

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛИ ПЕРЕДАЧИ В СОТЕ 5G В ВИДЕ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С УЧЕТОМ МЕХАНИЗМА ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОВТОРНОЙ ПЕРЕДАЧИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-6-19-24

Manuscript received 10 May 2022;
Accepted 14 June 2022

Рыкова Татьяна Владимировна,
Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute, Берлин, Германия,
tatiana.rykova@hhi.fraunhofer.de

Ключевые слова: 5G, предсказание повторной передачи, механизм обратной связи, СМО, двухфазная система массового обслуживания, имитационная модель

Исследуется механизм ранней адаптации канала на базе предсказания повторной передачи e-HARQ (early Hybrid Automatic Repeat reQuest) для нисходящего канала мобильной сети, решая задачу улучшения характеристик передачи информации. Модель представляет собой двухфазную систему массового обслуживания (СМО). В СМО на первой фазе моделируется процесс предсказания с возможностью ретрансляции, а на второй фазе рассматривается процесс обработки сообщения терминалом пользователя на базе протокола физического уровня HARQ. Протокол HARQ в сети 5G предоставляет передатчику сообщение подтверждения приема ACK в случае успешного декодирования пакета, и NACK – в случае ошибки. Главным недостатком является ограничение на RTT (Round Trip Time) – временной интервал между процессами первоначальной и повторной передачи. Проведен численный анализ полученных вероятностно-временных характеристик (ВВХ). На первом этапе были найдены вероятности переходов за счет моделирования канального уровня сети 5G. Получение реалистичных значений для вероятностей переходов позволяет использовать данную аналитическую модель для анализа и оптимизации существующих схем предсказания e-HARQ. Далее был разработан имитационный комплекс для проверки корректности аналитической модели.

Информация об авторе:

Рыкова Татьяна Владимировна, научный сотрудник, к.ф.-м.н., Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute, Берлин, Германия

Для цитирования:

Рыкова Т.В. Построение и анализ модели передачи в соте 5G в виде двухфазной системы массового обслуживания с учетом механизма предсказания повторной передачи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №6. С. 19-24.

For citation:

Rykova T.V. (2022) Construction and analysis of a transmission model in 5G cell in the form of two-phase queuing system with account of the retransmission prediction mechanism. *T-Comm*, vol. 16, no.6, pp. 19-24. (in Russian)

Введение

Существует несколько стратегий по уменьшению задержки, например, за счет усовершенствования механизма обратной связи для гибридного автоматического запроса на повторение HARQ [1-3]. Значительные исследовательские усилия были направлены на создание схем предсказания результата декодирования, или предикторов, также называемых схемами раннего предсказания на базе HARQ (e-HARQ), с применением искусственного интеллекта. Большинство подходов предсказания e-HARQ проводят оценку коэффициента битовой ошибки BER (Bit Error Rate) на основе данных, принятых в виде логарифмов отношения правдоподобия LLR (Log-Likelihood Ratios), и далее используют пороговые значения для принятия решения о выборе ACK/NACK сообщения обратной связи [2,4,5].

Модель передачи пакета в сете 5G с обратной связью в виде двухфазной СМО

В исследуемой аналитической модели процесс прогнозирования на базе e-HARQ происходит на первой фазе, а обработка пакета на базе HARQ – на второй [6]. В модели под заявкой понимается пакет. Пакеты имеют одинаковую длину, равную длительности N микрослотов – символов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Максимальное допустимое время до успешного получения на оборудование пользователя UE (User Equipment) с учетом всех ретрансляций, необходимых для успешной доставки пакета, составляет T_N микрослотов, иначе она считается потерянной.

Будем рассматривать функционирование системы в дискретном времени с тактом h постоянной длины, равным длительности одного микрослота, что позволяет добиться правомерного сравнения численных результатов для случаев с различными значениями N, d . Разделим ось времени на такты h и примем, что все изменения в системе происходят лишь в моменты $nh, n = 1, 2, \dots$. Для определенности будем считать, что такт n есть полуинтервал $[nh, (n+1)h]$.

Заявка поступает в систему с вероятностью $a, 0 < a \leq 1$ до ее выхода из СМО поступление новой заявки не происходит. Если предиктор принял положительное решение ACK на первой фазе, что соответствует событию $\{\text{eHARQ=ACK}\}$, то заявка переходит на вторую фазу с вероятностью $b_1(l)$, где l – текущее число попыток передачи данного пакета на UE. В противном случае, если решение предиктора, отправленное на базовую станцию (БС) – NACK, т.е. событие $\{\text{eHARQ=NACK}\}$, заявка будет ретранслирована с дополнительной вероятностью $\bar{b}_1(l)$. Однако, обработка предыдущей заявки, которой предиктор вынес отрицательное заключение, продолжается на второй фазе с детерминированной вероятностью, равной 1. Таким образом, моделируются процедуры параллельной работы механизмов предсказания и обратной связи без предсказания, при этом приоритет отдается решениям протокола HARQ во избежание лишних ретрансляций, сгенерированных в результате ошибок предиктора.

В свою очередь, решение об успешности передачи, принятое механизмом без предсказания, позволяет освободить

систему с вероятностью $b_i(l)$, или продолжить процесс ретрансляции в случае отрицательного решения с дополнительной вероятностью $\bar{b}_i(l), i = 2, 3$.

Вероятности $b_2(l)$ и $b_3(l)$ успешного обслуживания на второй фазе имеют вид:

$$b_2(l) := P(\{\text{HARQ=ACK}\} | \{\text{eHARQ=ACK}\})$$

$$b_3(l) := P(\{\text{HARQ=ACK}\} | \{\text{eHARQ=NACK}\}),$$

где $\{\text{HARQ=ACK}\}$ – соответствует значению ACK механизма обратной связи на второй фазе.

Установливая зависимость между ACK/NACK решениями предиктора на первой фазе и механизма обратной связи на второй фазе за счет введения различных вероятностей перехода $b_2(l)$ и $b_3(l)$, мы получаем системную модель, которую можно использовать для анализа существующих схем предсказания e-HARQ. Следует учесть, что число передач l данного пакета имеет непосредственное влияние на вероятность его обслуживания $b_i(l), i = 2, 3$, и растет с увеличением l . Если же отправка пакета на UE превышает максимальное число микрослотов T_N или максимальное число возможных передач $T_C = \lfloor T_N / N \rfloor$, пакет считается потерянным и покидает систему.

Структура двухфазной СМО с e-HARQ и механизмом обратной связи HARQ на второй фазе, соответственно представлена на рисунке 1.

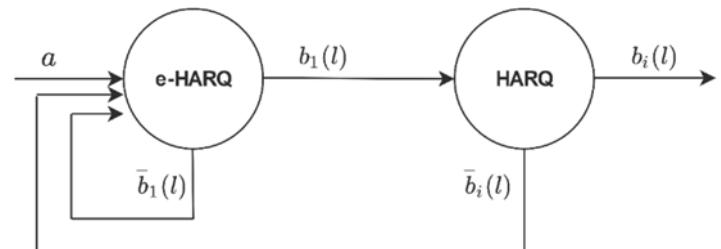


Рис. 1. Структура двухфазной модели, описывающей процесс прогнозирования (e-HARQ) на фазе 1 и процесс обработки пакета на терминале UE на базе HARQ на фазе 2, $i = 2, 3$

Имитационное моделирование сети 5G

Для проведения численного анализа аналитической модели, были найдены вероятности переходов $b_1(l), b_2(l)$ и $b_3(l)$ за счет канального моделирования сети 5G. Основные исходные данные для имитационной модели приведены в таблице 1, в соответствии с которыми пакет размером 500 бит был закодирован посредством кода с малой плотностью проверок на четность LDPC (Low-density parity-check code), широко применяемым в технологии 5G, и назначен на нисходящую OFDM-передачу в канале с пропускной способностью, равной 1.08 MHz, и модуляцией 64-QAM. Данный закодированный сигнал был передан по каналу с замираниями TDL-C, и обработан на приемной станции с помощью процедуры MMSE (Minimum Mean Square Error) в частотной области,

после чего декодирован посредством канального декодера LDPC (Min-Sum). Более того, при моделировании рассматривался предиктор e-HARQ на базе логических регрессий LR (Logistic Regressions) [7], принимающий решение о декодируемости пакета с учетом 5 итераций LDPC декодера.

Таблица 1

Исходные данные для имитационного моделирования сети 5G

Размер транспортного блока (число бит)	500
Пропускная способность	1.08 MHz (6 РБ)
Схема канального кодирования	1/5 LDPC [8]
Алгоритм и порядок модуляции	64 QAM, Approx. LLR
Распределение мощности	Постоянное значение $\frac{E_b}{N_0}$
Форма волны (waveform)	3GPP OFDM с нормальным циклическим префиксом и разнесением поднесущих 15kHz
Тип канала	1Tx1Rx, TDL-C 100 нс, 7 ГГц, 3 км/ч (скорость пользователя)
Эквайлизер	MMSE в частотной области
Отношение сигнал/шум SNR	5.0 dB – 12.0 dB
Тип декодера	Min-Sum (50 итераций)
Тип предиктора (e-HARQ)	Предиктор на базе логических регрессий (LR) [7] с 5 итерациями

Следует отметить, что показатели эффективности предиктора LR напрямую зависят от значения переходной вероятности $b_1(l)$. При малых значениях вероятности перехода на первой фазе $b_1(l)$, предиктор показывает более консервативное поведение с точки зрения принятых ACK решений, в то время как при высоких значениях $b_1(l)$, предиктор имеет тенденцию слишком частого предсказания в пользу ACK. В связи с этим, на первом этапе предиктор был настроен таким образом, чтобы сперва было достигнуто некоторое значение $b_1(l)$, а далее найдены вероятности переходов $b_2(l)$ и $b_3(l)$. Для этого было проведено имитационное моделирование передачи пакета на канальном уровне с учетом вышеизложенных исходных данных на методом Монте-Карло с 1.7 млн итераций. Отношение сигнал-шум (SNR, Signal-to-Noise Ratio) варьировалось между 5 и 12 дБ, и были рассмотрены различные длины LDPC кодов.

Чтобы довести время моделирования и процессов обработки данных до трактабельных, вероятности перехода были аппроксимированы следующим образом:

$$\begin{aligned} b_2(l) &:= P(\{\text{HARQ}_l = \text{ACK}\} | \{\text{eHARQ}_l = \text{ACK}, \text{HARQ}_{l-1} = \text{NACK}\}) \approx \\ &\approx 1 - \frac{P(\{\text{HARQ}_l = \text{NACK}\} | \{\text{eHARQ}_l = \text{ACK}\})}{P(\{\text{HARQ}_{l-1} = \text{NACK}\} | \{\text{eHARQ}_{l-1} = \text{ACK}\})}, \\ b_3(l) &:= P(\{\text{HARQ}_l = \text{ACK}\} | \{\text{eHARQ}_l = \text{NACK}, \text{HARQ}_{l-1} = \text{NACK}\}) \approx \\ &\approx 1 - \frac{P(\{\text{HARQ}_l = \text{NACK}\} | \{\text{eHARQ}_l = \text{NACK}\})}{P(\{\text{HARQ}_{l-1} = \text{NACK}\} | \{\text{eHARQ}_{l-1} = \text{NACK}\})}. \end{aligned}$$

Значения вероятностей перехода $b_1(l)$ для первого порогового значения $\theta = 0$ были получены по формуле:

$$b_1(l) = P(\{\text{HARQ}_l = \text{ACK}\} | \{\text{eHARQ}_{l-1} = \text{NACK}\}),$$

и далее увеличивались на 0.1 для каждой последующей трансляции. Было рассмотрено 10 пороговых значений, последнее из которых ($\theta = 9$) соответствует передаче пакета на базе механизма HARQ с отсутствием e-HARQ прогнозирования на первой фазе, $b_1(l) = 1$.

На рисунке 2 приведен пример вероятностей перехода, полученных в результате имитационного моделирования сети 5G на уровне канала для случая SNR=10 dB и длительности пакета, равной 14 OFDM символам. Данные значения переходных вероятностей будут использованы для проверки корректности модели. Графики на рисунке 2 демонстрируют вероятности переходов только для первой передачи ($l = 1$), однако, показывают поведение для всех длин кодов с соответствующим смещением $d = 0, 2, \dots, 12$, используемых для e-HARQ прогнозирования.

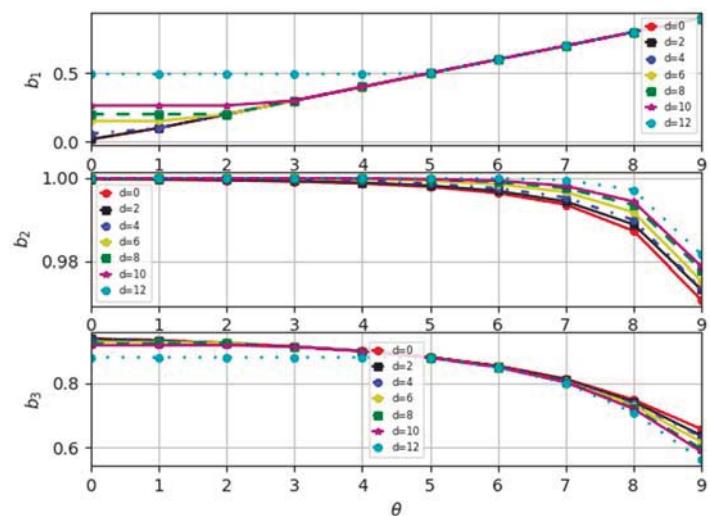


Рис. 2. Вероятности переходов $b_1(l)$, $b_2(l)$, $b_3(l)$, найденные в результате имитационного моделирования сети 5G

С увеличением порогового значения θ , виден монотонный рост вероятности $b_1(l)$ до 1, начиная от нуля для случая небольших длин кодов, и 0.5 для длинного кода ($d = 12$), что объясняется его высокой точностью предсказания и заданным уровнем SNR. Вероятности обслуживания на второй фазе $b_2(l)$ и $b_3(l)$ очевидным образом имеют высокие значения при частых ретрансляциях в случае низких пороговых значений, и уменьшаются с увеличением θ , приближаясь к результатам традиционной HARQ схемы.

Проверка корректности модели

Для проверки корректности аналитической модели был проведен имитационный анализ, в ходе которого был смоделирован процесс перехода пакета по состояниям модели до его успешного обслуживания или потери с учетом заданного времени функционирования. Имитационное моделирование позволило собрать основные статистические данные о количестве обслуженных/потерянных пакетов, времени

пребывания и др., на базе которых были найдены характеристики, соответствующие основным вероятностно-временным характеристикам (BBX) аналитической модели.

В эксперименте рассматривались вероятности переходов $b_1(l)$, $b_2(l)$ и $b_3(l)$, представленные на рис.2, не меняющие значений с увеличением числа ретрансляций. Вероятность поступления в систему пакета длительностью 14 OFDM символов в течение микрослота принята равной 0.2, что соответствует типам услуг с постоянным потоком данных. Программное обеспечение для двух моделей было разработано на языке программирования PYTHON.

Рисунок 3 демонстрирует графики для среднего времени пребывания заявки в системе до успешной передачи, измеряемого в микрослотах, для различных длин кодов с соответствующими смещениями относительно окончания передачи пакета $d = 0, 2, \dots, 12$ для аналитической и имитационной моделей. Следует отметить, что процесс имитации данной модели, функционирующей в микрослотах, очень ресурсо-затратный, и требует гораздо больше вычислительных усилий в сравнении с аналитической моделью, основные BBX которой вычисляются мгновенно даже для высоких длительностей пакетов N . Поэтому, были получены результаты для нескольких пороговых значений θ , что, однако, является достаточным, чтобы сделать вывод о совпадении результатов двух исследуемых подходов.

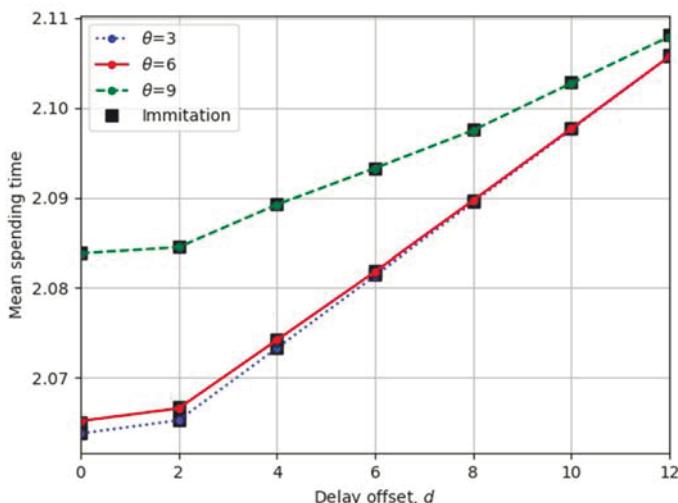


Рис. 3. Графики сравнения среднего времени пребывания для аналитической и имитационной моделей

Анализ основных показателей эффективности модели

Был проведен сравнительный анализ полученных характеристик аналитической модели с различными значениями SNR (5.0-12.0 dB), длинами передачи пакета $N = 4, 5, \dots, 12$ OFDM символам, длинами кодов с соответствующими сдвигами $d = 0, 2, \dots, 12$ относительно окончания первой передачи и пороговыми значениями $\theta = 0, \dots, 9$. Следует отметить, что тенденции поведения основных BBX сохраняются для исследованных условий качества канала, поэтому будут приведены в качестве примера только для случая SNR=10.0 dB. Ограничение времени T_N , выделенного на успешную доставку

пакета, выбрано равным 84 микрослотам, что соответствует различным вариантам максимального числа трансляций данного пакета $T_c = \lfloor T_N/N \rfloor$ для разных длин сообщений.

Рис.4 демонстрирует семейство графиков зависимости вероятности простоя системы и среднего времени пребывания заявки в системе от изменения порогового значения θ , соответственно. На графиках используются следующие обозначения: N, d , где длина сообщения N отмечена цветом, а временной сдвиг d , соответствующий различным длинам LDPC кодов показан маркером. Таким образом, можно одновременно сравнить поведение всех возможных длин LDPC кодов, используемых для прогнозирования обратной связи для различных длин передачи пакета.

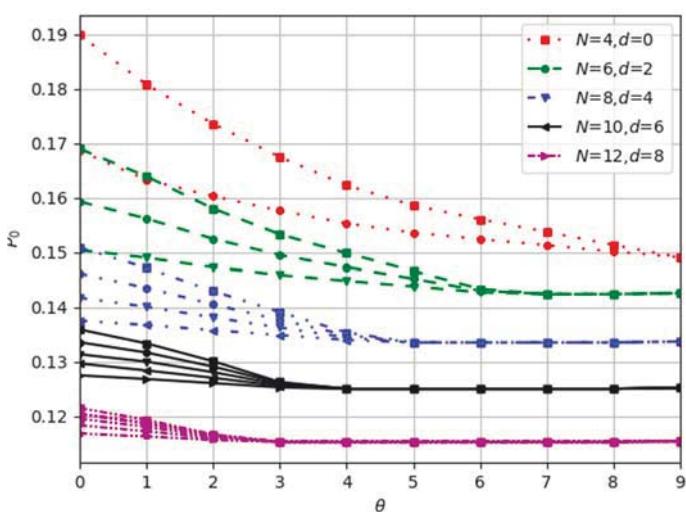


Рис. 4. Графики зависимости вероятности простоя системы с параметрами N, d от порогового значения θ

Вероятность простоя системы является одной из важнейших характеристик, которая косвенным образом демонстрирует эффективность обслуживания пакета в системе. Чем быстрее пакет обслуживается, тем скорее система переходит в нулевое состояние и пребывает там до прихода нового пакета. Таким образом, чем выше эта вероятность, тем эффективнее система справляется с передачей пакета на пользовательскую станцию.

На рисунке 4 видно, что система с наименьшей длиной передачи $N = 4$ и с самой быстрой возможностью ретрансляции $d = 0$ показывает наилучшее поведение вероятности простоя с небольшим ухудшением характеристики при увеличении длины кода d , и соответственно RTT. Этот результат может быть объяснен возможностью для систем с короткими передачами осуществить больше ретрансляций, чем в системах с длинными передачами за время T_N . При увеличении порогового значения θ вероятность простоя системы уменьшается, приближаясь к поведению системы с традиционным HARQ механизмом без прогнозирования.

На рисунке 5 показано семейство графиков зависимости среднего времени пребывания заявки в системе, измеряемого в микрослотах, с параметрами N, d от изменения порогового значения θ . Тенденции поведения данных кривых не противоречат результатам вероятности простоя, и

демонстрируют наименьшее время пребывания в системе до успешной передачи пакета в случае $N = 4$, $d = 0$ коротких передач с частыми ретрансляциями.

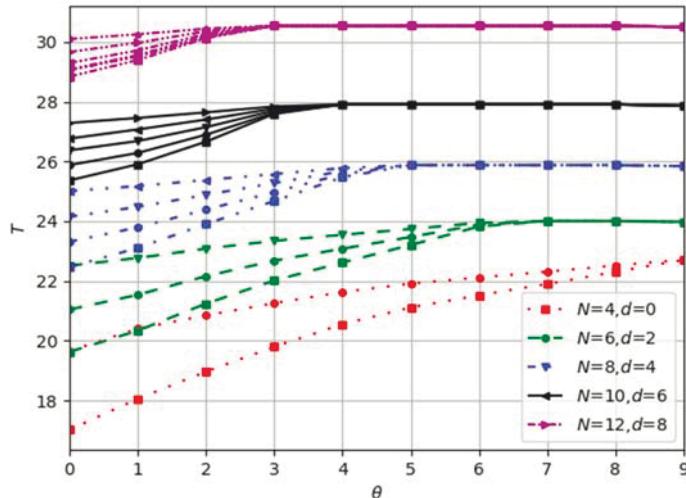


Рис. 5. Графики зависимости среднего времени пребывания заявки в системе с параметрами N, d от изменения θ

Однако, короткие передачи подвержены риску частых ошибок прогнозирования, поэтому наряду с тенденциями поведения основных BBX функционирования системы, важно также проанализировать вероятности FN (false negative) и FP (false positive) ошибок предиктора e-HARQ, представленные на рисунке 6 для случая $d = 0$ и различных длин передач N .

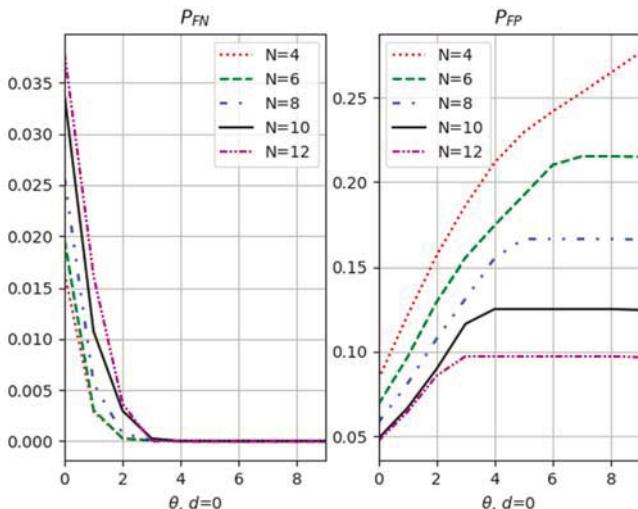


Рис. 6. Графики зависимости вероятностей FN и FP для случая $d = 0$ и различных длин сообщений N от изменения порогового значения θ

Длинная передача N характеризуется более высокой точностью предсказания, а значит гораздо больше подвержена ошибочно-отрицательным решениям предиктора при низких пороговых значениях θ , и менее — ошибочно-положительным решениям предиктора при любых θ .

В свою очередь, чем короче длина сообщения, тем выше вероятность FP — вероятность, которая непосредственным образом указывает на эффективность работы используемого предиктора e-HARQ. Таким образом, данные графики показывают важные тенденции, необходимые при проведении анализа, поиска оптимальных параметров сети и прогнозирования e-HARQ.

Заключение

Исследуется механизм ранней адаптации канала на базе предсказания повторной передачи e-HARQ для нынешнего канала мобильной сети, решающей задачу улучшения характеристик передачи информации. Модель представляет собой двухфазную СМО, в которой на первой фазе моделируется процесс предсказания с возможностью ретрансляции в случае NACK, а на второй фазе рассматривается процесс обработки сообщения терминалом пользователя на базе HARQ. Первая и вторая фаза данной СМО в дискретном времени характеризуются геометрическим поступающим потоком и геометрическим процессом обслуживания.

Проведен численный анализ полученных ВВХ. На первом этапе были найдены вероятности переходов за счет моделирования канального уровня сети 5G. Получение реалистичных значений для вероятностей переходов позволяет использовать данную аналитическую модель для анализа и оптимизации существующих схем предсказания e-HARQ. Далее был разработан имитационный комплекс для проверки корректности аналитической модели.

Литература

1. 3GPP Release 16. Technical Report // URL: <https://www.3gpp.org/release-16>. Дата обращения: 04.03.2022 г.
2. Liu Y., Deng Y., Elkashlan M., Nallanathan A., Karagiannidis G. Analyzing Grant-Free Access for URLLC Service // IEEE J. on SAC, 2021. Vol. 39. No. 3, pp. 741-755.
3. Mahmood N. H., Abreu R., Böhnke R., Schubert M., Berardinelli G., Jacobsen T.H. Uplink Grant-Free Access Solutions for URLLC services in 5G New Radio // Proc. Int. Symp. ISWCS, Oulu, Finland. 2019, pp. 607-612.
4. Berardinelli G., Khosravirad S. R., Pedersen K. I., Frederiksen F., Mogensen P. On the benefits of early HARQ feedback with non-ideal prediction in 5G networks // Proc. Int. Symp. ISWCS, Poznan. 2016, pp. 11-15.
5. Göektepe B., Faehse S., Thiele L., Schierl T., Hellge C. Sub-code-Based Early HARQ for 5G // In Proc. IEEE Int. ICC Workshops, Kansas City, MO. 2018, pno. p. 1-6.
6. Rykova T.V. Towards the analysis of the performance measures of heterogeneous networks by means of two-phase queueing systems // Discrete and Continuous Models and Applied Comput. Science, no. 29 (3), 2021, pp. 242-250.
7. Strodthoff N., Göektepe B., Schierl T., Samek W., Hellge C. Machine Learning for Early HARQ Feedback Prediction in 5G // 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Abu Dhabi, United Arab Emirates. 2018, pp. 1-6.
8. MCC Support. 3GPP TS 38.212 v16.0.0 // Technical Report. 3GPP. 2020, pp.19-30.

CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF A TRANSMISSION MODEL IN 5G CELL IN THE FORM OF TWO-PHASE QUEUING SYSTEM WITH ACCOUNT OF THE RETRANSMISSION PREDICTION MECHANISM

Tatyana V. Rykova, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute, Berlin, Germany, tatiana.rykova@hhi.fraunhofer.de

Abstract

The mechanism of early channel adaptation based on e-HARQ (early Hybrid Automatic Repeat reQuest) prediction for the downlink of a mobile network, which solves the problem of improving information transmission characteristics, is studied. The model is a two-phase queuing system (QS). In the QS, at the first phase, the prediction process with the possibility of relaying is modeled, and at the second phase, the process of message processing by the user terminal based on the HARQ physical layer protocol is considered. The HARQ protocol in the 5G network provides the transmitter with an acknowledgment message ACK in case of successful decoding of the packet, and NACK in case of error. Its main disadvantage is the limitation on RTT (Round Trip Time) - the time interval between the initial and retransmission processes. Numerical analysis of the obtained probabilistic-temporal characteristics (PTCR) is carried out. At the first stage, the transition probabilities were found by modeling the link layer of the 5G network. Obtaining realistic values ??for the transition probabilities allows using this analytical model to analyze and optimize existing e-HARQ prediction schemes. Next, a simulation complex was developed to check the correctness of the analytical model.

Keywords: 5G, retransmission prediction, feedback mechanism, QS, two-phase queuing system, simulation model.

References

1. 3GPP Release 16. Technical Report // URL: <https://www.3gpp.org/release-16>. (Access: 04.03.2022).
2. Y. Liu, Y. Deng, M. Elkashlan, A. Nallanathan, G. Karagiannidis (2021). Analyzing Grant-Free Access for URLLC Service. *IEEE J. on SAC*. Vol. 39. No.3. Pp. 741-755.
3. N.H. Mahmood, R. Abreu, R. Bohnke, M. Schubert, G. Berardinelli, T.H. Jacobsen (2019). Uplink Grant-Free Access Solutions for URLLC services in 5G New Radio. *Proc. Int. Symp. ISWCS*, Oulu, Finland. Pp. 607-612.
4. G. Berardinelli, S.R. Khosravirad, K.I. Pedersen, F. Frederiksen, P. Mogensen (2016). On the benefits of early HARQ feedback with non-ideal prediction in 5G networks. *Proc. Int. Symp. ISWCS*, Poznan. Pp. 11-15.
5. B. Goektepe, S. Faehse, L. Thiele, T. Schierl, C. Hellge (2018). Subcode-Based Early HARQ for 5G. *Proc. IEEE Int. ICC Workshops*, Kansas City, MO. Pp. 1-6.
6. T.V. Rykova (2021). Towards the analysis of the performance measures of heterogeneous networks by means of two-phase queueing systems. *Discrete and Continuous Models and Applied Comput. Science*. No. 29 (3). Pp. 242-250.
7. N. Strodthoff, B. Goktepe, T. Schierl, W. Samek, C. Hellge (2018). Machine Learning for Early HARQ Feedback Prediction in 5G. *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates. Pp. 1-6.
8. MCC Support. 3GPP TS 38.212 v16.0.0. Technical Report. 3GPP. 2020. Pp.19-30.

Information about author:

Tatyana V. Rykova, Researcher, Ph.D., Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institute, Berlin, Germany