$$

где  $k_a$  — коэффициент создания коллизии синхронизирующего пакета  $Beacon$  в сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi);  $k_b$  — коэффициент занятости канала передачи данных.

В левой и правой частях равенства (5) содержится искомый показатель — среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета. Поэтому (5) преобразуем к виду:

$$\bar{T}_{BAT} = \frac{T_{PIFS} + k_a \frac{(T_{TBTT} + \bar{T}_m - \tau)\tau}{2(T_m + T_{DIFS})} + k_b \frac{(\bar{T}_m + T_{PIFS} - \tau)^2}{2(T_m + T_{DIFS})}}{1 - k_a \frac{\tau}{2(T_m + T_{DIFS})}}. \quad (6)$$

Исключив из выражения (6) слагаемые в числителе и знаменателе, учитывающие коллизию синхронизирующего пакета *Beacon*, получим среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета без учета возможной коллизии такого пакета:

$$\bar{T}_{BATSC} = T_{PIFS} + k_b \frac{(\bar{T}_m + T_{PIFS} - \tau)^2}{2(\bar{T}_m + T_{DIFS})}. \quad (7)$$

С учетом рисунка 3 коэффициент создания коллизии синхронизирующего пакета *Beacon* определим как часть времени, в течении которого возникает коллизия синхронизирующего пакета *Beacon*:

$$\begin{aligned} k_a &= \frac{P_{tr_{N-1}} \tau}{P_{fr_{N-1}} \tau + P_{tr_{N-1}} \tau + P_{tr_{N-1}} (\bar{T}_m + T_{DIFS} - 2\tau)} = \\ &= \frac{P_{tr_{N-1}} \tau}{P_{fr_{N-1}} \tau + P_{tr_{N-1}} (\bar{T}_m + T_{DIFS} - \tau)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $P_{tr_{N-1}}$  — вероятность занятости канала передачи данных одним из  $N-1$  элементом сети цифровой радиосвязи;  $P_{fr_{N-1}}$  — вероятность свободного канала передачи данных при  $N-1$  элементе такой сети.

В соответствии с [14] коэффициент занятости канала передачи данных определяется по формуле:

$$k_b = 1 - \frac{(1 - P_{tr_{N-1}}) \tau}{P_{sc_{N-1}} T_{sc} + P_{cl_{N-1}} T_{cl} + P_{fr_{N-1}} \tau}, \quad (9)$$

где  $P_{sc_{N-1}}$  — вероятность успешной доставки пакета данных одним из  $N-1$  элементом сети;  $P_{cl_{N-1}}$  — вероятность создания коллизии  $N-1$  элементом сети;  $T_{sc}$  — средняя длительность успешной передачи пакета данных;  $T_{cl}$  — средняя длительность коллизии.

Из аналитических выражений вероятностей свободного канала, успешной доставки пакета данных и создания коллизии для  $N$  элементов сети цифровой радиосвязи, приведенных в работе [4], получим аналогичные вероятности только для  $N-1$  элемента такой сети:

$$\begin{aligned}
 P_{fr_{N-1}} &= (1 - (p + \Delta p))^{N-1} (1 - P_f) \prod_{k=1}^K (1 - D_k); \\
 P_{sc_{N-1}} &= (N-1)p(1 - (p + \Delta p))^{N-2} (1 - P_f) \prod_{k=0}^K (1 - D_k); \\
 P_{cl_{N-1}} &= 1 - P_{fr_{N-1}} - P_{sc_{N-1}},
 \end{aligned} \tag{10}$$

где  $N$  — общее количество элементов в сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi);  $p$  — вероятность передачи абонентским терминалом или средством коммутации и управления пакета данных;  $\Delta p$  — вероятность передачи злоумышленником пакетов данных от имени всех  $N$  легитимных элементов, входящих в атакуемую сеть;  $D_k$  — вероятность передачи злоумышленником пакетов данных от имени любых  $K$  элементов, не входящих в атакуемую сеть;  $P_f$  — вероятность формирования помехи на физическом уровне атакуемой сети.

Выражения (10) описывают случайный множественный доступ к среде. В сетях цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) используется при централизованной синхронизации ее элементов случайный множественный доступ к среде типа CSMA/CA. Особенность случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA в условиях деструктивных воздействий [4] заключена в системе уравнений:

$$\begin{cases}
 p = \frac{2(1 - P_{rN})}{W_0(1 - P_{rN-1}) \sum_{i=0}^{m-1} (2P_{rN-1})^i + W_0(2P_{rN-1})^m + 1}; \\
 P_{r_{N-1}} = 1 - \left[ (1 - (p + \Delta p))^{N-1} \cdot (1 - P_f) \cdot \prod_{k=1}^K (1 - D_k) \right]; \\
 P_{rN} = 1 - \left[ (1 - (p + \Delta p))^N \cdot (1 - P_f) \cdot \prod_{k=1}^K (1 - D_k) \right],
 \end{cases} \tag{11}$$

где  $W_0$  — значение счетчика отсрочки повторной передачи;  $m$  — количество повторных попыток передач.

Решив систему уравнений (11), определим вероятности  $p$ ,  $P_{r_{N-1}}$  и  $P_{rN}$ , которые являются исходными данными для выражений (8), (9) и (10).

В соответствии с [4] и [15] для основного алгоритма случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA в сетях цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) средние длительности передачи пакета данных абонентским терминалом, создания коллизии и успешной передачи такого пакета определяются выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{T}_m = \overline{T}_{data} + \sigma + T_{SIFS} + T_{Ack} + \sigma; \\ \overline{T}_{cl} = \overline{T}_{data} + T_{DIFS} + \sigma; \end{array} \right. ,$$

если  $(\Delta p = 0) \cap (D_k = 0) \cap (P_f = 0)$ ;

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{T}_m = E[P_z] + \sigma + T_{SIFS} + T_{Ack} + \sigma; \\ \overline{T}_{cl} = E[P_z] + T_{DIFS} + \sigma; \end{array} \right. , \quad (12)$$

если  $(E[P_z] > \overline{T}_{data})$ ;

$$T_{sc} = \overline{T}_{data} + \sigma + T_{SIFS} + T_{Ack} + \sigma + T_{DIFS},$$

а для дополнительного алгоритма случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA в таких сетях они примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{T}_m = T_{Rts} + \sigma + T_{SIFS} + T_{Cts} + \sigma + T_{SIFS} + \\ + \overline{T}_{data} + \sigma + T_{SIFS} + T_{Ack} + \sigma; \\ \overline{T}_{cl} = T_{Rts} + T_{DIFS} + \sigma; \end{array} \right. ,$$

если  $(\Delta p = 0) \cap (D_k = 0) \cap (P_f = 0)$ ;

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{T}_m = T_{Rts} + \sigma + T_{SIFS} + T_{Cts} + \sigma + T_{SIFS} + \\ + E[P_z] + \sigma + T_{SIFS} + T_{Ack} + \sigma; \\ \overline{T}_{cl} = E[P_z] + T_{DIFS} + \sigma; \end{array} \right. , \quad (13)$$

если  $(E[P_z] > \overline{T}_{data})$ ;

$$T_{sc} = T_{Rts} + \sigma + T_{SIFS} + T_{Cts} + \sigma + T_{SIFS} + \\ + \overline{T}_{data} + \sigma + T_{SIFS} + T_{Ack} + \sigma + T_{DIFS},$$

где  $\overline{T}_{data}$  — средняя длительность передачи пакета пользовательских данных *Data*;  $T_{Ack}$  — длительность пакета *Ack* подтверждения успешной доставки пакета пользовательских данных *Data*;  $T_{Rts}$  — длительность пакета *Rts* запроса на получение доступа к среде;  $T_{Cts}$  — длительность

пакета  $Cts$  подтверждения успешной доставки пакета  $Rts$ ;  $T_{SIFS}$  — длительность межпакетного интервала  $SIFS$ ;  $\sigma$  — задержка распространения сигнала;  $E[P_e]$  — средняя длительность передачи пакета данных злоумышленника или помехи на физическом уровне атакуемой сети.

Средняя длительность передачи пакета пользовательских данных  $Data$  [15] определяется выражением:

$$\bar{T}_{data} = T_{preamble} + T_{signalExtension} + 4\left(\frac{22 + (L_{header} + \bar{L}_{data})8}{4R}\right), \quad (14)$$

где  $T_{preamble}$  — длительность преамбулы пакета пользовательских данных  $Data$ ;  $T_{signalExtension}$  — длительность поля расширения сигнала;  $L_{header}$  — объем заголовка полезной нагрузки пакета  $Data$ ;  $\bar{L}_{data}$  — средний объем полезной нагрузки пакета  $Data$ ;  $R$  — скорость передачи пакета  $Data$ .

Учитывая возможные значения объема полезной нагрузки пакета пользовательских данных  $Data$ , передаваемой каждым элементом сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi), получим в такой сети средний объем полезной нагрузки пакета пользовательских данных  $Data$  в виде:

$$\bar{L}_{data} = \frac{\sum_{i=1}^N L_{data_i}}{N}, \quad (15)$$

где  $L_{data_i}$  — объем полезной нагрузки пакета пользовательских данных  $Data$ , передаваемой  $i$ -ым элементом сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi).

С учетом рассмотренных показателей в аналитической модели предлагается использовать систему показателей эффективности централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, представленную на рисунке 4.

Из приведенной на рисунке 4 системы показателей видно, что, во-первых, вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета зависит от вероятностных и временных показателей случайного множественного доступа к среде, во-вторых, такая вероятность может использоваться не только в сетях цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, но и в сетях цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа ALOHA, S-ALOHA и другим, учитывающих централизованный способ синхронизации их элементов.



Рис. 4. Система показателей эффективности централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA

**5. Описание экспериментального исследования.** При экспериментальном исследовании разворачивалась сеть цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11n (Wi-Fi), состоящая из двух - семи элементов. Стандарт IEEE 802.11n (Wi-Fi) является одной из реализаций стандарта

IEEE 802.11 (Wi-Fi). В развернутой сети осуществлялся информационный обмен между каждым абонентским терминалом и точкой доступа с общим количеством пакетов данных  $N_{tr}$ .

Захват пакетов данных в канале передачи данных сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11n (Wi-Fi) и их анализ осуществлялся с использованием системы оптимизации работы сетей цифровой радиосвязи и обнаружения деструктивных воздействий, состоящей из приемного устройства, устройства вывода результатов и ПЭВМ с программным средством анализа сетевого трафика и комплексом оптимизации работы сетей цифровой радиосвязи [25]. Причем одним из средств программного комплекса оптимизации работы сетей цифровой радиосвязи является средство оценки эффективности синхронизации. В качестве приемного устройства использовали Wi-Fi адаптер Alfa AWUS036ACH.

Структурная схема экспериментальной оценки эффективности централизованной синхронизации для сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11n (Wi-Fi), состоящей из семи элементов, приведена на рисунке 5.



Рис. 5. Структурная схема экспериментальной оценки эффективности централизованной синхронизации для сети цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11n (Wi-Fi), состоящей из семи элементов

Из захваченных пакетов данных с использованием программного средства анализа сетевого трафика выделяют синхронизирующие пакеты точек доступа и упорядочивают по времени их появления, как показано на рисунке 6.



MAC источн.	Протокол	Время	Сигнал
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:34,789822	-52
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:34,888047	-68
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:34,998690	-55
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,096938	-72
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,195294	-81
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,305909	-68
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,404167	-58
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,502422	-63
B0:48:7A:D6:3B:9A	MN <i>Tsyn</i> ON	12:42:35,613042	-59
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,711410	-64
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,809661	-80
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:35,920280	-55
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:36,018655	-65
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:36,116903	-45
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:36,227514	-70
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:36,325757	-71
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:36,424137	-63
B0:48:7A:D6:3B:9A	MNGT/BEACON	12:42:36,534630	-65

Рис. 6. Определение времени появления синхронизирующего пакета

На основании полученных значений  $T_{syn_i}$  в соответствии с выражениями (2) и (3) для различного количества элементов в развернутой сети определялись:

- среднее время между появлениями синхронизирующего пакета в канале передачи данных  $\Delta T(S_0)$  при условии отсутствия передач пакетов пользовательских данных;
- среднее время между появлениями синхронизирующего пакета в канале передачи данных  $\Delta T(S_1)$  при условии наличия передач пакетов пользовательских данных;
- частота успешной доставки синхронизирующего пакета  $\eta_{syn}$ .

**6. Результаты теоретического и экспериментального исследований.** При теоретическом и экспериментальном исследованиях рассматривалась сеть цифровой радиосвязи стандарта 802.11n. Основные характеристики исследуемой сети цифровой радиосвязи приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры исследуемой сети цифровой радиосвязи

Параметр	Значение
Длительность межпакетного интервала <i>PIFS</i> $T_{PIFS}$ , мкс	19
Длительность межпакетного интервала <i>DIFS</i> $T_{DIFS}$ , мкс	28
Значение счетчика отсрочки повторной передачи $W_0$ , слот	16
Количество повторных попыток передач $m$ , раз	5
Длительность временного слота $\tau$ , мкс	9
Задержка распространения сигнала $\delta$ , мкс	1
Длительность повторяющегося интервала синхронизации <i>TBTT</i> $T_{TBTT}$ , мкс	$10^5$

Результаты теоретического и экспериментального исследований приведены на рисунках 7–13.

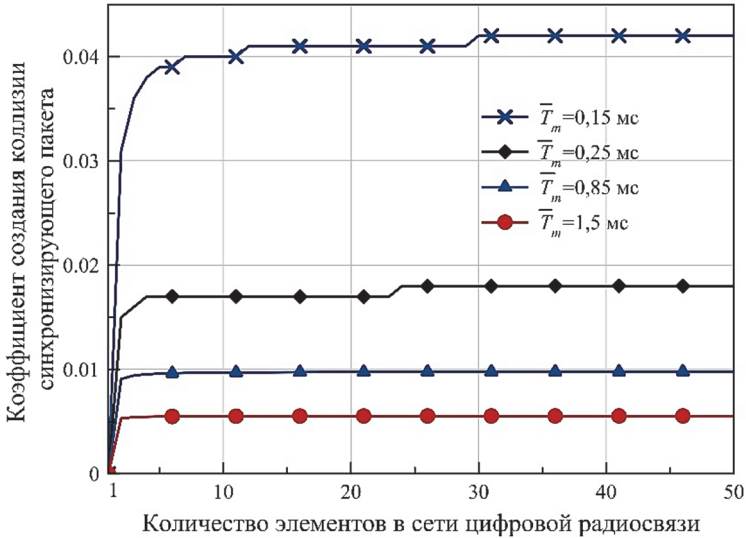


Рис. 7. Зависимость коэффициента создания коллизии синхронизирующего пакета от количества элементов в сети цифровой радиосвязи

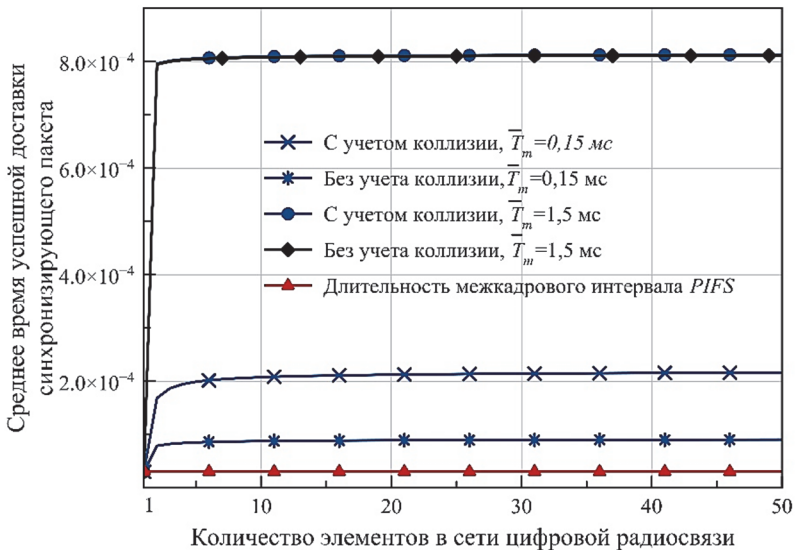


Рис. 8. Среднее времена успешной доставки синхронизирующего пакета с учетом его коллизии и без ее учета

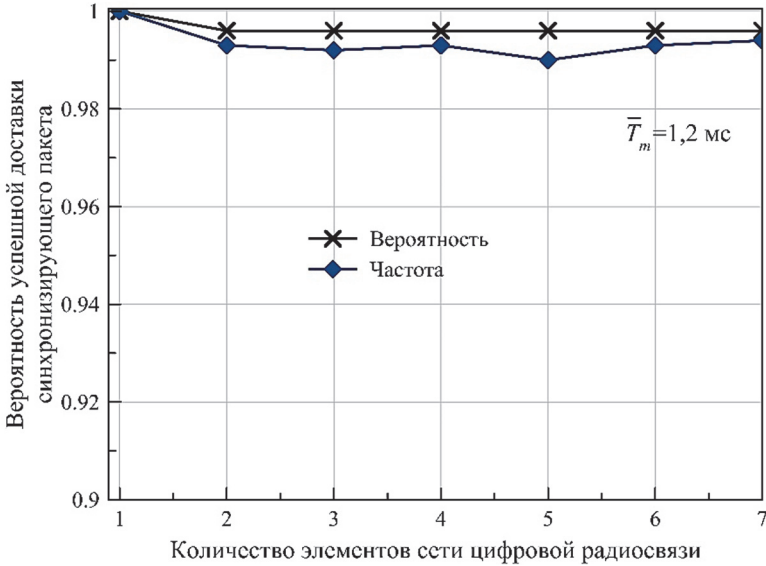


Рис. 9. Вероятность и частота успешной доставки синхронизирующего пакета при теоретическом и экспериментальном исследовании

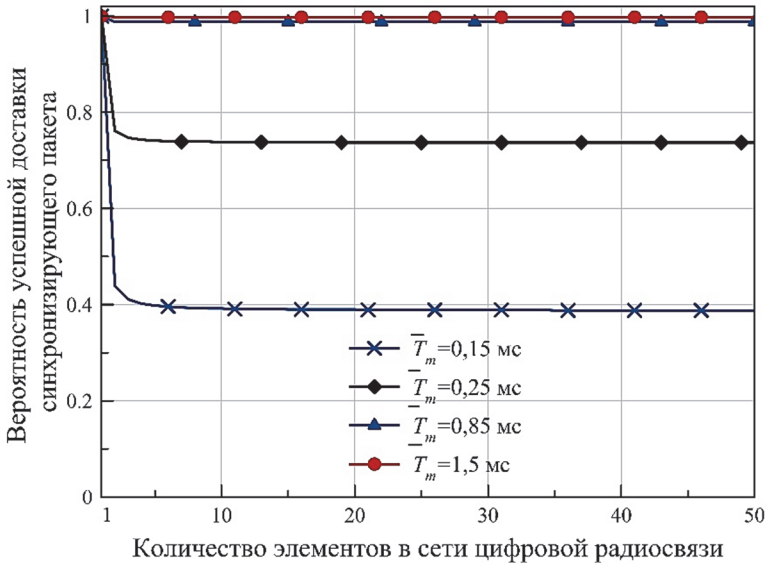


Рис. 10. Вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета при различных значениях средней длительности передачи пакета данных абонентским терминалом

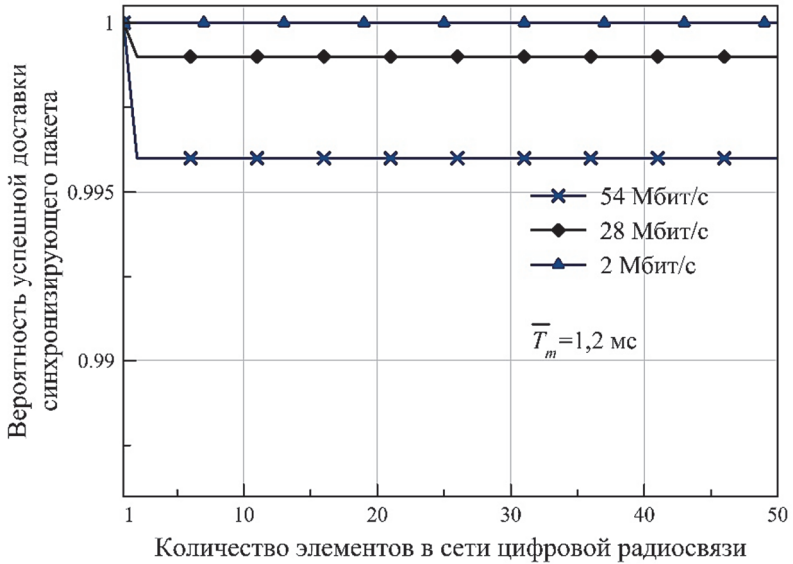


Рис. 11. Вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета при различных значениях скорости передачи пакетов данных

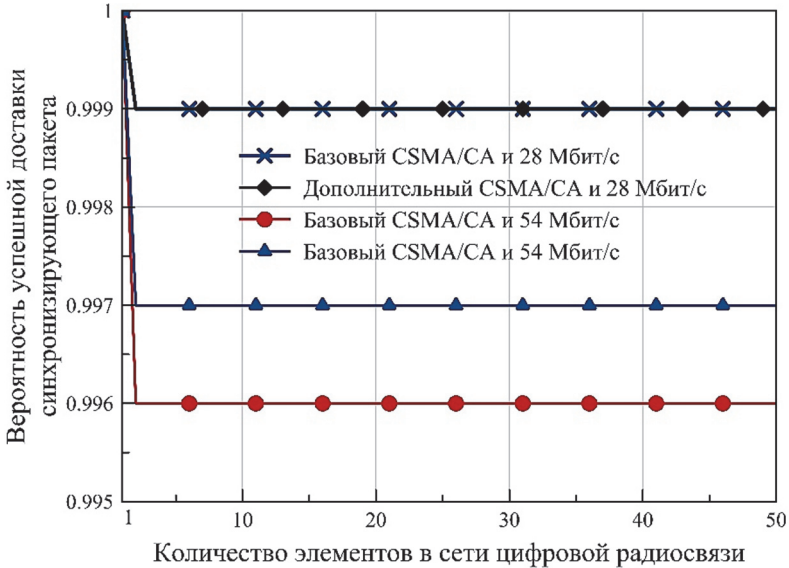


Рис. 12. Вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета при базовом и дополнительном алгоритмах случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA

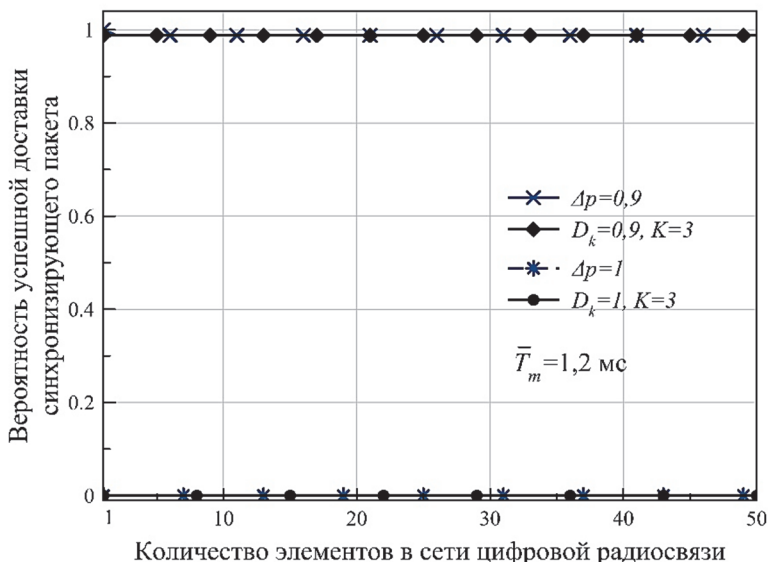


Рис. 13. Вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета в условиях деструктивных воздействий

Из анализа результатов, приведенных на рисунках 7-13, следует.

1. С ростом количества абонентских терминалов ни коэффициент создания коллизии синхронизирующего пакета (рис. 7), ни среднее время успешной его доставки (рис. 8) практически не меняются, то есть они незначительно зависят от коллизий, вызванных столкновением пакетов данных таких терминалов. Однако уменьшение средней длительности передачи пакета данных абонентским терминалом приводит к увеличению такого коэффициента и, как следствие, к снижению такого среднего времени. При этом значительно растет вклад коллизии синхронизирующего пакета в среднее время успешной его доставки. При наличии только средства коммутации и управления в сети цифровой радиосвязи среднее время успешной доставки синхронизирующего пакета эквивалентно длительности межпакетного интервала *PIFS*. Все это подтверждает правильность описания реального процесса централизованной синхронизации элементов, протекающего в сетях цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA.

2. В сетях цифровой радиосвязи, состоящих из двух и более элементов, вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета не зависит от количества элементов в таких сетях. При этом результаты экспериментального исследования практически совпадают с результатами теоретического исследования и отличаются на сотые доли числа,

что в свою очередь подтверждает адекватность разработанной аналитической модели (рис. 9).

3. С уменьшением средней длительности передачи пакета данных абонентским терминалом снижается вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета (рис. 10). Причем при минимально возможной средней длительности передачи вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета снизилась почти в 2,5 раза. Такое снижение связано с значительным ростом коллизий синхронизирующего пакета. Аналогичная ситуация и с увеличением скорости передачи пакетов данных (рис. 11), так как с увеличением скорости уменьшается средняя длительность передачи пакета данных абонентским терминалом.

4. Использование средней длительности передачи данных абонентским терминалом более 0,85 мс позволяет обеспечить вероятность успешной доставки синхронизирующих пакетов близкой к единице. В сетях цифровой радиосвязи со средней длительностью передачи пакета данных абонентским терминалом меньше 0,85 мс также для обеспечения вероятности успешной доставки синхронизирующего пакета близкой к единице необходимо применять не случайный, а зарезервированный множественный доступ к среде, например в сетях цифровой радиосвязи стандарта IEEE 802.11n – PCF.

5. Вероятность успешной доставки синхронизирующего пакета как для базового, так и для дополнительных алгоритмов случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA вне зависимости от скорости передачи пакетов данных практически одинакова, отличается на тысячные доли числа (рисунок 12).

6. Централизованная синхронизация элементов сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA устойчива к деструктивным воздействиям (рисунок 13). И только при постоянной передаче злоумышленником пакетов данных в каждом временном интервале эффективность такой синхронизации стремится к нулю.

**7. Заключение.** Разработана аналитическая модель централизованной синхронизации элементов сетей цифровой радиосвязи, позволяющая определять вероятность (частоту) успешной доставки синхронизирующего пакета в условиях деструктивных воздействий с учетом вероятностей и средних длительностей успешной передачи и создания коллизии случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA. Проведены исследования, теоретические и экспериментальные результаты которых практически совпали, что подтверждает адекватность разработанной модели. При этом получили, что при средней длительности передачи пакета данных абонентским терминалом меньше 0,85 мс целесообразно использовать в сетях цифровой

радиосвязи не случайный, а зарезервированный множественный доступ к среде. Модель применима при проектировании сетей цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа CSMA/CA, а также при оптимизации работы таких сетей.

### Литература

1. *Перегудов М.А., Бойко А.А.* Модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа S-ALOHA // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6(73). С. 75–81.
2. *Перегудов М.А., Бойко А.А.* Модель процедуры зарезервированного доступа к среде сети пакетной радиосвязи // Телекоммуникации. 2015. № 6. С. 7–15.
3. *Перегудов М.А., Бойко А.А.* Модель процедуры управления питанием сети пакетной радиосвязи // Телекоммуникации. 2015. № 9. С. 13–18.
4. *Перегудов М.А., Степиковой А.С., Бойко А.А.* Вероятностная модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA // Труды СПИИРАН. 2018. Т. 4. № 59. С. 92–114.
5. *Pande H.K., Thapliyal S., Mangal L.C.* A new clock synchronization algorithm for multi-hop wireless ad hoc networks // 2010 Sixth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks. 2010. pp. 1–5.
6. *Lai T., Zhou D.* Efficient and Scalable IEEE 802.11 ad hoc mode timing synchronization function // 17th IEEE International Conferences on Advanced Information Networking and Applications. 2003. pp. 318–323.
7. *Mahmood A. et al.* Towards High Accuracy in IEEE 802.11 based Clock Synchronization using PTP // International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS 2011). 2011. pp. 13–18.
8. *Elson J., Estrin D.* Time Synchronization for Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium. 2001. p. 186.
9. *Herman T., Zhang C.* Stabilizing clock synchronization for wireless sensor networks // Springer Heidelberg. 2006. vol. 4280. pp. 335–349.
10. *Lai T.H., Zhou D.* Efficient and scalable IEEE 802.11 ad hoc mode timing pattern formation function // 17th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2003. pp. 318–323.
11. *Сафонов А.А.* Анализ механизмов синхронизации в персональных и локальных беспроводных сетях // Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН. 2008. 20 с.
12. *Sheu J.P., Chao C.M., Hu W.K., Sun C.W.* A Clock Synchronization Algorithm for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks // Wireless Personal Communications. 2007. vol. 43. no. 2. pp. 185–200.
13. *Huang L., Lai T.H.* On the Scalability of IEEE 802.11 Ad Hoc Networks // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. 2002. pp. 173–182.
14. *Garcia-Villegas E., Afaqui M.S., Lopez-Aguilera E.* A novel cheater and jammer detection scheme for IEEE802.11-based wireless LANs // Computer Networks. 2015. vol. 86. pp. 40–46.
15. *IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee et al.* 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 // IEEE Std. 2012. vol. 802. 11 p.
16. *IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee et al.* IEEE Standard for Information Technology-Telecommunication and information exchange between systems – LAN/MAN

- Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs) // IEEE Std. 2002. vol. 802.
17. *IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee et al.* IEEE Standard for Information Technology, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) // IEEE Std. 2003. vol. 802.
  18. *Liu C., Qiu J.* Performance study of 802.11w for preventing DoS attacks on wireless local area networks // *Wireless Personal Communications*. 2017. vol. 95. no. 2. pp. 1031–1053.
  19. *Kaur J.* MAC Layer Management Frame Denial of Service Attacks // *International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE)*. 2016. pp. 155–160.
  20. *Noman H.A., Abdullah S.M., Mohammed H.I.* An Automated Approach to Detect Deauthentication and Disassociation Dos Attacks on Wireless 802.11 Networks // *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*. 2015. vol. 12. no. 4. pp. 107.
  21. *Filipek J., Hudec L.* Securing mobile ad hoc networks using distributed firewall with PKI // *2016 IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*. 2016. pp. 321–325.
  22. *Yacchirena A. et al.* Analysis of attack and protection systems in Wi-Fi wireless networks under the Linux operating system // *IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*. 2016. pp. 1–7.
  23. *Liu C., Qiu J.* Performance study of 802.11w for preventing DoS attacks on wireless local area networks // *Wireless Personal Communications*. 2017. vol. 95. no. 2. pp. 1031–1053.
  24. *Bianchi G.* IEEE 802.11–Saturation Throughput Analysis // *IEEE Communications Letters*. 1998. vol. 2. no. 12. pp. 318–320.
  25. *Бойко А.А., Перегудов М.А., Семченко И.А., Стешковой А.С.* Программный комплекс оптимизации работы сетей радиосвязи // *Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ*. 2018. № 2018614894.

**Перегудов Максим Анатольевич** — канд. техн. наук, начальник лаборатории, научно-исследовательский испытательный институт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Воронеж). Область научных интересов: методы и системы защиты информации. Число научных публикаций — 14. [maharegudov@mail.ru](mailto:maharegudov@mail.ru); ул. Старых Большевиков, 54А, 394064, Воронеж, Россия; р.т.: +7(473)236-5228; факс: +7(473)244-7860.

**Стешковой Анатолий Сергеевич** — младший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Воронеж). Область научных интересов: методы и системы защиты информации. Число научных публикаций — 6. [9515431635@mail.ru](mailto:9515431635@mail.ru); ул. Старых Большевиков, 54А, 394064, Воронеж, Россия; р.т.: +7(473)244-7860; факс: +7(473)244-7860.



M. PEREGUDOV, A. STESHKOVY  
**DIGITAL RADIO NETWORKS CENTRALIZED ELEMENTS  
SYNCHRONIZATION MODEL WITH RANDOM MULTIPLE  
ACCESS TO THE CSMA/CA TYPE MEDIUM**

*Peregudov M., Steshkovoy A.* **Digital Radio Networks Centralized Elements Synchronization Model with Random Multiple Access to the CSMA/CA Type Medium.**

**Abstract.** Currently, there is a great interest in digital radio network centralized elements synchronization with random multiple access to the CSMA/CA type, the effectiveness of which determines the process of establishing a communication session. At the same time, there was no assessment effectiveness digital radio communication network centralized elements synchronization with random multiple access to the CSMA/CA type. Also, there was no assessment made the contribution of potential destructive actions by the attacker to the reduction in the effectiveness of such synchronization. This paper presents digital radio networks centralized elements synchronization analytical model with random multiple access to the CSMA/CA type medium. In this model the theoretical resulting indicator is the probability of successful delivery of a synchronization package, and a package frequency of successful delivery is used in experimental indicator evaluation. The model takes into account the potential destructive effects of the attacker in analytical expressions for known probabilistic indicators. An digital radio network centralized elements synchronization with random multiple access to a CSMA/CA type experimental study an environment is also presented. The most common network of digital radio standard IEEE 802.11 (Wi-Fi) is considered as such network. The experimental research results differ from the theoretical research results slightly, which indicates the adequacy of the developed analytical model. It was established, firstly, that the successful delivery probability of a synchronization packet does not depend on number of subscriber terminals in digital radio communication networks, secondly, with an average duration of a data packet transmission by such terminal less than 0.85 ms, it is advisable to use non-random, and the reserved multiple access to the environment, and, thirdly, centralized synchronization is resistant to destructive influences. The model is applicable in the design of digital radio networks with random multiple access to the medium such as CSMA/CA, as well as in optimizing the operation of such networks.

**Keywords:** Analytical Model, Centralized Synchronization, Digital Radio Network, Random Multiple Media Access, CSMA/CA, Destructive Impact, Efficiency, Transmission Probability.

**Peregudov Maksim** — Ph.D., Head of Research Laboratory, Scientific Research Testing Institute, Military education-science center of Military aviation forces “Military aviation academy named for prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin” (Voronezh). Research interests: methods and systems of information protection. The number of publications — 14. maxaperudov@mail.ru; 54A, Old Bolsheviks street, 394064, Voronezh, Russia; office phone: +7(473)236-5228; fax: +7(473)244-7860.

**Steshkovoy Anatoliy** — Junior Researcher, Military Education-Science Center of Military Aviation Forces “Military Aviation Academy named for Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin” (Voronezh). Research interests: methods and systems of information protection. The number of publications — 6. 9515431635@mail.ru; 54A, Staryh Bol'shevikov str., 394064, Voronezh, Russia; office phone: +7(473)244-7860; fax: +7(473)244-7860.

## References

1. Peregudov M.A., Boyko A.A. [Model of the procedure of random multiple access to the medium of S-ALOHA type]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information-control systems*. 2014. vol. 6(73). pp. 75–81 (In Russ.).

2. Peregudov M.A., Boyko A.A. [Model of the procedure of reserved access to the packet radio network environment]. *Telekommunikacii – Telecommunications*. 2015. vol. 6. pp. 7–15. (In Russ.).
3. Peregudov M.A., Boyko A.A. [Model of the Power Management Procedure of the Packet Radio Network]. *Telekommunikacii – Telecommunications*. 2015. vol. 9. pp. 13–18. (In Russ.).
4. Peregudov M.A., Steshkovoj A.S., Boyko A.A. [Probabilistic Random Multiple Access Procedure Model to the CSMA/CA Type Medium]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2018. Issue 4. vol. 59. pp. 92–114. (In Russ.).
5. Pande H.K., Thapliyal S., Mangal L.C. A new clock synchronization algorithm for multi-hop wireless ad hoc networks. 2010 Sixth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks. 2010. pp. 1–5.
6. Lai T., Zhou D. Efficient and Scalable IEEE 802.11 ad hoc mode timing synchronization function. 17th IEEE International Conferences on Advanced Information Networking and Applications. 2003. pp. 318–323.
7. Mahmood A. et al. Towards High Accuracy in IEEE 802.11 based Clock Synchronization using PTP. International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS 2011). 2011. pp. 13–18.
8. Elson J., Estrin D. Time Synchronization for Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium. 2001. p. 186.
9. Herman T., Zhang C. Stabilizing clock synchronization for wireless sensor networks. Springer Heidelberg. 2006. vol. 4280. pp. 335–349.
10. Lai T.H., Zhou D. Efficient and scalable IEEE 802.11 ad hoc mode timing pattern formation function. 17th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2003. pp. 318–323.
11. Safonov A.A. [Analysis mechanisms synchronization in personal and local wireless networks]. Extended abstract Ph.D. thesis. *Institut problem peredachi informacii imeny A.A. Harkevicha RAN – Institute transmission information problems named after A.A. Kharkevich Russian Academy of Sciences*. 2008. p. 20. (In Russ.).
12. Sheu J.P., Chao C.M., Sun C.W. A Clock Synchronization Algorithm for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. *Wireless Personal Communications*. 2007. vol. 43. no. 2. pp. 185–200.
13. Huang L., Lai T.H. On the Scalability of IEEE 802.11 Ad Hoc Networks. Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. 2002. pp. 173–182.
14. Garcia-Villegas E., Afaqui M.S., Lopez-Aguilera E. A novel cheater and jammer detection scheme for IEEE802.11-based wireless LANs. *Computer Networks*. 2015. vol. 86. pp. 40–46.
15. IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee et al. 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. IEEE Std. 2012. vol. 802. 11 p.
16. IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee et al. IEEE Standard for Information Technology-Telecommunication and information exchange between systems – LAN/MAN Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks(WPANs). IEEE Std. 2002. vol. 802.
17. IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee et al. IEEE Standard for Information Technology, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS). IEEE Std. 2003. vol. 802.

18. Liu C., Qiu J. Performance study of 802.11w for preventing DoS attacks on wireless local area networks. *Wireless Personal Communications*. 2017. vol. 95. no. 2. pp. 1031–1053.
19. Kaur J. Mac Layer Management Frame Denial of Service Attacks. International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). 2016. pp. 155–160.
20. Noman H.A., Abdullah S.M., Mohammed H.I. An Automated Approach to Detect Deauthentication and Disassociation Dos Attacks on Wireless 802.11 Networks. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*. 2015. vol. 12. no. 4. pp. 1694–1784.
21. Filipek J., Hudec L. Securing mobile ad hoc networks using distributed firewall with PKI. 2016 IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII). 2016. pp. 321–325.
22. Yacchirena A. et al. Analysis of attack and protection systems in Wi-Fi wireless networks under the Linux operating system. IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA). 2016. pp. 1–7.
23. Liu C., Qiu J. Performance study of 802.11w for preventing DoS attacks on wireless local area networks. *Wireless Personal Communications*. 2017. vol. 95. no. 2. pp. 1031–1053.
26. Bianchi G. IEEE 802.11–Saturation Throughput Analysis. *IEEE Communications Letters*. 1998. vol. 2. no. 12. pp. 318–320.
24. Boyko A.A., Peregudov M.A., Semchenko I.A., Steshkovej A.S. [Software complex optimization networks radio communication]. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programm dlya EVM – The Certificate on Official Registration of the Computer Program* 2018. vol. 2018614894. (In Russ.).