

УДК 621.391

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-85-94

## Модель передачи данных с восстановлением потерянных фрагментов на основе ARQ прикладного уровня\*

А. В. Абилов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Чунаев, АО «Эр-Стайл Софтлаб», Москва, Россия

А. И. Нистюк, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. А. Кайсина, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Для сетей беспроводной связи в сложных условиях приема характерен высокий уровень группирования потерь, при котором может теряться подряд большое количество фрагментов данных. В этом случае для восстановления потерянных данных применение методов прямой коррекции потерь FEC в большинстве случаев не дает достаточного эффекта.*

*Применение стандартных методов восстановления потерь данных на основе автоматического запроса повторной передачи ARQ на канальном и транспортном уровнях модели OSI может привести к появлению существенных задержек, что является неприемлемым для сервисов потоковой передачи в реальном режиме времени. В этом случае предпочтительнее пропустить фрагмент данных, чем вносить задержку на ожидание доставки фрагмента при повторных передачах. Применение методов, основанных на ARQ прикладного уровня модели OSI для потоковой передачи данных, позволяет более эффективно восстанавливать потерянные фрагменты данных в сетях беспроводной связи с высоким уровнем группирования потерь. Известные модели дискретного канала передачи информации для беспроводных сетей позволяют аналитически оценить вероятность потерь данных, однако не учитывают случаи с повторной передачей потерянных данных.*

*В исследовании предложена математическая модель передачи данных в канале беспроводной связи на основе модели Гильберта, которая учитывает восстановление потерь методом ARQ и позволяет рассчитывать коэффициент потерь фрагментов данных. Для проверки адекватности предложенной модели разработано программное обеспечение, обеспечивающее передачу потоковых данных в сети беспроводной связи с восстановлением потерь фрагментов на прикладном уровне, и проведено соответствующее экспериментальное исследование. Показано, что математическая модель учитывает группирование потерь передаваемых данных и их восстановление методом ARQ.*

**Ключевые слова:** прикладной уровень, фрагмент данных, ARQ, моделирование, коэффициент потерь данных.

### Введение

Передача потоковых данных по беспроводным локальным сетям в настоящее время занимает все большее место в области телекоммуникаций и используется в мультимедийных услугах, таких как прослушивание музыки, просмотр видеотрансляций, передача речевой информации, организация мультимедийных конференций, управление в реальном времени, сетевые игры и других приложениях, работающих в реальном времени. Однако качество передачи в беспроводных сетях подвержено влиянию таких факторов, как ослабление сигнала, межканальная интерференция, многолучевое распространение и др. В результате фрагменты передаваемых данных могут теряться, задерживаться, менять порядок следования. Таким образом, например, при использовании видеосерверов в этих сетях на воспроизводимом видео на стороне клиента могут

появляться искажения, либо воспроизведение видеоконтента становится невозможным [1].

Для повышения качества передачи данных в сетях связи наиболее широко используются методы восстановления потерь данных на основе автоматического запроса повторной передачи ARQ (Automatic Repeatre Quest) и на основе прямого исправления ошибок FEC (Forward Error Correction) на различных уровнях модели взаимодействия открытых систем. Использование стандартного метода ARQ в протоколе TCP, расположенном на транспортном уровне модели OSI, в сложных условиях приема может приводить к появлению существенных задержек, что является неприемлемым для сервисов потоковой передачи в реальном режиме времени. В этом случае предпочтительнее пропустить фрагмент данных, чем вносить задержку на ожидание доставки фрагмента при повторных передачах. При обнаружении битовых ошибок

в кадре канального уровня теряется соответствующий фрагмент данных прикладного уровня, так как кадр игнорируется. Поскольку все фрагменты данных прикладного уровня нумеруются, то это позволяет обнаружить факт их потери для последующего запроса повторной передачи.

Для беспроводных каналов связи в сложных условиях приема характерен высокий уровень группирования потерь данных, то есть может теряться подряд большое количество фрагментов данных. Поэтому применение методов FEC, которые включают в себя коды Рида – Соломона, турбокоды, сверточные коды и другие, в сетях беспроводной связи в большинстве случаев не дает достаточного эффекта, так как коды FEC ограничены в способности восстанавливать потерянные данные количеством избыточных данных в передаваемых блоках.

Различные варианты адаптивного FEC дают улучшения восстанавливающей способности в условиях беспроводной связи, что подтверждено в работах [2–7]. Однако применение методов, основанных на ARQ прикладного уровня модели OSI для потоковой передачи данных, позволяют более эффективно восстанавливать потерянные фрагменты данных в условиях беспроводной связи с высоким уровнем группирования потерь. Их эффективность была исследована в работах [8–12]. Такие методы целесообразно использовать совместно с протоколами UDP и RTP транспортного уровня для потоковой передачи данных в сетях беспроводной связи при условии ограничения времени ожидания повторно переданных фрагментов данных. Это необходимо, чтобы учесть нумерацию передаваемых фрагментов данных и обеспечить потоковую передачу в реальном режиме времени. Кроме того, метод ARQ может применяться на канальном уровне, например, в протоколе HDLC, либо на транспортном уровне (протокол TCP). Однако эти протоколы не обеспечивают достаточной гибкости по отношению к видеоконтенту, так как их сложно модернизировать в силу того, что они стандартизированы. Предлагаемая модель передачи данных учитывает восстановление потерянных фрагментов на прикладном уровне модели OSI на основе методов ARQ, используемых на нижележащих уровнях.

Эффективность передачи потоковых данных в условиях интенсивных потерь фрагментов данных при передаче по беспроводным каналам связи можно оценить аналитически, а также методами имитационного моделирования и экспериментальных исследований. Известные модели

дискретного канала передачи информации для беспроводных сетей [13–19] позволяют аналитически оценить вероятность потерь данных, однако не учитывают те случаи, при которых используются методы восстановления потерянных данных на основе ARQ. Следовательно, актуальным является разработка математической модели передачи данных в канале беспроводной связи с восстановлением потерь фрагментов на основе ARQ.

**Целью исследования** является подтверждение известной гипотезы об эффективности передачи потоковых данных с восстановлением потерянных фрагментов на основе ARQ прикладного уровня в условиях интенсивных потерь в сети беспроводной связи методом математического моделирования с подтверждением результатов экспериментальным исследованием. Для достижения этой цели решается задача разработки математической модели передачи данных в сети беспроводной связи с восстановлением потерь фрагментов на основе ARQ прикладного уровня.

#### Моделирование

На физическом, канальном, сетевом и транспортном уровнях алгоритмы различных протоколов связи используют за единицу передачи информации биты, кадры, пакеты и сегменты соответственно. Особенностью работы протоколов связи на прикладном уровне модели OSI является то, что их разработка и реализация не требуют аппаратного и программного обновления протоколов нижестоящих уровней, которые, как правило, стандартизированы. В качестве единицы передачи информации на прикладном уровне используются фрагменты данных, которые при передаче инкапсулируются в сегменты транспортного уровня. Поэтому на прикладном уровне за единицу потерянной информации также принимается фрагмент данных. Передача потоковых данных на прикладном уровне модели OSI в беспроводной локальной сети может быть смоделирована с помощью модели Гильберта (рис. 1).

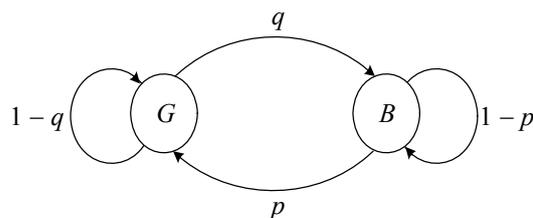


Рис. 1. Модель Гильберта

Fig. 1. Gilbert model

С помощью этой модели задается вероятность потерь фрагментов  $p_{data}$  и средний размер пачки потерянных фрагментов  $\bar{L}_{burst}$ . Эти значения однозначно определяют вероятности переходов  $p$  и  $q$  между состояниями без потерь  $G$  или с потерями  $B$  в соответствии со следующими формулами [20]:

$$p = \frac{1}{\bar{L}_{burst}}; \tag{1}$$

$$q = \frac{P_{data}}{\bar{L}_{burst}(1 - p_{data})}. \tag{2}$$

Поскольку обработка одной группы потерянных фрагментов по линии связи может происходить во время обработки другой группы потерянных фрагментов, то для проведения расчетов можно ее рассматривать независимо (рис. 2).

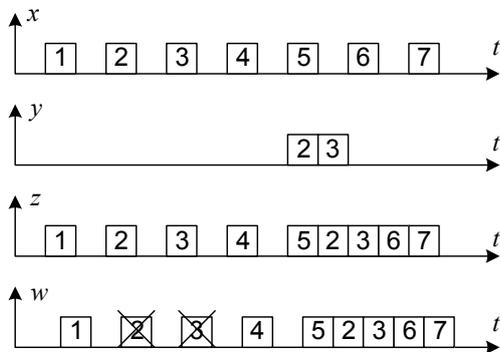
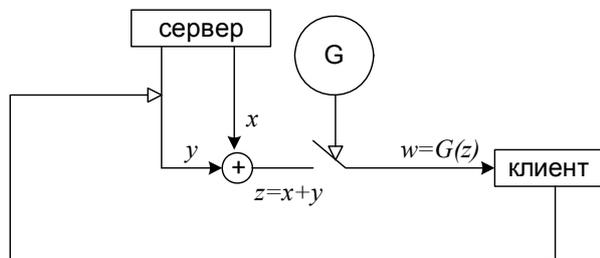


Рис. 2. Модель функционирования ARQ прикладного уровня

Fig. 2. Application Layer ARQ functioning model

За основу процедуры восстановления потерянных фрагментов данных принята схема вы-

борочного повтора (Selective Repeat), при которой отрицательная квитанция с запросом повторной передачи потерянного фрагмента данных высылается после того, как обнаружена потеря фрагментов. Остановки передачи при этом не происходит. Кодирование для обнаружения нарушения целостности фрагментов на прикладном уровне не требуется, так как это происходит на нижележащих уровнях, при этом если обнаружены ошибки, то фрагмент данных полностью выбрасывается. Таким образом, отправной точкой выберем расчет характеристик для случая потери некоторой пачки потерянных фрагментов данных.

Пусть в некоторый момент времени  $t_0$  обнаружена потеря фрагментов данных пачкой длины  $N_0$ . Распределение для этой величины можно найти исходя из следующего. Если потери на маршруте следования фрагментов данных описываются моделью Гильберта, то вероятность того, что длина пачки составит 1 фрагмент, –  $p$  (вероятность перехода обратно в хорошее состояние), 2 фрагмента –  $(1 - p)p$ , 3 фрагмента –  $(1 - p)^2 p$  и т. д. (рис. 3).

Вероятность  $P(N_0 = i)$  появления пачки потерянных фрагментов данных длиной  $i$  определяется в соответствии с геометрическим распределением:

$$P(N_0 = i) = p(1 - p)^{i-1}. \tag{3}$$

Таким образом, математическое ожидание

$$\sum_{i=1}^{\infty} p(1 - p)^{i-1} i = \frac{1}{p} = \bar{L}_{burst}. \tag{4}$$

Моменту обнаружения пачки потерянных фрагментов  $t_0$  предшествовала сама потеря. Пусть  $t_n$  – момент перехода в плохое состояние, а  $\Delta t = t_0 - t_n$  – время обнаружения потери фрагментов, которое в соответствии с рисунком 3 может быть найдено как

$$\Delta t = T_{TT} + N_0 T_{сл}, \tag{5}$$

где  $T_{TT}$  – время пути фрагмента данных от отправителя к получателю;  $T_{сл}$  – период следования фрагментов.

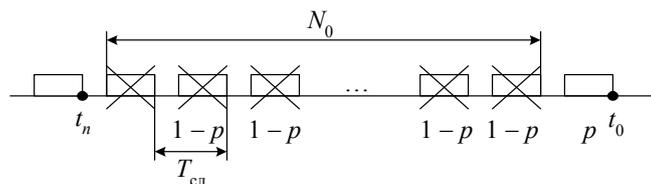


Рис. 3. Вероятность последовательных потерь фрагментов

Fig. 3. Loss burst probability

Далее в тот же самый момент  $t_0$  идет отправка отрицательной квитанции. Найдем вероятность потери квитанции  $p_{nack}$  исходя из того, что если длина фрагмента равна  $L$  бит, то вероятность потерь фрагментов данных  $p_{data}$  связана с вероятностью битовой ошибки  $p_{bit}$  следующим соотношением:

$$p_{data} = 1 - (1 - p_{bit})^L. \quad (6)$$

Выразим  $p_{bit}$  через  $p_{data}$ :

$$1 - p_{data} = (1 - p_{bit})^L, \quad (7)$$

$$p_{bit} = 1 - \sqrt[L]{1 - p_{data}}. \quad (8)$$

Таким образом,

$$p_{NACK} = 1 - \sqrt[L_D]{(1 - p_{data})^{L_N}}, \quad (9)$$

где  $L_D$  – общая длина фрагмента данных;  $L_N$  – общая длина фрагмента отрицательной квитанции.

В ответ на отрицательную квитанцию приходит  $(1 - p_{NACK})(1 - p_{data})N_0$  фрагментов, при этом

$$\begin{aligned} & (1 - (1 - p_{NACK})(1 - p_{data}))N_0 = \\ & = (p_{data} + p_{NACK} - p_{NACK}p_{data})N_0 \end{aligned}$$

из требуемых фрагментов будет потеряно вновь. Поэтому в момент времени  $t_1$  будет выслана еще одна отрицательная квитанция. Максимальное время (тайм-аут) ожидания потерянных фрагментов составляет  $t_1 - t_0 = T_{RTO}$ , и т. д. (рис. 4).

Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будут получены все требуемые фрагменты или не будет превышено общее время ожидания  $T_w$ . Максимальное количество повторных запросов  $K_R$  для передачи потерянных фрагментов данных определяется в соответствии со следующей формулой:

$$K_R = \left\lceil \frac{T_w - T_{TT} - N_0 T_{сн}}{T_{RTO}} \right\rceil. \quad (10)$$

Таким образом, пакеты фрагментов размером  $N_0$  станут группами фрагментов размером

$$\begin{aligned} N_C &= (p_{data} + p_{NACK} - p_{data}p_{NACK})^{K_R} N_0 = \\ &= N_0 (p_{data} + p_{NACK} - p_{data}p_{NACK})^{\left\lceil \frac{T_w - T_{TT} - N_0 T_{сн}}{T_{RTO}} \right\rceil}. \end{aligned}$$

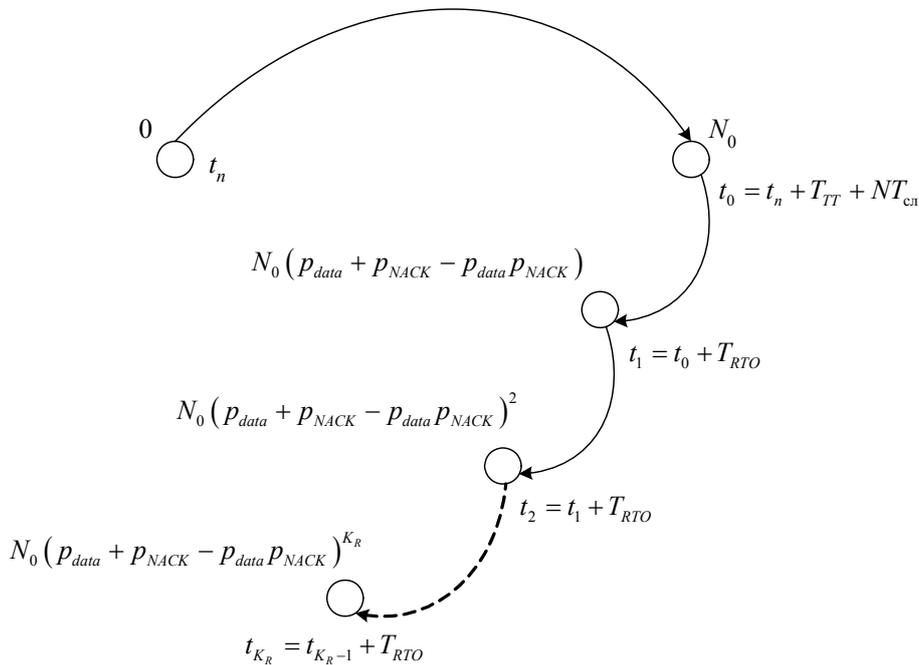


Рис. 4. Обработка запросов потерянных фрагментов

Fig. 4. Lost fragments request processing

С учетом того, что  $N_0$  распределено от 1 до  $\infty$  в соответствии с выражением (3), найдем математическое ожидание группы потерянных фрагментов данных:

$$M[N_C] = \sum_{i=1}^{k-1} p(1-p)^{i-1} (p_{data} + p_{NACK} - p_{data}p_{NACK})^{\left\lceil \frac{T_w - T_{TT} - N_0 T_{сн}}{T_{RTO}} \right\rceil} i + \sum_{i=k}^{\infty} p(1-p)^{i-1} i, \quad (11)$$

где  $k$  – это значение  $i$ , начиная от которого восстановление потерянных фрагментов невозможно. Появление второго слагаемого обусловлено тем, что при пачках, которые длятся более чем  $T_w$ , восстановление невозможно, и коэффициент потерь в этом случае равен единице. Тогда

$$T_w - T_{TT} - kT_{сл} = 0, \quad (12)$$

следовательно,

$$k = \left\lceil \frac{T_w - T_{TT}}{T_{сл}} \right\rceil. \quad (13)$$

Полученные суммы второго слагаемого в выражении (11) есть суммы бесконечно убывающих геометрических прогрессий, первые члены которых равны  $p(1-p)^{k-1}$ ,  $p(1-p)^k$ ,  $p(1-p)^{k+1}$ , ..., а их шаги одинаковы и равны  $1-p$ . Тогда после преобразований выражение (11) примет следующий вид:

$$M[N_C] = \sum_{i=1}^{k-1} p(1-p)^{i-1} (p_{data} + p_{NACK} - p_{data}p_{NACK}) \left\lceil \frac{T_w - T_{TT} - N_0 T_{сл}}{T_{RTO}} \right\rceil i + \left( k - 1 + \frac{1}{p} \right) (1-p)^{k-1}. \quad (14)$$

Для упрощенной модели имеет место выражение

$$p_{data} = \frac{M[N_0]}{M[N_G] + M[N_0]} = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{1}{q} + \frac{1}{p}} = \frac{q}{p+q}, \quad (15)$$

где  $N_G$  – число последовательно успешно приходящих фрагментов. Так как пачки  $N_0$  уменьшаются до групп фрагментов  $N_C$ , то коэффициент потерь фрагментов данных, получаемый при использовании ARQ прикладного уровня, используя формулы (14) и (15), можно найти как

$$\begin{aligned} PLR_{ARQ} &= \frac{M[N_C]}{M[N_G] + M[N_0]} = \\ &= \frac{pq}{p+q} \left( p \sum_{i=1}^{k-1} p(1-p)^{i-1} \times \right. \\ &\times (p_{data} + p_{NACK} - p_{data}p_{NACK}) \left\lceil \frac{T_w - T_{TT} - N_0 T_{сл}}{T_{RTO}} \right\rceil i + \\ &\left. + \left( k - 1 + \frac{1}{p} \right) (1-p)^{k-1} \right). \quad (16) \end{aligned}$$

Полученное выражение (16) позволяет аналитически оценить эффективность передачи данных с применением методов восстановления потерянных фрагментов данных на основе ARQ

прикладного уровня в беспроводных сетях, характеризующихся высоким уровнем группирования потерь.

### Экспериментальное исследование

Для экспериментального исследования эффективности передачи потоковых данных с восстановлением потерянных фрагментов на основе ARQ прикладного уровня был использован фрагмент локальной беспроводной сети, включающей сервер видеопотока, точку беспроводного доступа и клиентский мобильный компьютер (ноутбук). Ноутбук подключался к серверу через беспроводной маршрутизатор типа Linksys WRT54GL, как показано на рисунке 5.

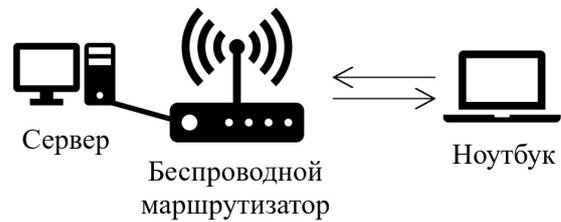


Рис. 5. Топология беспроводной локальной сети

Fig. 5. Wireless LAN topology

С помощью программного видеосервера VLC осуществлялась трансляция видео на ноутбук, в котором посредством разработанной программы анализатора качества передачи потоковых данных производилось измерение показателя коэффициента потерь фрагментов данных (PLR) и их пачечности. Эта программа осуществляет измерение PLR путем подсчета количества потерянных фрагментов данных в пределах заранее определенной выборки (1000 фрагментов).

В ходе эксперимента применялась тестовая последовательность видеокладов highway, передаваемая в беспроводной локальной сети по стандарту WiFi 802/11g на частоте 2,4 ГГц. Для реализации функций оценки коэффициента потерь фрагментов данных был использован разработанный программный анализатор потерь, описание которого представлено в [21]. Он позволяет получить дополнительную информацию о фрагменте данных, например, его общую длину, и в режиме реального времени визуально наблюдать за процессом передачи с отображением потерянных и успешно принятых фрагментов, а также подсчитывать на определенной выборке коэффициент потерь во времени и распределение вероятности группирования потерь фрагментов данных. Программный анализатор записывает информацию обо всех при-

нятых и пропущенных фрагментах данных прикладного уровня модели OSI.

### Результаты и обсуждение

Передача данных по беспроводной локальной сети была смоделирована на основе модели Гильберта (см. рис. 1) с учетом восстановления потерянных фрагментов на основе ARQ прикладного уровня. Процесс передачи также был реализован в ходе экспериментального исследования. На рисунке 6 представлены ре-

зультаты расчетов вероятности потерь фрагментов для передачи потоковых данных с восстановлением потерянных данных  $PLR_{ARQ}$  (кривая «мод») по предложенной математической модели, а также результаты эксперимента в виде зависимости измеренного коэффициента потерь фрагментов  $PLR_{ARQ}$  после восстановления на основе ARQ прикладного уровня от заданной вероятности потерь фрагмента  $p$  (кривая «эксп»).

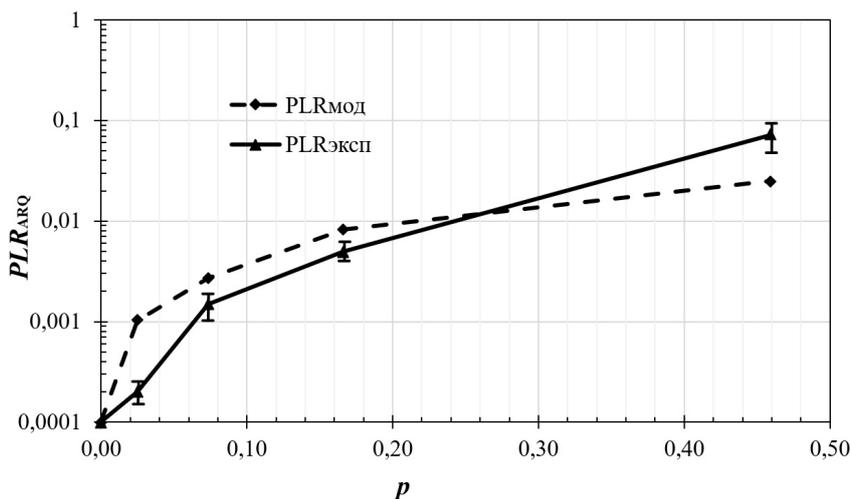


Рис. 6. Экспериментальная и теоретическая зависимости  $PLR_{ARQ}$  от  $p$

Fig. 6. Experimental and theoretical dependencies of  $p$  and  $PLR_{ARQ}$

В ходе эксперимента производились измерения  $p$  и  $PLR_{ARQ}$  в пяти точках, расположенных на разном расстоянии ноутбука от беспроводного маршрутизатора. С увеличением расстояния повышались значения измеряемых параметров. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента проведено по точкам экспериментальных значений.

С целью сравнительного анализа эффективности передачи данных с восстановлением потерянных фрагментов на основе ARQ введем понятие коэффициента выигрыша по потерям фрагментов ( $G_{PLR}$ ). Он определяет, во сколько раз коэффициент потерь фрагментов  $PLR$  после восстановления потерь меньше, чем заданная вероятность потерь фрагментов  $p$ :

$$G_{PLR} = \frac{p}{PLR}. \quad (17)$$

Например, при измеренном значении  $PLR = 0,001$  по результату эксперимента коэффициент выигрыша составил 60 для  $G_{PLR}$ . Это означает, что в данном случае при потере данных на уровне  $p = 0,06$  видео невозможно было бы воспроизвести; однако в результате восстановления

потерянных данных на основе ARQ фактические потери составили  $PLR = 0,001$ , что, согласно рекомендациям МСЭ, обеспечивает приемлемое качество воспроизведения видеопотока. График зависимости коэффициента выигрыша по потерям фрагментов данных от  $p$  при использовании метода восстановления фрагментов на основе ARQ представлен на рисунке 7.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента показывает, что математическая модель наиболее соответствует практически полученным данным в диапазоне значений  $p$  примерно 0,1–0,4. Максимальную восстанавливающую способность результаты эксперимента показали при значении  $p \approx 0,02$ . Это обусловлено тем, что при относительно небольшом уровне потерь, сопровождаемом низким уровнем их группирования, метод ARQ успевает восстанавливать большинство потерянных фрагментов данных. С ростом  $p$  восстанавливающая способность падает вследствие того, что с увеличением количества запросов повторной передачи становится недостаточно заданного периода для восстановления, ограниченного вследствие необходимости передачи в режиме реального вре-

мени. Расхождения результатов моделирования и эксперимента могут быть обусловлены несколькими факторами: несоответствие задаваемых

временных значений  $T$  в модели реальным физическим значениям, случайные факторы проведения эксперимента и др.

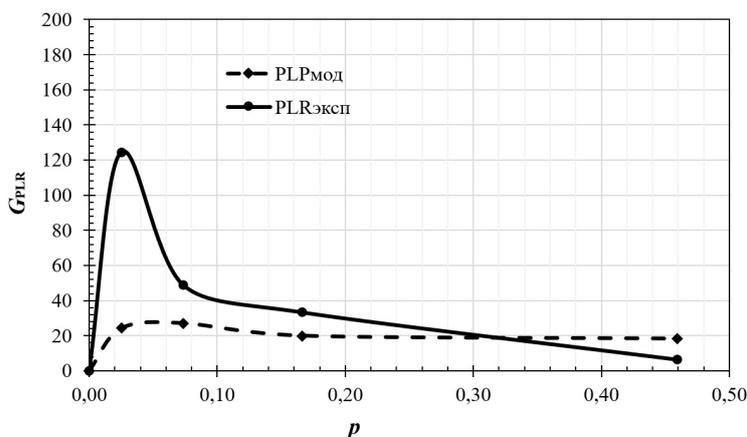


Рис. 7. Экспериментальная и теоретическая зависимости  $G_{PLR}$  от  $p$

Fig. 7. Experimental and theoretical dependencies of  $G_{PLR}$  and  $p$

### Выводы

В исследовании обоснована задача математического моделирования передачи потоковых данных в сети беспроводной связи с восстановлением потерь фрагментов на основе ARQ прикладного уровня. На основе модели Гильберта разработана математическая модель передачи данных, учитывающая восстановление потерь фрагментов и позволяющая оценить восстанавливающую способность метода ARQ в условиях высокой интенсивности потерь фрагментов данных с их группированием в сетях беспроводной связи. На основе разработанного программного обеспечения, обеспечивающего передачу потоковых данных в сети беспроводной связи с восстановлением потерь фрагментов на прикладном уровне, проведены экспериментальные исследования по измерению коэффициента потерь фрагментов данных. Получены зависимости коэффициента потерь фрагментов данных после их восстановления от потерь данных до восстановления (экспериментально) и от заданной вероятности потерь фрагментов данных (аналитически). Результаты показали, что математическая модель наиболее соответствует практически полученным данным в диапазоне значений  $p$  примерно 0,1–0,4. Математическая модель учитывает пачечный характер потерь передаваемых данных и их восстановление методом ARQ.

### Библиографические ссылки

1. Gross J., Klaue J., Karl H., Wolisz A. Cross-layer optimization of OFDM transmission systems for MPEG-4

video streaming. *Computer Communications*, 2004, vol. 27, no. 11, pp. 1044-1055. DOI: 10.1016/j.comcom.2004.01.010.

2. Jin Y., Chang J., Le D. Performance Analysis of an Adaptive Hybrid FEC/ARQ Based on Hops for Wireless Multimedia Sensor Networks. *Proc. of the IEEE International Conference on Communications and Intelligence Information Security*, 2010, pp. 240-243. DOI: 10.1109/ICCIIS.2010.16.

3. Wu j., Cheng B., Wang M. Adaptive Source-FEC Coding for Energy-Efficient Surveillance Video Over Wireless Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, vol. 66, no. 5, pp. 2153-2168. DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2785252.

4. Liu K., Zhang X., Dou Y. Adaptive FEC Allocation Algorithm for Wireless Video Transmission. *Proceedings of the IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, 2010, pp. 130-133. DOI: 10.1109/CRC.2010.12.

5. Liankuan Z., Deqin X., Yi T., Yang Z. Adaptive error control in Wireless Sensor Networks. *Proc. of the IET International Conference on Wireless Sensor Network (IET-WSN-2010)*, 2010. DOI: 10.1049/cp.2010.1080.

6. Baguda Y.S., Faisal N., Syed S.H., Latiff L.A., Yusif S.K., Rashid R. Sani D. Adaptive FEC error control scheme for wireless video transmission. *Proc. of the 12<sup>th</sup> International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2010, pp. 565-569. DOI: 10.1049/cp.2010.1080.

7. Harun N.Z., Ghazali O. Enhancement on adaptive FEC mechanism for video transmission over burst error wireless network. *Proc. of the 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Information Technology in Asia, Kuching, Sarawak*, 2011, pp. 1-6. DOI: 10.1109/CITA.2011.5999532.

8. Neckebroek J., Bruneel H., Moeneclaey M. Application Layer ARQ for protecting video packets over an

indoor MIMO-OFDM link with correlated block fading. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 467-475. DOI: 10.1109/JSAC.2010.100417.

9. Abilov A., Chunaev A., Vasiliev D. Priority retransmission in AL-ARQ for MPEG streaming over WLAN. *Proc. of the IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146967.

10. Vasiliev D., Chunaev A., Abilov A., Kaysina I., Meitis D. Application Layer ARQ and Network Coding for QoS Improving un UAV-assisted networks. *Proc. of the 25<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2019, no. 25, pp. 353-360. DOI: 10.23919/FRUCT48121.2019.8981502.

11. Vasiliev D., Abilov A. Relaying Algorithms with ARQ in Flying Ad Hoc Networks. *Proc. of the IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147016.

12. Чунаев А. В., Абилов А. В., Павлова М. М. Алгоритм AL-ARQ для потоковой доставки видеоданных в беспроводной локальной сети // *Инфокоммуникационные технологии*. 2015. Т. 13, № 1. С. 68–73.

13. Tao T., Lu J., Jianhua L. Hierarchical Markov model for burst error analysis in wireless communications. *Proc. of the IEEE VTS 53<sup>rd</sup> Vehicular Technology Conference*, Rhodes, Greece, 2001, vol. 4, pp. 2843-2847. DOI: 10.1109/VETECS.2001.944120.

14. Jiang X., Shi Z. Huang L.F. A new scheme of establishing packet loss patterns for wireless video transmission based on Gilbert model. *Proceedings of the IET Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks (CCWMSN07)*, Shanghai, 2007, pp. 205-208. DOI: 10.1049/cp:20070119.

15. Salih O.S., Wang C., Laurenson D.I., He Y. Hidden Markov model for packet-level error in bursty digital wireless channels. *Proc. of the Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2009, pp. 385-388. DOI: 10.1109/LAPC.2009.5352446.

16. Feng J., Liu Z., Ji Y. Wireless Channel Loss Analysis - A Case Study Using WiFi-Direct. *Proc. of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Nicosia, 2014, pp. 244-249. DOI: 10.1109/IWCMC.2014.6906364.

17. Nielsen J.J., Leyva-Mayorga I. Popovski P. Reliability and Error Burst Length Analysis of Wireless Multi-Connectivity. *Proc. of the 16<sup>th</sup> International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, 2019, pp. 107-111. DOI: 10.1109/ISWCS.2019.8877248.

18. Мальцев Г. Н., Джумков В. В. Обобщенная модель дискретного канала передачи информации с группированием ошибок // *Информационно-управляющие системы*. 2013. № 1. С. 27–33.

19. Шестаков В. В., Манонина И. В. Моделирование потока ошибок для цифровых радиотрактов // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2019. Т. 10, № 5. С. 21–28.

20. Марков М. В. Модели дискретных каналов связи // *Сервис в России и за рубежом*. 2011. № 1. С. 143–156.

21. Чунаев А. В., Емельянов В. Н., Абилов А. В. Программный анализатор качества передачи потоковых данных // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке* : сб. тр. науч.-техн. конф. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. С. 64–70.

## References

1. Gross J., Klaue J., Karl H., Wolisz A. Cross-layer optimization of OFDM transmission systems for MPEG-4 video streaming. *Computer Communications*, 2004, vol. 27, no. 11, pp. 1044-1055. DOI: 10.1016/j.comcom.2004.01.010.

2. Jin Y., Chang J., Le D. Performance Analysis of an Adaptive Hybrid FEC/ARQ Based on Hops for Wireless Multimedia Sensor Networks. *Proc. of the IEEE International Conference on Communications and Intelligence Information Security*, 2010, pp. 240-243. DOI: 10.1109/ICCIS.2010.16.

3. Wu j., Cheng B., Wang M. Adaptive Source-FEC Coding for Energy-Efficient Surveillance Video Over Wireless Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, vol. 66, no. 5, pp. 2153-2168. DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2785252.

4. Liu K., Zhang X., Dou Y. Adaptive FEC Allocation Algorithm for Wireless Video Transmission. *Proceedings of the IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, 2010, pp. 130-133. DOI: 10.1109/CRC.2010.12.

5. Liankuan Z., Deqin X., Yi T., Yang Z. Adaptive error control in Wireless Sensor Networks. *Proc. of the IET International Conference on Wireless Sensor Network (IET-WSN-2010)*, 2010. DOI: 10.1049/cp.2010.1080.

6. Baguda Y.S., Faisal N., Syed S.H., Latiff L.A., Yusif S.K., Rashid R. Sani D. Adaptive FEC error control scheme for wireless video transmission. *Proc. of the 12<sup>th</sup> International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2010, pp. 565-569. DOI: 10.1049/cp.2010.1080.

7. Harun N.Z., Ghazali O. Enhancement on adaptive FEC mechanism for video transmission over burst error wireless network. *Proc. of the 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Information Technology in Asia*, Kuching, Sarawak, 2011, pp. 1-6. DOI: 10.1109/CITA.2011.5999532.

8. Neckebroek J., Bruneel H., Moeneclaey M. Application Layer ARQ for protecting video packets over an indoor MIMO-OFDM link with correlated block fading. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 467-475. DOI: 10.1109/JSAC.2010.100417.

9. Abilov A., Chunaev A., Vasiliev D. Priority retransmission in AL-ARQ for MPEG streaming over WLAN. *Proc. of the IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146967.

10. Vasiliev D., Chunaev A., Abilov A., Kaysina I., Meitis D. Application Layer ARQ and Network Coding for QoS Improving un UAV-assisted networks. *Proc. of the 25<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2019, no. 25, pp. 353-360. DOI: 10.23919/FRUCT48121.2019.8981502.
11. Vasiliev D., Abilov A. Relaying Algorithms with ARQ in Flying Ad Hoc Networks. *Proc. of the IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147016.
12. Chunaev A.V., Abilov A.V., Pavlova M.M. [AL-ARQ Algorithm for Video Streaming in WLAN]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 68-73 (in Russ.).
13. Tao T., Lu J., Jianhua L. Hierarchical Markov model for burst error analysis in wireless communications. *Proc. of the IEEE VTS 53<sup>rd</sup> Vehicular Technology Conference*, Rhodes, Greece, 2001, vol. 4, pp. 2843-2847. DOI: 10.1109/VETECS.2001.944120.
14. Jiang X., Shi Z. Huang L.F. A new scheme of establishing packet loss patterns for wireless video transmission based on Gilbert model. *Proceedings of the IET Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks (CCWMSN07)*, Shanghai, 2007, pp. 205-208. DOI: 10.1049/cp:20070119.
15. Salih O.S., Wang C., Laurenson D.I., He Y. Hidden Markov model for packet-level error in bursty digital wireless channels. *Proc. of the Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2009, pp. 385-388. DOI: 10.1109/LAPC.2009.5352446.
16. Feng J., Liu Z., Ji Y. Wireless Channel Loss Analysis - A Case Study Using WiFi-Direct. *Proc. of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Nicosia, 2014, pp. 244-249. DOI: 10.1109/IWCMC.2014.6906364.
17. Nielsen J.J., Leyva-Mayorga I., Popovski P. Reliability and Error Burst Length Analysis of Wireless Multi-Connectivity. *Proc. of the 16<sup>th</sup> International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, 2019, pp. 107-111. DOI: 10.1109/ISWCS.2019.8877248.
18. Maltsev G.N., Dzhumkov V.V. [Generalized model of a discrete information transmission channel with grouping errors]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2013, no. 1, pp. 27-33 (in Russ.).
19. Shestakov V.V., Manonina I.V. [Modeling the error stream for digital radio-channels]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov*, 2019, vol. 10, no. 5, pp. 21-28 (in Russ.).
20. Markov M.V. [Discrete communication channel models]. *Servis v Rossii i za rubezhom*, 2011, no. 1, pp. 143-156 (in Russ.).
21. Chunaev A.V., Emelyanov V.N., Abilov A.V. *Programmnyi analizator kachestva peredachi potokovykh dannykh* [Software analyzer of streaming data transmission quality]. *Molodye uchenye – uskorennyu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke : sb. tr. nauch.-tekhn. konf.* [Young scientists - accelerating scientific and technological progress in the XXI century: Proc. of the scientific-technical conference]. Izhevsk, ISTU Publ., 2011, pp. 64-70 (in Russ.).

### Data Transmission Model with Lost Fragments Recovery Based on Application Layer ARQ

A.V. Abilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Chunaev, JSC "R-Style Softlab", Moscow, Russia

A.I. Nistyuk, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I.A. Kaisina, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*Wireless networks in difficult conditions of signal receiving are characterized by a high level of burst data losses, at which a large number of data fragments can be lost in a row. In this case, to recover the lost data, the use of forward error correction methods (FEC) in most cases does not give a sufficient effect. The use of standard data loss recovery methods based on automatic retransmission request (ARQ) at the data link and transport layers of the OSI model can lead to significant delays, which is often unacceptable for real-time streaming services. In such a case, it may be preferable to skip the piece of data rather than delay waiting for the piece to be delivered on retransmissions. The use of ARQ-based techniques on application layer of OSI model for data streaming allows for a more efficient recovery of lost data chunks in wireless networks with a high level of burst losses. The known models of a discrete channel for wireless networks allow for analytically assessing the probability of data loss, however, they do not take into account cases with retransmission of lost data. The study proposes a mathematical model of data transmission in a wireless communication channel based on the Gilbert model, which takes into account the loss recovery by the ARQ method and allows you to calculate the data loss ratio. To check the adequacy of the proposed model, a software was developed that ensures the transmission of data streaming in a wireless communication network with recovery of fragment losses at the application level, and a corresponding experimental study was carried out. It is shown that the mathematical model takes into account the burstiness of transmitted data losses and their recovery by the ARQ method.*

**Keywords:** application layer, data fragment, ARQ, modelling, Data loss ratio.

Получено 16.11.2020

**Образец цитирования**

Модель передачи данных с восстановлением потерянных фрагментов на основе ARQ прикладного уровня / А. В. Абилов, А. В. Чунаев, А. И. Нистюк, И. А. Кайсина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 3, № 4. С. 85–94. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-85-94.

**For Citation**

Abilov A.V., Chunaev A.V., Nistyuk A.I., Kaisina I.A. [Data Transmission Model with Lost Fragments Recovery Based on Application Layer ARQ]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 85-94 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-85-94.