

М.А. ПЕРЕГУДОВ, И.А. СЕМЧЕНКО
**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛУЧАЙНОГО
МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА К СРЕДЕ ТИПА ALOHA ПРИ
ГОЛОСОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, ПЕРЕДАЧЕ СЛУЖЕБНЫХ
КОМАНД, ТЕКСТОВЫХ СООБЩЕНИЙ И
МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ ФАЙЛОВ В УСЛОВИЯХ
ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Перегудов М.А., Семченко И.А. Оценка эффективности случайного множественного доступа к среде типа ALOHA при голосовых соединениях, передаче служебных команд, текстовых сообщений и мультимедийных файлов в условиях деструктивных воздействий.

Аннотация. Оценка защищенности сетей цифровой радиосвязи при деструктивных воздействиях злоумышленника является важной задачей. Однако для случайного множественного доступа к среде типа ALOHA в сетях цифровой радиосвязи такая оценка не проводилась. В работе представлена аналитическая модель случайного множественного доступа к среде типа ALOHA в условиях деструктивных воздействий. В этой модели в качестве результирующего показателя оценки эффективности случайного доступа выступает обобщенный показатель, включающий вероятность успешного голосового соединения, передачи служебной команды, тестового сообщения или мультимедийного файла, степень наполнения и степень переполнения пакетами данных сети цифровой радиосвязи. Новый комплексный показатель — вероятность успешного голосового соединения, передачи служебной команды, тестового сообщения или мультимедийного файла — учитывает известные вероятности успешной доставки пакета данных, создания коллизии и свободного канала, а также новые средние времена передачи последовательности пакетов данных и коллизии, образованной при такой передаче. Новые показатели — степень наполнения и степень переполнения пакетами данных в сети цифровой радиосвязи определяют, насколько близко (далеко) от максимума находится значение комплексного показателя. Модель учитывает потенциально возможные деструктивные воздействия со стороны злоумышленника путем уточнения аналитических выражений для известных вероятностных и новых временных характеристик. Установлено, во-первых, количественная взаимосвязь между вероятностью успешного голосового соединения, передачи служебной команды, тестового сообщения или мультимедийного файла и средней длительностью коллизии в канале передачи данных, а во-вторых, для гарантированного вывода из строя сети цифровой радиосвязи со случайным множественным доступом к среде типа ALOHA злоумышленник должен постоянно осуществлять деструктивное воздействие. Результаты работы применимы в области проектирования сетей цифровой радиосвязи, функционирующих в условиях деструктивных воздействий, а также при разработке автоматических систем оптимизации работы сетей цифровой радиосвязи и их защиты от таких воздействий.

Ключевые слова: сеть цифровой радиосвязи, деструктивное воздействие, аналитическая модель, случайный множественный доступ к среде, ALOHA, вероятность передачи, эффективность функционирования.

1. Введение. Использование злоумышленниками средств деструктивных воздействий (ДВ), направленных на нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации сетей цифровой радиосвязи (СЦР) бытового и коммерческого назначения, приобрело массовый характер. Сами ДВ становятся все более

скрытными и бескомпроматными и определить факт их применения крайне затруднительно. В таких условиях обеспечение защиты СЦР от ДВ стало весьма актуальной и трудно решаемой задачей. Как показывает практика, латание одних «дыр» в защите СЦР неизбежно приводит к появлению новых. Полноценно решить задачу защиты СЦР от ДВ невозможно без системного и детального понимания сути происходящих в них процессов. Особенно это характерно для процедур канального уровня эталонной модели OSI, на котором сосредоточены одни из наиболее опасных уязвимостей СЦР, связанные с созданием коллизий и ложных соединений.

Настоящая статья продолжает курс работ [1-5], посвященных тематике защиты СЦР от ДВ на канальном уровне эталонной модели OSI. В ней рассматривается процедура случайного множественного доступа абонентов к среде (СМДС) типа ALOHA — одна из процедур канального уровня сетей цифровой радиосвязи. Несмотря на то, что данная процедура является пионером в линейке процедур случайного множественного доступа, из-за простоты реализации используемого оборудования она и сегодня не потеряла своей актуальности. С применением процедуры СМДС типа ALOHA функционируют, например, СЦР системы спутниковой связи Iridium [6], а также СЦР стандарта DMR (реализация Tier II) [7], получившие во всем мире широкое распространение из-за высокого качества связи и дешевизны оборудования.

2. Анализ существующих работ. Известен ряд моделей СМДС типа ALOHA [8-29]. Базовой моделью этого доступа является модель Нормана Абрамсона [8, 11], а также модель [16]. В работах [9, 12] рассмотрено стабильное и нестабильное функционирование СЦР. В работе [10] приводятся приближенные методы проектирования и анализа СЦР с СМДС типа ALOHA. В работе [13] представлена модель СМДС, применимая для спутниковых систем связи, а в [21] содержатся предложения по улучшению производительности таких систем с оценкой успешной доставки пакета фиксированной длины. В работах [14, 15, 19] приводятся модели оценки эффективности функционирования СМДС типа ALOHA для реализаций систем с произвольной длиной пакета и произвольным временем его поступления в канал. В [17] описывается аналитическая модель, позволяющая находить верхние и нижние границы интенсивности успешных передач и пропускной способности канала. В [18] приведен анализ времени задержки пакетов, а в [20-29] представлены модернизированные алгоритмы СМДС типа ALOHA, повышающие производительность СЦР за счет применения кодирования и новых принципов реализации физического уровня.

В известных моделях в качестве показателя эффективности СМДС типа ALOHA выступают вероятности успешной доставки пакета

данных, создания коллизии и свободного канала за любой временной интервал. С использованием таких показателей оценка эффективности СМДС типа ALOHA в СЦР справедлива только для служебных команд, состоящих из одного пакета данных. Однако голосовые соединения, текстовые сообщения и мультимедийные файлы содержат различные последовательности пакетов данных, предписанные спецификациями стандартов СЦР, и в случайном доступе в канале связи участвуют не только служебные команды, но и голосовые соединения, текстовые сообщения и мультимедийные файлы.

В результате оценки эффективности СМДС типа ALOHA получить количественное значение известного показателя — вероятность успешной доставки пакета данных — необходимо, но недостаточно, так как это значение может быть получено для двух значений каждой характеристики СЦР (общее количество абонентских терминалов, вероятности первичных и вторичных передач пакетов данных), одно из которых характеризует состояние насыщения пакетами данных такой сети, а другое — состояние перенасыщения такими пакетами. В состоянии насыщения пакетами данных СЦР функционирует не на максимум и имеет возможность для обработки большего количества передач пакетов данных, а в состоянии перенасыщения в такой сети преобладают над успешными передачами пакетов данных их столкновения (коллизии). Впервые о данных состояниях СЦР упоминалось в [1]. Однако аналитически состояния насыщения и перенасыщения пакетами данных СЦР, и, как следствие, степень наполнения и степень переполнения такими пакетами не определялись. На практике администратор СЦР по количественному значению вероятности успешной доставки пакета данных без учета состояния насыщения или перенасыщения пакетами данных, в котором находится такая сеть в настоящий момент времени, не способен в полной мере оценить эффективность СМДС типа ALOHA.

Также в известных моделях не учтены потенциально возможные ДВ со стороны злоумышленника и, соответственно, нет возможности прогнозировать последствия от их реализации.

Цель работы — создание аналитической модели случайного множественного доступа к среде типа ALOHA, позволяющей оценивать успешность голосовых соединений, передачи служебных команд, текстовых сообщений и мультимедийных файлов в условиях деструктивных воздействий со стороны злоумышленника с учетом состояний насыщения и перенасыщения пакетами данных сетей цифровой радиосвязи.

3. Описательная модель случайного множественного доступа к среде типа ALOHA. С учетом результатов работ [1, 2, 8, 11]

Рассмотрим детально функциональную схему СМДС типа АЛОHA в условиях ДВ без средства коммутации и управления. Каждый из N абонентских терминалов, конкурирующих между собой за использование канала передачи данных, может функционировать в режиме первичной или вторичной передачи пакетов данных. В режиме первичной передачи абонентский терминал генерирует и передает пакеты данных с вероятностью p_0 в любые временные интервалы длительностью τ . В режиме вторичной передачи абонентский терминал повторно отправляет не переданные успешно пакеты данных с вероятностью p_r в любые временные интервалы или по окончании времени отсрочки.

Передача считается успешной, если соблюдаются два условия:

- только один из N абонентских терминалов осуществляет передачу пакета в течение временного интервала 2τ ;
- отсутствует воздействие на СЦР со стороны злоумышленника.

В противном случае в канале передачи данных происходит столкновение (наложение) пакетов, приводящее к нарушению достоверности передаваемых данных. Такое столкновение пакетов называется коллизией в канале передачи данных [8]. Из рисунка 2 видно, что коллизия при передаче абонентскими терминалами пакета данных по времени может составлять от τ до 2τ .

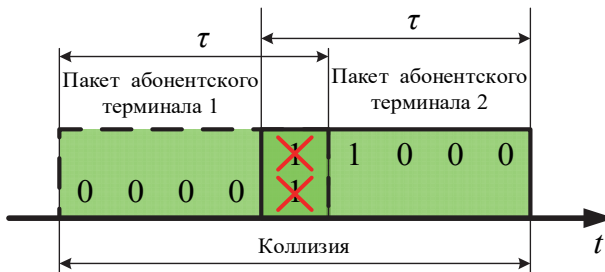


Рис. 2. Коллизия при передаче абонентскими терминалами пакета данных

В СЦР служебные команды состоят только из одного пакета данных, а голосовые соединения, текстовые сообщения и мультимедийные файлы — из различных последовательностей пакетов данных, предписанных стандартами СЦР. Например, для стандарта DMR Tier II [7, 30] голосовое соединение состоит минимум из 8 пакетов данных (рисунок 3).

В таком случае необходимо успешно доставить не только один пакет данных, но и последовательность пакетов данных со средней длительностью T_{sc} . При этом коллизия при передаче абонентскими терминалами последовательности пакетов данных будет от T_{sc} до $2T_{sc}$ (рисунок 4), $T_{sc} < T_{cl} < 2T_{sc}$.

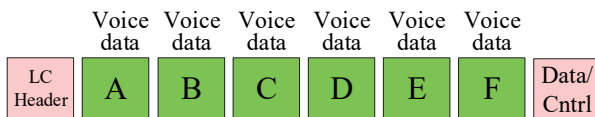


Рис. 3. Минимальная последовательность пакетов данных, образующих голосовое соединение в стандарте DMR Tier II

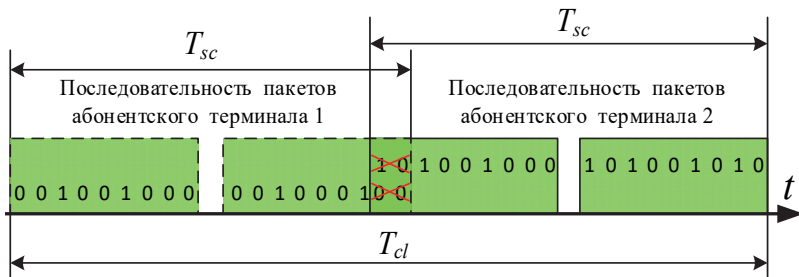


Рис. 4. Коллизия при передаче абонентскими терминалами последовательности пакетов данных

Злоумышленник в интересах создания коллизий и ложных соединений реализует следующие ДВ:

- формирует помехи с вероятностью P_f на физическом уровне СЦР;
- передает первичные и вторичные пакеты данных от имени абонентских терминалов, не входящих в атакуемую сеть, с вероятностью D_k ;
- передает первичные пакеты от имени Q устройств (абонентских терминалов), входящих в атакуемую сеть, с вероятностью Δp_0 ;
- передает вторичные пакеты от имени B устройств (абонентских терминалов), входящих в атакуемую сеть, с вероятностью Δp_r .

Все перечисленные воздействия осуществляются злоумышленником в интервале длительностью ΔT_{cl} .

Описание сценария функционирования СЦР на уровне СМДС типа АЛОНА в условиях ДВ со средством коммутации и управления аналогично приведенному выше описанию. При использовании средства коммутации и управления в СЦР функционируют две линии передачи данных: линия вверх (частота передачи абонентского терминала и приема средства коммутации и управления) и линия вниз (частота передачи средства коммутации и управления и частота приема абонентского терминала).

В рассматриваемой модели СМДС принимается допущение — средство коммутации и управления, абонентские терминалы и злоумышленник находятся в зоне энергетической доступности.

4. Аналитическая модель случайного множественного доступа к среде типа АЛОНА. В соответствии с [8] поступления пакетов данных от абонентских терминалов СЦР за временной интервал 2τ распределены по закону Пуассона, вероятность которых с учетом деструктивных воздействий со стороны злоумышленника примет следующий вид:

$$P\{k\} = \frac{(2S)^k}{k!} \cdot e^{-2S} \cdot (1 - D_k) \cdot (1 - P_f), \quad (1)$$

где k — количество поступлений пакетов данных от абонентских терминалов СЦР за временной интервал 2τ ; S — суммарный поток пакетов данных, приходящих в СЦР от абонентских терминалов; D_k — вероятность передачи первичных и вторичных пакетов данных от имени абонентских терминалов, не входящих в атакуемую сеть; P_f — вероятность создания помехи на физическом уровне СЦР.

С учетом ДВ со стороны злоумышленника, первичных и вторичных передач абонентскими терминалами СЦР суммарный поток пакетов данных равен:

$$S = (N - i) \cdot p_0 + Q \cdot \Delta p_0 + i \cdot p_r + B \cdot \Delta p_r, \quad (2)$$

где N — общее количество абонентских терминалов в СЦР; i — количество абонентских терминалов, функционирующих в режиме вторичной передачи; p_0 — вероятность передачи абонентским терминалом первичных пакетов данных; p_r — вероятность передачи абонентским терминалом вторичных пакетов данных; Δp_0 — вероятность передачи злоумышленником первичных пакетов данных от имени Q абонентских терминалов, входящих в атакуемую сеть; Δp_r — вероятность передачи злоумышленником вторичных пакетов от имени B абонентских терминалов, входящих в атакуемую сеть.

Из выражений (1) и (2) получим вероятность успешной доставки пакетов данных [8] с учетом ДВ со стороны злоумышленника в любой временной интервал длительностью 2τ :

$$P_{sc} = [(N - i) \cdot p_0 + Q \cdot \Delta p_0 + i \cdot p_r + B \cdot \Delta p_r] \times e^{-2[(N - i) \cdot p_0 + Q \cdot \Delta p_0 + i \cdot p_r + B \cdot \Delta p_r]} \cdot (1 - D_k) \cdot (1 - P_f). \quad (3)$$

Аналогично из выражений (1) и (2) получим вероятность свободного канала передачи данных [8] с учетом ДВ в любой временной интервал длительностью 2τ :

$$P_{fr} = e^{-2[(N-i) \cdot p_0 + Q \cdot \Delta p_0 + i \cdot p_r + B \cdot \Delta p_r]} \times (1 - D_k) \cdot (1 - P_f). \quad (4)$$

Так как вероятности успешной доставки пакетов данных, свободного канала и создания коллизий образуют полную группу событий, то вероятность создания коллизий в канале передачи данных можно представить следующим выражением:

$$P_{cl} = 1 - (P_{sc} + P_{fr}). \quad (5)$$

Для оценки эффективности СМДС типа АЛОНА СЦР в условиях ДВ со стороны злоумышленника предлагается использовать вероятность успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла, определяемому как отношение времени успешной передачи абонентским терминалом последовательности пакетов данных к общему времени, затраченному на успешную передачу последовательности пакетов, коллизию и свободный канал:

$$\Omega = \begin{cases} \frac{P_{sc} \cdot T_{sc}}{P_{sc} \cdot T_{sc} + P_{cl} \cdot T_{cl} + P_{fr} \cdot \tau}, & \text{если } (\Delta T_{cl} \leq T_{cl}) \cap (T_{sc} > \tau); \\ P_{sc}, & \text{если } T_{sc} = T_{cl} = \Delta T_{cl} = \tau; \\ \frac{P_{sc} \cdot T_{sc}}{P_{sc} \cdot T_{sc} + P_{cl} \cdot \Delta T_{cl} + P_{fr} \cdot \tau}, & \text{если } (\Delta T_{cl} > T_{cl}) \cap (T_{sc} > \tau), \end{cases} \quad (6)$$

где T_{sc} — среднее время передачи абонентским терминалом последовательности пакетов данных; T_{cl} — среднее время коллизии в канале передачи данных; ΔT_{cl} — среднее время ДВ со стороны злоумышленника.

В СЦР с СМДС типа АЛОНА голосовые соединения, текстовые сообщения и мультимедийные файлы отличаются значением среднего времени передачи абонентским терминалом последовательности пакетов данных T_{sc} , а среднее время коллизии в канале передачи данных удовлетворяет следующему условию:

$$T_{sc} < T_{cl} < 2T_{sc}. \quad (7)$$

Из анализа работ [1, 2, 31, 32, 33] следует, что приведенный показатель — вероятность успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла может также использоваться при оценке эффективности СМДС типа S-АЛОНА СЦР.

Зависимости вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла без учета ДВ от общего количество абонентских терминалов СЦР с СМДС типа АЛОНА и вероятности первичных передач такими терминалами пакетов данных приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

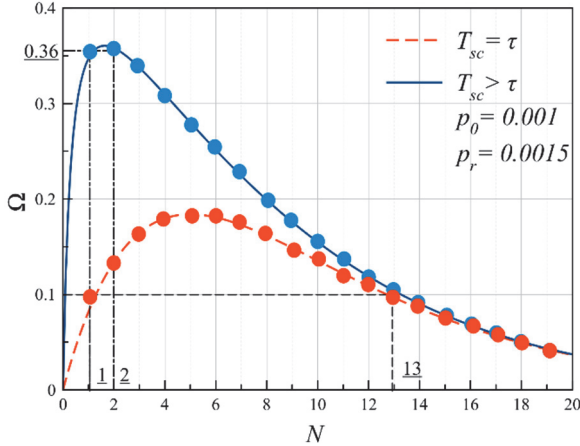


Рис. 5. Зависимость вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла от общего количество абонентских терминалов сети цифровой радиосвязи

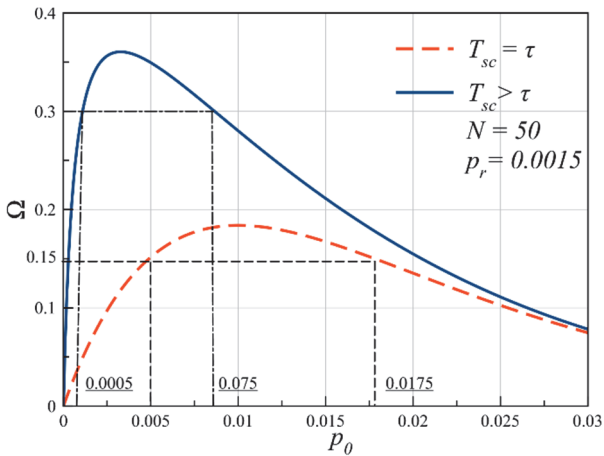


Рис. 6. Зависимость вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла от вероятности первичных передач пакетов данных

Из рисунков 5 и 6 видно, что одному значению вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла соответствуют два значения: как для общего количества абонентских терминалов в СЦР, так и для вероятности первичных передач такими терминалами пакетов данных. Аналогично и для вероятности вторичных передач абонентскими терминалами пакетов данных. В соответствии с [1] участок возрастания вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла характеризует состояние насыщения пакетами данных СЦР, а участок убывания такой вероятности — состояние перенасыщения пакетами данных. Поэтому наименьшее полученное значение как для общего количества абонентских терминалов в СЦР, так и для вероятностей первичных и вторичных передач такими терминалами пакетов данных определяет состояние насыщения пакетами данных СЦР, а наибольшее такое значение — состояние перенасыщения пакетами данных. При этом аналитическое выражение, определяющее состояние насыщения или перенасыщения пакетами данных СЦР для любых значений общего количества абонентских терминалов, вероятностей первичных и вторичных передач такими терминалами пакетов данных, имеет следующий вид:

$$S = \begin{cases} S_0, & \text{если } \frac{d\Omega}{dx} > 0; \\ S_1, & \text{если } \frac{d\Omega}{dx} < 0; \\ S_2, & \text{если } \frac{d\Omega}{dx} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $x \in (N, p_0, p_r)$, S_0 и S_1 — состояния насыщения и перенасыщения пакетами данных СЦР соответственно; S_2 — состояние оптимального функционирования СМДС такой сети.

Учитывая дискретность функции $\Omega(N)$, ее производную будем рассчитывать с использованием численного дифференцирования. Для определения знака производных непрерывных функций $\Omega(p_0)$ и $\Omega(p_r)$ достаточно также использовать численное дифференцирование. Методы численного дифференцирования реализованы как в Matlab, так и в Mathcad.

Из аналитического выражения (8) видно, что в состоянии оптимального функционирования СЦР имеет максимум вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла.

С использованием выражения (8) определить состояние СЦР необходимо, но недостаточно, так как неизвестно насколько наполнена или переполнена такая сеть пакетами данных. Поэтому предлагается использовать показатели, характеризующие степень наполнения и степень переполнения пакетами данных СЦР.

Степень наполнения пакетами данных СЦР имеет следующий вид:

$$U_s = \begin{cases} 0, & \text{если } S = S_1; \\ \frac{\Omega}{\Omega_{\max}}, & \text{если } S = S_0; \\ 1, & \text{если } S = S_2, \end{cases} \quad (9)$$

а степень переполнения пакетами данных такой сети:

$$I_s = \begin{cases} 0, & \text{если } (S = S_0) \cup (S = S_2); \\ 1 - \frac{\Omega}{\Omega_{\max}}, & \text{если } S = S_1, \end{cases} \quad (10)$$

где Ω_{\max} — максимальное значение вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла.

Максимальное значение вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла определяется следующим образом:

$$\Omega_{\max} = \Omega(x_0) : \frac{d\Omega}{dx}(x_0) = 0, \quad x_0 \in (N_0, p_{00}, p_{r0}), \quad (11)$$

где N_0 , p_{00} , p_{r0} — значения общего количества абонентских терминалов СЦР, вероятностей первичных и вторичных передач абонентскими терминалами пакетов данных, при которых производная вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла обращается в ноль.

Уточнив оценку эффективности СМДС типа АЛОНА определением состояний его оптимального функционирования, насыщения и перенасыщения пакетами данных СЦР, получаем обобщенный показатель такой оценки в виде следующей системы:

$$\Theta = \begin{cases} \Omega; \\ U_s; \\ I_s. \end{cases} \quad (12)$$

Анализ работ [1, 2, 31-37] показал, что СЦР с СМДС типа S-ALOHA и CSMA/CA могут находиться в состояниях оптимального функционирования СМДС, насыщения и перенасыщения пакетами данных таких сетей. Поэтому приведенный обобщенный показатель оценки эффективности СМДС справедлив и для СЦР со СМДС типа S-ALOHA и CSMA/CA.

На основании приведенных показателей оценки эффективности СМДС типа ALOHA СЦР разработана система показателей, приведенная на рисунке 7.



Рис. 7. Система показателей оценки эффективности случайного множественного доступа к среде типа ALOHA сетей цифровой радиосвязи

Система показателей оценки эффективности СМДС типа АЛОНА СЦР позволяет проводить оценку эффективности комплексным показателем — вероятностью успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла с учетом частных вероятностных и временных показателей, таких как вероятности успешной доставки пакета данных, создания коллизии, свободного канала и средние времена коллизии, голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла, а также показателями степени наполнения и степени переполнения пакетами данных такой сети, зависящими от комплексного показателя.

5. Методика оценки эффективности случайного множественного доступа к среде типа АЛОНА в условиях деструктивных воздействий. Методика оценки эффективности СМДС типа АЛОНА СЦР заключается в выполнении алгоритма, блок-схема которого представлена на рисунке 8.

Шаг 1. Устанавливается интервал анализа канала СЦР Δt .

Шаг 2. В течение временного интервала Δt записывается в базу данных:

- последовательности, передаваемые каждым абонентским терминалом СЦР и количество пакетов в последовательности;
- подтверждения об успешной доставке последовательности (для СЦР с механизмом подтверждения успешной доставки).

Для СЦР с механизмом подтверждения определяют тип последовательности: первичная или вторичная. Правила определения типа последовательности следующие:

- последовательность, на которую абонентский терминал получил подтверждение об успешной ее доставке, является первичной;
- последовательность, на которую абонентский терминал не получил подтверждение об успешной доставке, является вторичной.

Шаг 3. Вычисляется средняя длительность сеанса радиосвязи T_{sc} в СЦР:

$$T_{sc} = N \cdot (L_o + L_c) \cdot \tau, \quad (13)$$

где L_o — общая длина первичных последовательностей пакетов, переданных всеми абонентскими терминалами СЦР; L_c — общая длина вторичных последовательностей пакетов, переданных всеми абонентскими терминалами СЦР; N_{len} — общее количество последовательностей; τ — длительность одного пакета.



Рис. 8. Методика оценки эффективности функционирования случайного множественного доступа к среде типа ALOHA в условиях деструктивных воздействий

Длину первичных L_o и вторичных L_c последовательностей пакетов, переданных каждым абонентским терминалом СЦР, определяют путем суммирования в базе данных значений ячеек, соответствующих количеству пакетов в последовательности.

Для СЦР без подтверждения успешной доставки последовательности пакетов данных вычисляют общую длину последовательностей пакетов.

Шаг 4. Определяется среднее время коллизий в СЦР T_{cl} по формуле:

$$T_{cl} = N_{lencol}^{-1} \cdot L_{col} \cdot \tau, \quad (14)$$

где N_{lencol} — количество последовательностей с признаками коллизии (последовательности у которых совпадает время записи в базу данных, но различные адреса источников последовательности, а также поврежденные последовательности), L_{col} — общая длина последовательностей пакетов, содержащих коллизии.

Длина последовательностей пакетов, содержащих коллизии L_{col} , определяется путем суммирования в базе данных значений ячеек, соответствующих количеству пакетов в последовательности.

Шаг 5. Определяется среднее количество первичных O и вторичных C пакетов, переданных абонентскими терминалами СЦР:

$$O = N^{-1}L_o; C = N^{-1}L_c, \quad (15)$$

где N — общее количество абонентских терминалов сети радиосвязи.

Для СЦР без подтверждения успешной доставки пакетов, вычисляют общее среднее количество пакетов, переданных абонентскими терминалами.

Шаг 6. Определяются вероятности передачи первичных p_o и вторичных p_r пакетов абонентских терминалов СЦР в каждом временном интервале t продолжительностью τ следующим образом:

$$p_o = OV^{-1}; p_r = CV^{-1}; V = \Delta t(\tau)^{-1}, \quad (16)$$

где V — количество временных интервалов продолжительностью τ в интервале анализа Δt .

Шаг 7. Вычисляются вероятности успешной доставки пакетов P_{sc} , свободного канала P_{fr} и создания коллизий P_{cl} по формулам (3)-(5).

Шаг 8. Определяется вероятность успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла Ω с использованием аналитического выражения (6).

Шаг 9. Вычисляются степень U_s и степень I_s пакетами данных СЦР по формулам (8)-(11).

Шаг 10. Определяются обобщенный показатель эффективности СМДС типа ALOHA Θ с использованием выражения (12).

6. Результаты численного эксперимента. В качестве примера рассмотрим СЦР стандарта DMR, состоящую из 50 абонентских терминалов ($N=50$). Для этого примера заимствуем из [38] значения для вероятностей передачи абонентским терминалом первичных $p_0=0,01$ и вторичных пакетов данных $p_r=0,03$. Минимальный временной интервал в СЦР стандарта DMR τ равен 0,025 секунды [30]. Среднее время передачи мультимедийных данных T_{sc} будем считать равным 1 секунде.

Результаты моделирования СМДС типа ALOHA СЦР без деструктивных воздействий со стороны злоумышленника и в условиях различных ДВ представлены на рисунках 9-13.

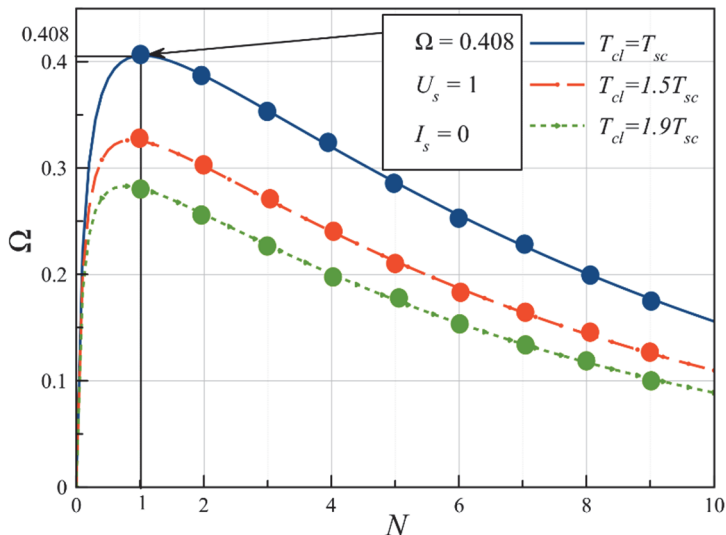


Рис. 9. Зависимость вероятности успешного голосового соединения, передачи текстового сообщения или мультимедийного файла от общего количества абонентских терминалов в сети

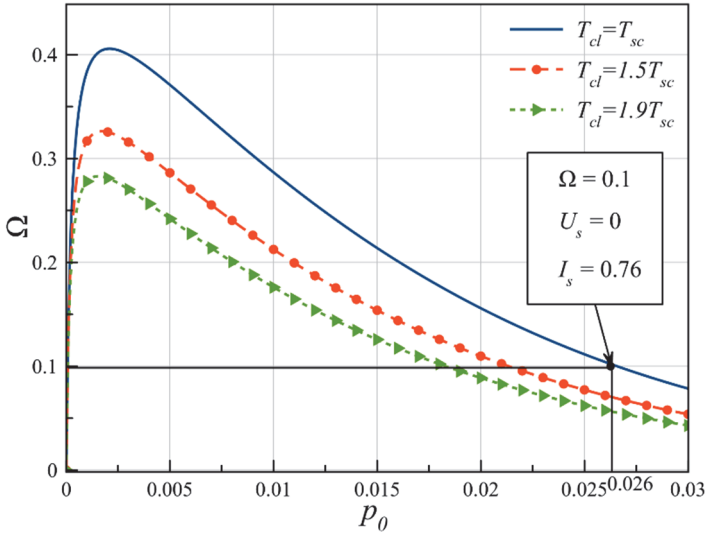


Рис. 10. Зависимость вероятности успешного голосового соединения, передачи текстового сообщения или мультимедийного файла от вероятности передачи абонентскими терминалами первичных пакетов данных

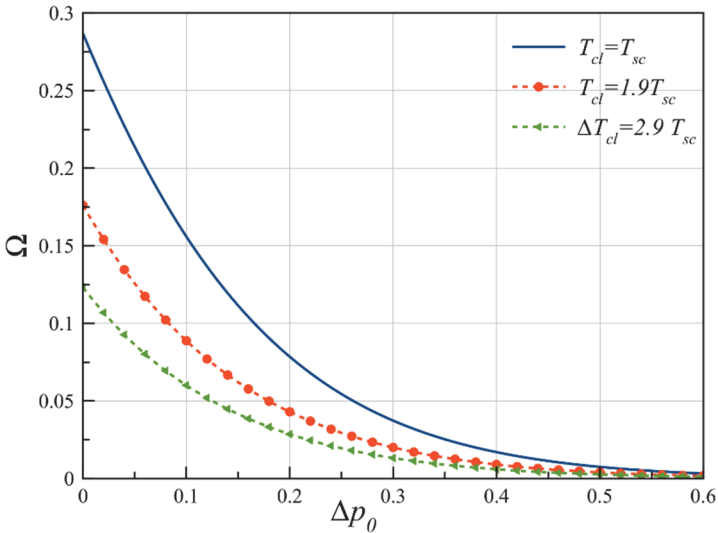


Рис. 11. Зависимость вероятности успешного голосового соединения, передачи текстового сообщения или мультимедийного файла от вероятности передачи злоумышленником первичных пакетов от имени пяти абонентских терминалов сети

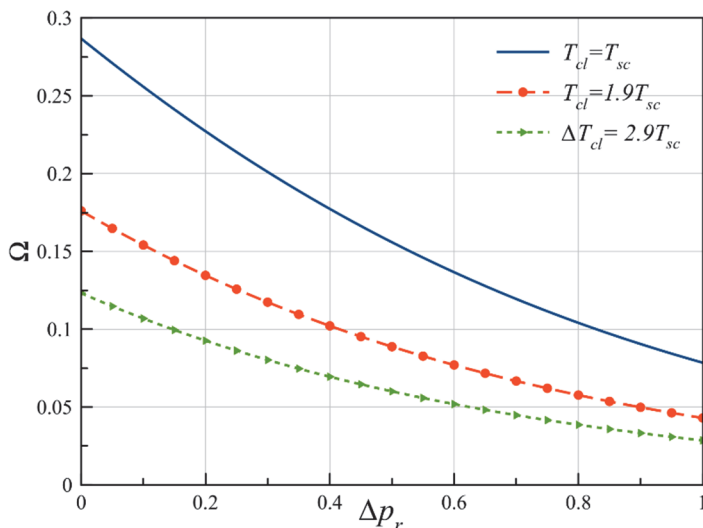


Рис. 12. Зависимость вероятности успешного голосового соединения, передачи текстового сообщения или мультимедийного файла от вероятности передачи злоумышленником вторичных пакетов от имени одного абонентского терминала сети

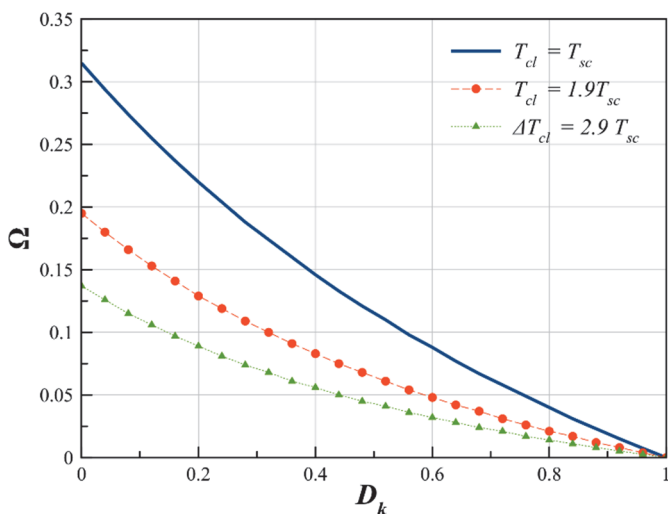


Рис. 13. Зависимость вероятности успешного голосового соединения, передачи текстового сообщения или мультимедийного файла от вероятности передачи злоумышленником первичных и вторичных пакетов от имени абонентского терминала, не входящего в атакуемую сеть

Из анализа рисунков 9-13 следует:

1. При уменьшении в два раза средней длительности коллизии в канале передачи данных увеличивается практически в два раза вероятность успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла. Уменьшение средней длительности коллизии в канале передачи данных возможно только путем коррекции частот первичных и вторичных передач абонентскими терминалами пакетов данных механизмами, предусмотренными спецификациями стандартов цифровой радиосвязи.

2. Из графиков зависимостей вероятности успешного голосового соединения, передачи служебной команды, текстового сообщения или мультимедийного файла от общего количества абонентских терминалов СЦР и вероятности первичных передач этими абонентскими терминалами пакетов данных можно определить состояния оптимального функционирования СМДС типа АЛОНА, насыщения и перенасыщения пакетами данных такой сети. Однако построение графиков таких зависимостей при администрировании СЦР в ходе их эксплуатации, с одной стороны, вносит избыточность в вычислительных операциях, а с другой — не отражает количественно насколько насыщена или перенасыщена пакетами данных СЦР. При этом обобщенный показатель эффективности СМДС типа АЛОНА определяется только для одного набора значений общего количества абонентских терминалов СЦР, вероятностей первичных и вторичных передач этими абонентскими терминалами пакетов данных, а также учитывает количественно степень наполнения и степень переполнения пакетами данных такой сети. Применение обобщенного показателя позволит разрабатывать алгоритмы функционирования в режиме реального времени для автоматических систем оптимизации работы СЦР и их защиты от ДВ.

3. ДВ со стороны злоумышленника способны снизить эффективность функционирования СМДС типа АЛОНА СЦР практически до нуля.

4. Для гарантированного вывода из строя сети при передаче первичных и вторичных пакетов данных от имени абонентских терминалов злоумышленник должен обеспечить передачу с вероятностью, стремящейся к единице, что свидетельствует, с одной стороны, о полном захвате радиоресурса, а с другой стороны, такое потенциально возможное воздействие должно быть постоянным.

7. Заключение. Таким образом, была предложена аналитическая модель, основанная на применении методов теорий вероятности и дифференциального исчисления, которая позволяет проводить оценку эффективности случайного множественного

доступа к среде типа АЛОНА сетей цифровой радиосвязи с учетом успешности голосовых соединений, передачи служебных команд, текстовых сообщений или мультимедийных файлов, степень наполнения, степень переполнения пакетами данных таких сетей и потенциально возможные деструктивные воздействия со стороны злоумышленника. Причем для определения состояния функционирования сети цифровой радиосвязи не требуется строить графики, а достаточно определить обобщенный показатель для заданного набора исходных данных. В результате моделирования выявлено, во-первых, количественная взаимосвязь между эффективностью случайного множественного доступа к среде типа АЛОНА и средней длительностью коллизии в канале передачи данных, а, во-вторых, для гарантированного вывода из строя сети цифровой радиосвязи злоумышленник должен постоянно осуществлять деструктивное воздействие. Такое поведение злоумышленника является важным, демаскирующим его признаком при обнаружении деструктивных воздействий и обосновывает возможность его местоопределения пеленгационными средствами. Предложенная аналитическая модель применима при разработке автоматических систем оптимизации работы сетей цифровой радиосвязи и их защиты от деструктивных воздействий, функционирующих в режиме реального времени.

Литература

1. *Перегудов М.А., Бойко А.А.* Модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа S-ALOHA // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6. С. 75–81.
2. *Перегудов М.А., Бойко А.А.* Оценка защищенности сети пакетной радиосвязи от имитации абонентских терминалов на уровне процедуры случайного множественного доступа к среде типа S-ALOHA // Информационные технологии. 2015. № 7. С. 527–534.
3. *Перегудов М.А., Бойко А.А.* Модель процедуры зарезервированного доступа к среде сети пакетной радиосвязи // Телекоммуникации. 2015. № 6. С. 7–15.
4. *Перегудов М.А., Бойко А.А.* Модель процедуры управления питанием сети пакетной радиосвязи // Телекоммуникации. 2015. № 9. С. 13–18.
5. *Перегудов М.А., Стешковой А.С., Бойко А.А.* Вероятностная модель процедуры случайного множественного доступа к среде типа CSMA/CA // Труды СПИИРАН. 2018. Вып. 4(59). С. 92–114.
6. *Макаренко С.И.* Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1–34.
7. ETSI TS 102 361-1 V2.4.1 (2016-02) Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol // European Telecommunications Standards Institute. 2016.
8. *Abramson N.* The ALOHA system: another alternative for computer communications // AFIPS Conference Proceedings. 1970. pp. 281–285
9. *Carleial A.B., Hellman M.E.* Bistable behavior of ALOHA- type systems // IEEE Transactions on Communications. 1975. vol. 23. pp. 401–410.

10. *Kobayashi H., Onozato Y., Huynh D.* An Approximate Method for Design and Analysis of an ALOHA System // IEEE Transactions Communications. 1977. vol. 25. pp. 148–158.
11. *Захаров А.С.* Метод случайного доступа. Часть 1 // Ярославский государственный университет. 2012. 36 с.
12. *Цыбаков Б.С., Бакиров В.Л.* Устойчивость несинхронной системы Алоха // Проблемы передачи информации. 1984. Т. 20. № 1. С. 82–94.
13. *Choudhury G.L., Rappaport S.* Diversity ALOHA-A random access scheme for satellite communications // IEEE Transactions Communications. 1983. vol. 31. no. 3. pp. 450–457.
14. *Ferguson M.J.* A Study of Unslotted ALOHA with Arbitrary Message Lengths // Proceedings of the Symposium on Data Communications. 1975. pp. 5.20–5.25.
15. *Sant D.* Throughput of Unslotted ALOHA Channels with Arbitrary Packet Interarrival Time Distributions // IEEE Transactions on Communications. 1980. vol. 28. no. 8. pp. 1422–1425.
16. *Roberts L.G.* ALOHA packet system with and without slots and capture // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 1975. vol. 5. no. 2. pp. 28–42.
17. *Dziech A., Pach A.R.* Bounds on the throughput of an unslotted aloha channel in the case of a heterogeneous users' population // Kybernetika. 1989. vol. 25(6). pp. 476–485.
18. *Ferguson M.J.* An approximate analysis of delay for fixed and variable length packets in an unslotted ALOHA channel // IEEE Transactions on Communications. 1977. vol. 25(7). pp. 644–654.
19. *Bellini S., Borgonovo F.* On the throughput of an ALOHA channel with variable length packets // IEEE Transactions on Communications. 1980. vol. 28(11). pp. 1932–1935.
20. *Kissling C.* Performance Enhancements for Asynchronous Random Access Protocols over Satellite // 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2011. pp. 1–6.
21. *Collard F., De Gaudenzi R.* On the Optimum Packet Power Distribution for Spread Aloha Packet Detectors with Iterative Successive Interference Cancellation // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2014. vol. 13. no. 12. pp. 6783–6794.
22. *De Gaudenzi R., del Rio Herrero O., Gallinaro G.* Enhanced spread aloha physical layer design and performance // International Journal of Satellite Communications and Networking. 2014. vol. 32. no. 6. pp. 457–473.
23. *Clazzer F., Marchese M.* Layer 3 Throughput Analysis of Advanced ALOHA Protocols // 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). 2014. pp. 533–538.
24. *Stefanovic C., Popovski P., Vukobratovic D.* Frameless ALOHA Protocol for Wireless Networks // IEEE Communications Letters. 2012. vol. 16. no. 12. pp. 2087–2090.
25. *Gallinaro G. et al.* Enhanced spread spectrum ALOHA system level performance assessment // International Journal of Satellite Communications and Networking. 2014. vol. 32. no. 6. pp. 485–503.
26. *Tong Z., Haenggi M.* A Throughput-Optimum Adaptive ALOHA MAC Scheme for Full-Duplex Wireless Networks // 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2014. pp. 1–6.
27. *Zheng L., Cai L.* AFDA: Asynchronous flipped diversity ALOHA for emerging wireless networks with long and heterogeneous delay // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing. 2014. vol. 3. no. 1. pp. 64–73.
28. *Wang L., Li H., Jiang Y.* Adaptive-opportunistic Aloha: A media access control protocol for unmanned aerial vehicle-wireless sensor network systems // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2016. vol. 12(8). pp. 1–11.
29. *Sriwan A., Sittichivapak S.* Performance Analysis of ALOHA Framework under Limited Access of Data Transmission for Active RFID System // Procedia Computer Science. 2016. vol. 86. pp. 19–22.

30. ETSI TS 102 361-2 V2.3.1 (2016-02) Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 2: DMR voice and generic services and facilities // European Telecommunications Standards Institute. 2016.
31. *Paolini E., Liva G., i Amat A.G.* A structured irregular repetition slotted ALOHA scheme with low error floors // 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2017. pp. 1–6.
32. *Ivanov M., Brännström F., i Amat A.G., Popovski P.* Broadcast Coded Slotted ALOHA: A Finite Frame Length Analysis // IEEE Transactions on Communications. 2017. vol. 65(2). pp. 651–662.
33. *Reis J. et al.* Performance of a cognitive p-persistent slotted Aloha protocol // 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). 2015. pp. 405–410.
34. *Laufer R., Kleinrock L.* On the Capacity of Wireless CSMA/CA Multihop Networks // 2013 Proceedings IEEEINFCOM. 2013. pp. 1312–1320.
35. *Doost-Mohammady R., Naderi M.Y., Chowdhury K.R.* Performance Analysis of CSMA/CA based Medium Access in Full Duplex Wireless Communications // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2015. vol. 15. no. 6. pp. 1457–1470.
36. *Ganhão F. et al.* Uplink Performance Evaluation of Packet Combining ARQ for MPR Prefix-Assisted DS-CDMA // IEEE Transactions on Communications. 2016. vol. 63(7). pp. 2685–2697.
37. *Yang Y., Chen B., Srinivasan K., Shroff N.* Characterizing the achievable throughput in wireless networks with two active RF chains // IEEE INFOKOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. 2014. pp. 262–270.
38. ETSI. (RES06.1). Scenarios for Comparison of Technical Proposals for DTRS. Working document (91)23 // European Telecommunications Standards Institute. 1991.

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

Семченко Иван Александрович — научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Область научных интересов: методы и системы защиты информации. Число научных публикаций — 2. vania.sem4@yandex.ru; ул. Ст. Большевиков, 54А, 394064, Воронеж, Российская Федерация; р.т.: +7(473)236-5228; факс: +7(473)244-7860.

M.A. PEREGUDOV, I.A. SEMCHENKO
**EVALUATION OF EFFICIENCY OF RANDOM MULTIPLE
ACCESS TO ALOHA TYPE ENVIRONMENT WITH VOICE
CONNECTIONS, TRANSFER OF SERVICE COMMANDS, TEXT
MESSAGES AND MULTIMEDIA FILES IN DESTRUCTIVE
IMPACT CONDITIONS**

Peregudov M.A., Semchenko I.A. Evaluation of Efficiency of Random Multiple Access to Aloha Type Environment with Voice Connections, Transfer of Service Commands, Text Messages and Multimedia Files in Destructive Impact Conditions.

Abstract. Assessing the security of digital radio networks in destructive impact conditions is an important task. However, such an assessment for random multiple access to the ALOHA-type environment in digital radio networks was not carried out. The paper presents an analytical model of random multiple access for the environment of digital radio networks of the ALOHA type in destructive impact conditions. In this model, a complex measure, including the probability of a successful voice connection, the transfer of a service command, a text message or a multimedia file, the degree of filling and the degree of overflow of digital radio network data packets, serves as the resultant indicator for evaluating the effectiveness of random multiple media access. The new complex indicator of the probability of a successful voice connection, the transfer of a service command, a text message or a multimedia file takes into account the known probabilities of successful delivery of data packets, creation of a collision and a free channel, as well as new average transmission times for a sequence of data packets and a collision formed during such transmission. New indicators are the degree of filling and the degree of overflow of digital radio communications network data packets. They determine in saturated and supersaturated data networks of such a network how close (far) to maximum is the probability value of a successful voice connection, transmission of a service command, text message or multimedia file. The model takes into account the potential destructive effects of the attacker by refining the analytical expressions for the known probabilistic and new temporal characteristics. First, a quantitative relationship between the probability of a successful voice connection, the transfer of a service command, a text message or a multimedia file and the average duration of a data channel collisions is established. Secondly, for guaranteed disabling a digital radio network with random multiple access to the medium ALOHA type attacker must constantly carry out a destructive impact. The results are applied in design of digital radio communications networks operating under destructive impacts, as well as in development of automatic systems for optimizing the operation of digital radio communications networks and protecting them from such impacts.

Keywords: Digital Radio Communication Network, Destructive Impact, Analytical Model, Random Multiple Access Procedure to the Environment, ALOHA, Probability of Transmission, Efficiency of Functioning.

Peregudov Maksim Anatol'evich — Ph.D., Head of Research Laboratory, Military Education-Science Center of Military Aviation Forces "Military Aviation Academy Named for Prof. N.E. Zhukovsky and J.A. Gagarin". Research interests: methods and systems of information protection. The number of publications — 14. maxaperegudov@mail.ru; 54A, St. Bol'shevnikov str., 394064, Voronezh, Russian Federation; office phone: +7(473)236-5228; fax: +7(473)244-7860.

Semchenko Ivan Aleksandrovich — Researcher, Military Education-Science Center of Military Aviation Forces "Military Aviation Academy Named for Prof. N.E. Zhukovsky and J.A. Gagarin". Research interests: methods and systems of information protection. The number of

publications — 2. vania.sem4@yandex.ru; 54A, St. Bol'shevnikov str., 394064, Voronezh, Russian Federation; office phone: +7(473)236-5228; 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. pp. 75–81. (In Russ.).
2. Peregudov M.A., Boyko A.A. [Evaluation security of packet radio network from simulation of subscriber terminals at level of random multiple access procedure to environment of S-ALOHA type]. *Informacionnye tehnologii – Information Technologies*. 2015. vol. 7. pp. 527–534. (In Russ.).
3. 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.).
4. 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.).
5. Peregudov M.A., Steshkovoy A.S. Boyko A.A. [Probabilistic Random Multiple Access Procedure Model to the CSMA/CA Type Medium]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2018. vol. 4(59). pp. 92–114. (In Russ.).
6. Makarenko S.I. [Descriptive Model of Iridium Satellite Communication System]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti – Systems of Control, Communication and Security*. 2018. vol. 4. pp. 1–34. (In Russ.).
7. ETSI TS 102 361-1 V2.4.1 (2016-02) Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol. European Telecommunications Standards Institute. 2016.
8. Abramson N. The ALOHA system: another alternative for computer communications. AFIPS Conference Proceedings. 1970. pp. 281–285.
9. Carleial A.B., Hellman M.E. Bistable behavior of ALOHA- type systems. *IEEE Transactions on Communications*. 1975. vol. 23. pp. 401–410.
10. Kobayashi H., Onozato Y., Huynh D. An Approximate Method for Design and Analysis of an ALOHA System. *IEEE Transactions Communications*. 1977. vol. 25. pp. 148–158.
11. Zaharov A.S. *Metod sluchajного dostupa. Chast' 1* [The method of random access. Part 1]. Yaroslavskij gosudarstvennyj universitet. 2012. 36 p. (In Russ.).
12. Tsybakov B.S., Bakirov V.L. [Stability of Asynchronous ALOHA System]. *Problemy Peredachi informacii – Problems of Information Transmission*. 1984. Issue 20. vol. 1. pp. 82–94. (In Russ.).
13. Choudhury G.L., Rappaport S. Diversity ALOHA-A random access scheme for satellite communications. *IEEE Transactions Communications*. 1983. vol. 31. no. 3. pp. 450–457.
14. Ferguson M.J. A Study of Unslotted ALOHA with Arbitrary Message Lengths. Proceedings of the Symposium on Data Communications. 1975. pp. 5.20–5.25.
15. Sant D. Throughput of Unslotted ALOHA Channels with Arbitrary Packet Interarrival Time Distributions. *IEEE Transactions on Communications*. 1980. vol. 28. no. 8. pp. 1422–1425.
16. Roberts L.G. ALOHA packet system with and without slots and capture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 1975. vol. 5. no. 2. pp. 28–42.
17. Dziech A., Pach A.R. Bounds on the throughput of an unslotted aloha channel in the case of a heterogeneous users' population. *Kybernetika*. 1989. vol. 25(6). pp. 476–485.
18. Ferguson M.J. An approximate analysis of delay for fixed and variable length packets in an unslotted ALOHA channel. *IEEE Transactions on Communications*. 1977. vol. 25(7). pp. 644–654.
19. Bellini S., Borgonovo F. On the throughput of an ALOHA channel with variable length packets. *IEEE Transactions on Communications*. 1980. vol. 28(11). pp. 1932–1935.
20. Kissling C. Performance Enhancements for Asynchronous Random Access Protocols over Satellite. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2011. pp. 1–6.

21. Collard F., De Gaudenzi R. On the Optimum Packet Power Distribution for Spread Aloha Packet Detectors with Iterative Successive Interference Cancellation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2014. vol. 13. no. 12. pp. 6783–6794.
22. De Gaudenzi R., del Rio Herrero O., Gallinaro G. Enhanced spread aloha physical layer design and performance. *International Journal of Satellite Communications and Networking*. 2014. vol. 32. no. 6. pp. 457–473.
23. Clazzer F., Marchese M. Layer 3 Throughput Analysis of Advanced ALOHA Protocols. 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). 2014. pp. 533–538.
24. Stefanovic C., Popovski P., Vukobratovic D. Frameless ALOHA Protocol for Wireless Networks. *IEEE Communications Letters*. 2012. vol. 16. no. 12. pp. 2087–2090.
25. Gallinaro G. et al. Enhanced spread spectrum ALOHA system level performance assessment. *International Journal of Satellite Communications and Networking*. 2014. vol. 32. no. 6. pp. 485–503.
26. Tong Z., Haenggi M. A Throughput-Optimum Adaptive ALOHA MAC Scheme for Full-Duplex Wireless Networks. 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2014. pp. 1–6.
27. Zheng L., Cai L. AFDA: Asynchronous flipped diversity ALOHA for emerging wireless networks with long and heterogeneous delay. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2014. vol. 3. no. 1. pp. 64–73.
28. Wang L., Li H., Jiang Y. Adaptive-opportunistic Aloha: A media access control protocol for unmanned aerial vehicle-wireless sensor network systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2016. vol. 12(8). pp. 1–11.
29. Sriwan A., Sittichivapak S. Performance Analysis of ALOHA Framework under Limited Access of Data Transmission for Active RFID System. *Procedia Computer Science*. 2016. vol. 86. pp. 19–22.
30. ETSI TS 102 361-2 V2.3.1 (2016-02) Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 2: DMR voice and generic services and facilities. European Telecommunications Standards Institute. 2016.
31. Paolini E., Liva G., i Amat A.G. A structured irregular repetition slotted ALOHA scheme with low error floors. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2017. pp. 1–6.
32. Ivanov M., Brännström F., i Amat A.G., Popovski P. Broadcast Coded Slotted ALOHA: A Finite Frame Length Analysis. *IEEE Transactions on Communications*. 2017. vol. 65(2). pp. 651–662.
33. Reis J. et al. Performance of a cognitive p-persistent slotted Aloha protocol. 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW). 2015. pp. 405–410.
34. Laufer R., Kleinrock L. On the Capacity of Wireless CSMA/CA Multihop Networks. 2013 Proceedings IEEEINFCOM. 2013. pp. 1312–1320.
35. Doost-Mohammady R., Naderi M.Y., Chowdhury K.R. Performance Analysis of CSMA/CA based Medium Access in Full Duplex Wireless Communications. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2015. vol. 15. no. 6. pp. 1457–1470.
36. Ganhão F. et al. Uplink Performance Evaluation of Packet Combining ARQ for MPR Prefix-Assisted DS-CDMA. *IEEE Transactions on Communications*. 2016. vol. 63(7). pp. 2685–2697.
37. Yang Y., Chen B., Srinivasan K., Shroff N. Characterizing the achievable throughput in wireless networks with two active RF chains. IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. 2014. pp. 262–270.
38. ETSI. (RES06.1). Scenarios for Comparison of Technical Proposals for DTRS. Working document (91)23. European Telecommunications Standards Institute. 1991.