

Поуровнево-декомпозиционная модель оценки интегральной эффективности использования тракта связи с учетом помех

Ходнев^f Т. А., ORCID [0000-0001-9168-0504](https://orcid.org/0000-0001-9168-0504)

e-mail t.khodniev@kpi.ua

Антонюк^s А. И., ORCID [0000-0002-9071-2292](https://orcid.org/0000-0002-9071-2292)

e-mail o.antonyuk@kpi.ua

Варфоломеев^s А. Ю., к.т.н., ORCID [0000-0002-6990-7140](https://orcid.org/0000-0002-6990-7140)

e-mail a.varfolomeiev@kpi.ua

Лысенко^s А. Н., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-1051-1149](https://orcid.org/0000-0003-1051-1149)

e-mail o.lysenko@kpi.ua

Кафедра конструирования электронно-вычислительной аппаратуры keoa.kpi.ua

Факультет электроники fel.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Анотация—В работе представлено развитие предложенной ранее модели оценки эффективности использования тракта связи. Улучшенная модель позволяет в явном виде учитывать возникающие в тракте связи в процессе передачи потока данных ошибки, как на основании анализа фактического захваченного трафика тракта, так и с использованием априори известных вероятностных характеристик ошибок передачи; предусматривает возможность поуровневой декомпозиции коэффициента интегральной эффективности использования тракта для анализа вклада отдельных уровней сетевой модели и соответствующих протоколов в результирующую эффективность; является более формализованной и прагматико-обусловленной. Модель может быть использована для оценки эффективности использования тракта различными технологиями потоковой передачи данных, прогнозирования влияния ошибок на эффективность, исследования слабо детерминированных протоколов, а также для сравнения конкурирующих технологий передачи между собой по критерию интегральной эффективности.

Библ. 11.

Ключевые слова — тракт связи; потоковая передача; интегральная эффективность; поуровневая декомпозиция

I. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное поступательное развитие технологий связи привело к появлению ряда комплексных широко используемых наборов так называемых «слабо детерминированных протоколов». Под слабой детерминированностью понимают допустимость множества различающихся по своим характеристикам реализаций протокола согласно его спецификации, как неотъемлемое имманентное свойство самой спецификации, заложенное в нее авторами на этапе разработки. Примерами таких протоколов являются: RTSP [1], RTCP и RTP [2] (используемые совместно в рамках RTSP-технологии передачи потокового видео); GVCP и GVSP (используемые в рамках GigE Vision-технологии [3]) и другие.

Зачастую слабая детерминированность следует философски-научному концепту «содержательность за счет деконкретизации», позволяя реализовать протокол наиболее оптимальным образом, исходя из

задачи. С другой стороны, это приводит к существенному усложнению теоретико-фундаментального анализа характеристик протокола в общем (а в некоторых случаях, и к невозможности применения теоретических подходов ввиду нецелесообразности).

В предыдущих работах [4] и [5] была введена базовая модель оценки интегральной эффективности использования тракта связи протоколами и затем использована для сравнения между собой конкурирующих технологий потоковой передачи видео. Обсуждение результатов данных работ на конференции UkrMiCo'2018 показало, что введение в базовую модель параметров, позволяющих учесть возможные помехи в тракте, является даже более актуальной и востребованной задачей, чем экспериментальная оценка интегральных эффективностей наиболее типовых протоколов связи с использованием модели базовой.



Таким образом, целью данной работы является прагматико-обусловленное развитие предложенной ранее модели. В работе представлена усовершенствованная модель оценки эффективности использования тракта связи в виде коэффициента, позволяющая учитывать возникающие ошибки передачи в непосредственном виде, без инкапсуляции трафика ошибок в сам коэффициент интегральной эффективности.

Результаты работы могут быть использованы для оценки эффективности использования тракта различными технологиями потоковой передачи данных, прогнозирования влияния ошибок на эффективность, исследования слабо детерминированных протоколов, а также для сравнения конкурирующих технологий передачи между собой по критерию интегральной эффективности.

II. ПОУРОВНЕВО-ДЕКОМПОЗИЦИОННАЯ МОДЕЛЬ С УЧЕТОМ ПОМЕХ

A. Структура базовой модели

Базовая модель применяется для трактов связи с сетевой топологией «точка-точка», в которых в явном виде присутствует порождающая сторона, передающая непрерывный поток данных с использованием набора сетевых протоколов, и принимающая сторона. В то же время все промежуточные взаимодействия между ними, необходимые для установления и поддержания связи, а также управления процессом передачи вовлекаются в рассмотрение, выступая лишь в роли неизбежного побочного трафика.

При этом в соответствии с [5] битовая скорость тракта связи S_C (бит/с) и данные передаваемого потока D (бит) порождающей стороны связаны соотношением (1):

$$S_C \geq \sup_{t \in R} \frac{dH[D]}{dt}, \quad (1)$$

где $H[\cdot]$ – оператор информационной энтропии Шеннона [6]; t – время, с.

Для идеализированного процесса передачи порождаемого потока данных D (при отсутствии сжимающих преобразований потока, а также ошибок передачи), в соответствии с [7], информационная энтропия над данными равна объему информации самих данных (2):

$$H[D] = D \quad (2)$$

Это, в свою очередь, приводит к потенциальной возможности введения коэффициента моментальной эффективности использования тракта k_{CPE} [5], связывающего битовую скорость тракта S_C (бит/с) с битовой скоростью потока порождаемых данных S_S (бит/с) и, при необходимости, учитывающего информационно-энтропийные эффекты передачи (ошибки передачи, служебный трафик, сжатие потока, инкапсуляцию и другие) (3):

$$k_{CPE}(t) = \frac{\overset{\text{def}}{S_S}(t)}{S_C} \quad (3)$$

Когда осцилляции $k_{CPE}(t)$ пренебрежительно малы или отсутствуют, модельное значение коэффициента интегральной эффективности использования тракта связи $\overline{k_{CPE}}$ может быть оценено как (4):

$$\overline{k_{CPE}} = \frac{1}{\overline{S_C} \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} S_S(t) dt, \quad (4)$$

где $\overline{S_C}$ – средняя битовая скорость тракта связи, бит/с; t_1 и t_2 – нижняя и верхняя границы временного окна оценки коэффициента интегральной эффективности, с.

В работе [5] предложен и апробирован экспериментально-статистический подход формирования нуль-гипотезы о пренебрежительно малости осцилляций $k_{CPE}(t)$, в основе которого лежит оценка соотношения амплитуд Фурье-образа [8] $k_{CPE}(t)$ (5):

$$\left| \overline{k_{CPE}}(0) \right| \ll \lim_{\delta \rightarrow 0+0} \int_{0+\delta}^{+\infty} \left| \overline{k_{CPE}}(\omega) \right| d\omega, \quad (5)$$

где $\overline{k_{CPE}}(\omega)$ – Фурье-образ $k_{CPE}(t)$; ω – циклическая частота, рад/с.

Таким образом, при выполнении соотношения (5), амплитуда нулевой гармоники, отражающая величину среднего значения сигнала, многократно превосходит сумму амплитуд остальных гармоник сигнала. В этом случае осцилляции $k_{CPE}(t)$ полагаются пренебрежительно малыми, что дает возможность оценивать $\overline{k_{CPE}}$ согласно (4).

B. Поуровневая декомпозиция коэффициента эффективности использования тракта связи

Рассмотрим общий характер процессов, связанных с межпротокольными взаимодействиями при передаче потока порождаемых данных посредством тракта связи. Как правило, протоколы и их взаимодействия подчинены эталонной модели OSI [9] либо другой OSI-подобной многоуровневой сетевой модели (напр. спецификация ZigBee). При этом, каждый из протоколов используемой сетевой модели может взаимодействовать с протоколами своего уровня, протоколами уровнем на единицу выше и уровнем на единицу ниже своего. В процессе передачи потока генерируемых данных носитель данных (PDU – Protocol Data Unit) каждого последующего низлежащего уровня сетевой модели дополняется заголовками, подвергается фрагментации, инкапсуляции и другим преобразованиям. Следовательно, можно рассматривать коэффициент интегральной эффективности использования тракта связи как комбинированное произведение соответствующих коэффициентов интегральной эффективности каждого из уровней сетевой модели (6):

$$\overline{k_{CPE}} = \prod_{j=0}^{L-1} \overline{k_{CPEj}}, \quad (6)$$

где $\overline{k_{CPEj}}$ – коэффициент интегральной эффективности использования тракта связи для j -го уровня сетевой модели; L – количество уровней сетевой модели.



Следует также отметить, что альтернативные сетевые модели, в отличие от OSI, могут допускать взаимодействие протокола сразу с несколькими верхлежащими и низлежащими уровнями, поуровневая декомпозиция в изначальном выше предложенном виде к подобным протоколам не применима.

C. Функция генерации трафика ошибки

Пусть в момент времени t_{ERR} при передаче потока данных произошла ошибка. Тогда это приведет к изменению объемов трафика в тракте связи в течении некоторого последующего времени. При чем величина изменений может иметь как положительное (например, накладные расходы, связанные с восстановлением соединения и повторной передачей недоставленных данных), так и отрицательное значение (разрыв соединения без использования протоколов гарантированной доставки данных). Условием возможности поддержания соединения между двумя узлами тракта является конечность времени реакции на ошибку. С учетом вышесказанного, функцию генерации трафика ошибки можно представить как (7):

$$Q[i, t_{ERR}, t] \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} q_i(t - t_{ERR}), & t_{ERR} \leq t \leq t_{ERR} + T_{Wi} \\ 0, & t < t_{ERR} \vee t > t_{ERR} + T_{Wi} \end{cases}, \quad (7)$$

где $Q[i, t_{ERR}, t]$ – трафик в момент времени t , порождаемый ошибкой i -го вида, бит; t_{ERR} – время возникновения ошибки, с; T_{Wi} – ширина окна ошибки i -го вида, с; $q_i(t)$ – функция, определяющая объем трафика генерируемого ошибкой i -го вида, бит.

Стоит заметить, что ошибки и соответствующие им реакции в виде изменений объема трафика в тракте, как правило являются типизируемыми и, более того, вероятно-повторяемыми [10], что было учтено в (6). Из этого также следует допустимость рассмотрения средней битовой скорости трафика ошибок как средней величины суперпозиции трафика отдельных ошибок при условии достаточной (в характеристическом смысле) ширины интервала усреднения $[t_1, t_2]$ (8):

$$\overline{S_{ERR}} = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \int_{t_1}^{t_2} Q[i, t_{ERRm}, \tau] d\tau}{t_2 - t_1}, \quad (8)$$

где $\overline{S_{ERR}}$ – средняя битовая скорость генерируемого трафика ошибок, бит/с; t_1 и t_2 – значения времени начала и конца интервала усреднения, с; I – множество видов ошибок; M_i – множество ошибок i -го вида.

D. Вероятностно-заданные функции генерации трафика ошибок

В телекоммуникациях, при построении моделей, широко распространен вероятностный подход к учету ошибок передачи. Исходя из этого, целесообразным является представление (8) в эквивалентной форме, предусматривающей такую возможность. В случаях, когда отдельные ошибки передачи являются независимыми случайными событиями [11],

подчиненными вероятностному закону, нами предлагается оценивать среднюю битовую скорость генерируемого трафика ошибок согласно (9):

$$\overline{S_{ERR}} = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{\mu_i \cdot \int_0^{T_{Wi}} q_i(\tau) d\tau}{T_{Wi}} \right), \quad (9)$$

где N – мощность множества видов ошибок I ; μ_i – весовой коэффициент, отражающий вероятность появления ошибок i -го вида.

Выводы

В работе представлено дальнейшее развитие предложенной и апробированной ранее [4, 5] базовой модели оценки эффективности использования тракта связи. Предлагаемая улучшенная модель позволяет учитывать возникающие в тракте связи ошибки передачи в явном виде, не инкапсулируя их в самом коэффициенте эффективности, что позволяет отделить трафик полезной нагрузки от трафика ошибок. Более того, представленные выражения для функции генерации трафика ошибок, а также функций средней битовой скорости трафика ошибок являются в достаточной мере общими для наполнения конкретным содержанием, исходя из условий решаемой задачи.

При этом, модель предусматривает возможность задания порождающих функций ошибок как на основе анализа набора собранных экспериментальных данных о трафике в тракте постфактум, так и на основании априори известных вероятностных параметров самого тракта и используемых протоколов связи. В предложенной улучшенной модели присутствует явное разделение между моментальными и интегральными коэффициентами эффективности, что приводит к более строгой формализованности модели. Также модель предоставляет необходимый инструментарий для анализа влияния конкретных технологий доставки данных на результирующую интегральную эффективность использования тракта связи с использованием поуровневой декомпозиции.

Рассматривая возможные потенциальные направления применения полученной модели, можно утверждать, что представленная в работе модель предусматривает обязательное наличие узла-источника, порождающего непрерывный поток данных и узла-приемника, связанных трактом связи с топологией типа «точка-точка». Это условие выполняется для множества технических решений, включая потоковую передачу видео и других мультимедиа данных, непрерывных телеметрических показаний, удаленного управления, и даже файлообмена с использованием высокоуровневых сетевых протоколов. При этом модель опирается на наличие набора экспериментальных данных о сетевых взаимодействиях с использованием тракта связи, например, данных захвата фактического трафика тракта. Таким образом, применимость модели не ограничивается лишь задачами анализа слабо детерминированных протоколов.



Возможными направлениями дальнейших исследований являются: восстановление распределений вероятностей возникновения ошибок передачи по захваченному трафику тракта с использованием модели; изменение модели с целью потенциальной допустимости применения поуровневой декомпозиции к многоуровнево-межвзаимодействующим сетевым протоколам; анализ типовых классов вероятностно-заданных функций генерации трафика ошибок.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа была выполнена в рамках госбюджетной темы «Многоканальный тепловизионно-телевизионный комплекс поиска-обнаружения с помехоустойчивым быстродействующим интерфейсом передачи данных» (0118U00375) при поддержке Министерства образования и науки Украины.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- [1] "IETF Internet Standards. RFC 7826 - Real-Time Streaming Protocol," [Online].
Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc7826>. [Accessed 18 Nov. 2018].
- [2] "IETF Internet Standards. RFC 3550 - RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications," [Online].
Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc3550>. [Accessed 18 Nov. 2018].
- [3] "AIA Association – Vision Standards. GigE Vision Main Page," [Online]. Available: <https://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm>. [Accessed 18 Nov. 2018].
- [4] Khodniev T. A.; Varfolomeiev A. Y., "Ocenka effektivnosti ispol'zovaniya trakta svyazi protokolami RTSP-videoveshchaniya v zadachah peredachi videop [Evaluating the efficiency of communication path utilization by RTSP broadcasting protocols in tasks of real-time video sequences transmission]," in *Conference materials of XIIIth International Scientific Conference "Modern challenges in telecommunications"*, Kyiv, Ukraine, 2018.
- [5] Khodniev T. A.; Varfolomeiev A. Y.; Lysenko O. M.; Antonyuk O. I., "Comparison of RTSP and GigE Vision video streaming technologies in terms of communication path utilization efficiency: an experimental approach," in *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo2018)*, Odessa, Ukraine, 2018.
- [6] R. M. Gray, *Entropy and Information Theory*, 2 ed., New York: Springer, 2011. ISBN 978-1-4419-7970-4.
- [7] A. Ben-Naim, *Information Theory*, vol. Part I: An Introduction to the Fundamental Concepts, New Jersey: World Scientific, 2017. ISBN 978-981-3208-83-4.
- [8] C. Chatfield, *The Analysis of Time Series: An Introduction*, 6 ed., Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2003. ISBN 9781584883173.
- [9] V. Olifer and N. Olifer, *Kompiuternie seti. Printsipi, tehnologii, protokoly*. [Computer networks. principles, technologies, protocols], 5 ed., St. Petersburg: Piter, 2016. ISBN 5-469-00504-6.
- [10] W. Turin and M. M. Sondhi, "Modeling error sources in digital channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. XI, no. 3, p. 340–347, 1993. DOI: 10.1109/49.219549.
- [11] M. H. DeGroot and M. J. Schervish, *Probability and statistics*, London: Pearson Education, 2012. ISBN 9780201524888.

Надійшла до редакції 01 грудня 2018 р.

УДК 004.77:[654.021+654.027]

Порівнево-декомпозиційна модель оцінки інтегральної ефективності використання тракту зв'язку з урахуванням перешкод

Ходнев^f Т. А., ORCID [0000-0001-9168-0504](https://orcid.org/0000-0001-9168-0504)

e-mail t.khodniev@kpi.ua

Антонюк^s О. І., ORCID [0000-0002-9071-2292](https://orcid.org/0000-0002-9071-2292)

e-mail o.antonyuk@kpi.ua

Варфоломеев^s А. Ю., к.т.н., ORCID [0000-0002-6990-7140](https://orcid.org/0000-0002-6990-7140)

e-mail a.varfolomeiev@kpi.ua

Лисенко^s О. М., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-1051-1149](https://orcid.org/0000-0003-1051-1149)

e-mail o.lysenko@kpi.ua

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури keoa.kpi.ua

Факультет електроніки fel.kpi.ua



Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Анотація—В роботі представлено розвиток раніше запропонованої моделі оцінки ефективності використання тракту зв'язку. Удосконалена модель дозволяє в явному вигляді враховувати помилки, що виникають в тракті зв'язку в процесі передачі потоку даних, як на основі аналізу фактичного захопленого трафіку тракту, так і з використанням апіорі відомих ймовірнісних характеристик помилок передачі; передбачає можливість порівнявчої декомпозиції коефіцієнту інтегральної ефективності використання тракту для аналізу вкладу окремих рівнів мережевої моделі та відповідних протоколів у результуючу інтегральну ефективність; є більш формалізованою та прагматико-обумовленою. Модель може бути використана для оцінки ефективності використання тракту технологіями потокової передачі даних, прогнозування впливу помилок на ефективність, дослідження слабо детермінованих протоколів, а також для порівняння конкуруючих технологій передачі між собою за критерієм інтегральної ефективності.

Бібл. 11

Ключові слова — тракт зв'язку; потокова передача; інтегральна ефективність; порівнявча декомпозиція

UDC 004.77:[654.021+654.027]

By-Layer Decomposition Model for Evaluating the Integral Communication Path Utilization Efficiency with Account for Errors

T. A. Khodniev^f, ORCID [0000-0001-9168-0504](https://orcid.org/0000-0001-9168-0504)

e-mail t.khodniev@kpi.ua

O. I. Antonyuk^g, ORCID [0000-0002-9071-2292](https://orcid.org/0000-0002-9071-2292)

e-mail o.antonyuk@kpi.ua

A. Yu. Varfolomeiev^g, PhD, ORCID [0000-0002-6990-7140](https://orcid.org/0000-0002-6990-7140)

e-mail a.varfolomeiev@kpi.ua

O. M. Lysenko^g, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-1051-1149](https://orcid.org/0000-0003-1051-1149)

e-mail o.lysenko@kpi.ua

Department of Design of Electronic Computing Equipment keoa.kpi.ua

Faculty of Electronics fel.kpi.ua

National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute” kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—The paper presents the evolution of the previously proposed model for estimating the communication path utilization efficiency. The improved model allows to explicitly take into account the errors occurring in the communication path during data stream transmission, both based on the analysis of the actual captured communication path traffic and using a priori known probability characteristics of the transmission errors; provides the possibility of by-layer decomposition of the integral communication path utilization efficiency coefficient for analyzing the contribution of the network model individual layers and the corresponding protocols to the resulting efficiency; is considered more formalized and pragmatic. The model can be used to estimate the efficiency of communication path utilization by various streaming technologies, predicting the effect of errors on the resulting efficiency, investigating the weakly determined protocols, and also comparing the competing transmission technologies among themselves by the integral efficiency criterion.

Ref. 11.

Keywords – communication path; streaming transmission; integral efficiency; by-layer decomposition

