

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАННОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЧЕРЕЗ АГРЕГИРОВАННЫЕ КАНАЛЫ

В. А. БОГАТЫРЕВ, И. А. СЛАСТИХИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com*

Проанализирована возможность повышения эффективности обмена данными через резервированный канал для запросов на передачу пакетов, критичных к времени их безошибочной доставки адресату. Исследована эффективность резервированной передачи копий пакетов по нескольким каналам, при которой обеспечивается компромисс между снижением среднего времени пребывания запросов на передачу пакетов и их безошибочной передачей за определенное время для систем, исключающих возможность повторных передач пакетов из-за ограничений по времени их доставки. На основе аддитивного и мультипликативного критериев показано наличие оптимального значения кратности резервирования копий передаваемых пакетов и области эффективности резервированных передач по агрегированному каналу.

Ключевые слова: *сеть, надежность, критичность к времени доставки, резервированная передача пакетов, пакеты, агрегирование каналов, передача данных*

Введение. К вычислительным сетям и системам связи предъявляются жесткие требования по обеспечению высокой производительности, безопасности, отказоустойчивости и надежности структуры и процесса передачи данных при условиях безошибочности и малых задержках доставки пакетов. Отказоустойчивость, безопасность и надежность вычислительных систем и сетей достигается, прежде всего, при резервировании средств хранения, обработки и передачи данных [1—6].

Резервирование каналов в современных сетях сопровождается их агрегированием и использованием методов повышения надежности на основе протоколов с подтверждением доставки, протоколов скользящего окна, фрагментации пакетов, снижения скорости передачи, увеличения мощности передатчиков, кодирования и модуляции данных, а также увеличения размеров буферной памяти сетевых адаптеров. Дополнительные возможности повышения надежности передач обеспечивает консолидация ресурсов каналов на основе адаптивного распределения потоков передаваемых данных и их резервированного обслуживания.

Координация действий производителей сетевого оборудования по консолидации ресурсов резервированных каналов привела к появлению следующих стандартов:

— стандарт 802.3ad-2000 (IEEE Standard for Information Technology — Local and Metropolitan Area Networks), регламентирующий агрегирование на канальном уровне сетей CSMA / CD и технологию объединения нескольких физических каналов в один логический;

— стандарт IEEE 802.1AX-2008 (IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Link Aggregation), описывающий возможности агрегирования каналов независимо от реализации уровня доступа к среде.

Повышение эффективности обмена при объединении резервированных каналов в единую среду требует исследования вариантов проектных решений по организации межмашинного обмена, в том числе вариантов распределения пакетов по каналам, с оценкой их эффективности в зависимости от изменяющихся условий передачи [6—9].

Повышение надежности процесса передачи данных может достигаться при резервированной передаче копий пакетов по нескольким каналам.

Модели резервированного обслуживания запросов в многоканальных системах с очередями исследовались в работе [10], а в кластере одноканальных систем — в работах [11, 12]. Специфика информационно-коммуникационных систем кластерной архитектуры по обслуживанию запросов, критичных к времени ожидания, характерная для систем реального времени, учтена в моделях, предложенных в работах [11, 13—17].

Анализ вариантов резервированной (дублированной) передачи копий пакетов по нескольким каналам (магистралям) с учетом повторов передач при ошибках проведен в работе [9], в которой показано наличие области, где дублированная передача пакетов целесообразна. При этом рассмотрены следующие варианты проектных решений по организации передачи данных по резервированным магистралям:

- пакет передается по одной из магистралей, а в случае его не доставки (нарушения контрольной суммы) он повторно передается после освобождения магистрали;
- копии пакета передаются по двум магистралям одновременно, а в случае не доставки обеих копий их передача повторяется после освобождения магистралей;
- пакет передается по одной из магистралей, а в случае неудачной попытки доставки он передается повторно по той же магистрали без ее освобождения;
- копии пакета передаются по двум магистралям одновременно, а в случае не доставки обеих копий они повторно передаются по тем же магистралям (без их освобождения).

Предусмотренная в указанных вариантах повторная передача данных в случае неудачных попыток доставки пакетов по адресу [9] предполагает наличие запаса (временной избыточности) по предельно-допустимому времени безошибочной доставки пакетов. Повторные передачи допустимы при не критичности системы к задержкам ожидания квитанций и усложнению процессов (протоколов) передачи при организации скользящего окна, к поддержке порядка доставки пакетов и увеличению буферной памяти приема и передачи пакетов. Для систем, критичных к времени доставки пакетов, все это приводит к неэффективности вариантов обмена с повторами передач. К системам, критичным к времени доставки данных, в том числе через беспроводные каналы, относятся, прежде всего, управляющие и информационно-измерительные системы реального времени [17—19].

Следует заметить, что резервированная передача копий данных по нескольким каналам приводит к техническому противоречию, так как происходящее при этом повышение надежности доставки пакетов одновременно влечет за собой увеличение нагрузки на каналы и, как следствие, снижение производительности сети и увеличение задержек доставки пакетов.

Разрешение этого противоречия связано с решением оптимизационной задачи определения числа каналов, выделяемых для резервированной передачи пакетов (кратность резервирования передач).

Таким образом, для информационно-коммуникационных систем и сетей, критичных к времени доставки пакетов, требуется осуществить поиск оптимальных (рациональных) вариантов передачи через агрегированные каналы при резервированной передаче по ним пакетов для систем, исключая возможность повторных передач при не доставке пакетов.

Постановка задачи исследований. Рассмотрим систему, критичную к времени доставки пакетов через резервированную среду передачи данных. Передача пакетов может осуществляться с помощью резервированной передачи их копий по нескольким магистралям при исключении возможностей повторных передач пакетов в случае ошибок их доставки адресату.

Цель исследования — повышение эффективности передачи данных, критичных к времени их доставки через агрегированные каналы, на основе резервированной передачи копий пакетов по нескольким каналам.

Для достижения этой цели необходимо сформировать варианты обмена через агрегированные каналы и обосновать выбор оптимальной кратности резервированных передач пакетов. Причем обоснование выбора связано с решением многокритериальной задачи [20], так как для систем рассматриваемого класса требуется обеспечить высокую надежность доставки пакетов адресатам при сокращении задержек доставки. Выбор осуществляется на основе разрешения указанного выше технического противоречия — влияния кратности резервирования на увеличение нагрузки (и соответственно увеличение задержек передач) и увеличение вероятности безошибочной резервированной передачи хотя бы по одному каналу без повторных попыток передачи.

Следует отметить, что резервированная передача копий пакетов приводит к необходимости уничтожения избыточных принятых копий. Для этого на передатчике все пакеты циклически нумеруются, причем все копии имеют одинаковые номера. На приемнике после безошибочного приема (без нарушения контрольных сумм) одной из передаваемых копий все остальные принятые позже копии с одинаковыми номерами и совпадающими адресами приемника и источника уничтожаются. Процедура уничтожения избыточных копий не связана с задержкой передачи пакетов через каналы и не вызывает задержку обработки пакета, принятого первым.

Среднее время пребывания в системе запросов на резервированную передачу копий пакетов. Исследуем, как выбор кратности резервированной передачи через многоканальную среду влияет на среднее время пребывания запросов на передачу пакетов в системе.

Будем считать заданными следующие параметры: m — число магистралей в сети, B — вероятность (интенсивность) битовых ошибок в магистрали, N — средняя битовая длина пакетов, L — битовая скорость передачи по каналу. Среднее время передачи пакета по магистрали определим как $V = N / L$.

Среднее время пребывания запросов при интерпретации процесса передачи через канал системой массового обслуживания типа М/М/1 определим как

$$T = V / (1 - k\Lambda V / m),$$

где k — кратность резервирования передач (количество магистралей для резервированной передачи копий пакета), Λ — интенсивность запросов на передачу пакетов через сеть.

Приведем пример расчета среднего времени пребывания в системе пакета в зависимости от кратности резервированной передачи его копий при различных значениях загрузки. Расчет проведен в системе компьютерной математики MathCad-15 при $m = 5$, $N = 256$ бит, $L = 100$ Мбит/с.

Зависимость $T(k)$ представлена на рис. 1, где кривые 1—5 соответствуют среднему времени пребывания пакетов при интенсивности запросов на их передачу $\Lambda = 10^4$, $9 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^5$, $2,5 \cdot 10^5$, $3 \cdot 10^5$ с⁻¹.

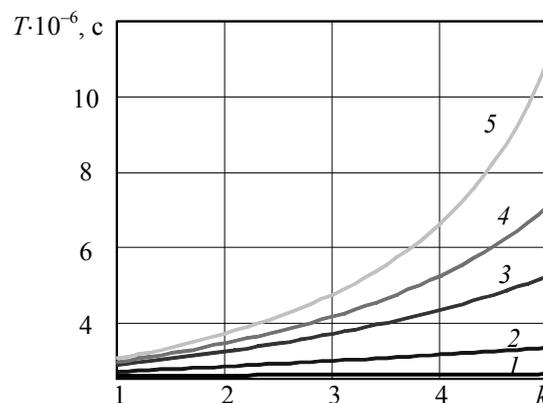


Рис. 1

Анализ графика показывает, что при увеличении значения k среднее время T растет, при этом чем больше величина λ , тем больше время пребывания запросов при использовании резервированной передачи.

Вероятность безошибочности резервированной передачи копий пакетов. Вероятность ошибки при передаче пакета по одной магистрали определим как

$$p = (1 - B)^N.$$

Вероятность успешной доставки пакетов по k магистралям с посылкой по каждой из них резервной копии пакета при условии, что передача считается успешной, если безошибочно доставлена хотя бы одна копия пакета, определим как

$$P = 1 - (1 - p)^k.$$

Произведем расчет вероятности доставки пакетов в зависимости от кратности резервирования передач пакетов при значениях m , N и L , принятых в предыдущем примере.

Зависимость $P(k)$ приведена на рис. 2, где кривые 1 и 2 соответствуют $B_1 = 10^{-4}$ и $B_2 = 10^{-5}$, а кривая 3 соответствует разности D вероятностей безошибочной доставки хотя бы одной копии при указанных вероятностях.

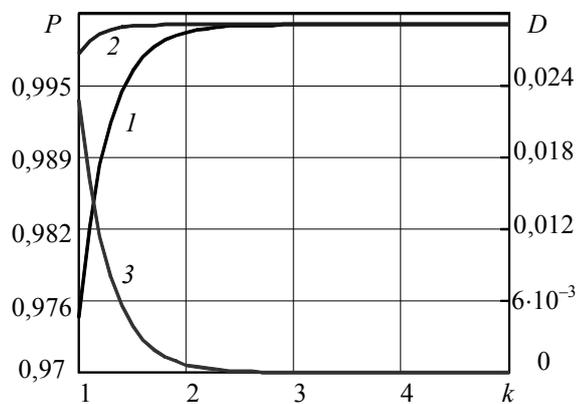


Рис. 2

Представленные зависимости показывают, что при увеличении кратности резервирования передачи вероятность безошибочной доставки пакета хотя бы по одному каналу увеличивается. Однако, как было показано, при этом увеличивается нагрузка каналов и время задержек передач. Это обуславливает необходимость многокритериального подхода к принятию решений по целесообразности резервированных передач и обоснованию выбора рациональной кратности резервирования передач на основе комплексного показателя, учитывающего влияние величины k на параметры T и P .

Векторная оценка эффективности резервированной передачи. Для решения задачи многокритериального выбора проектных решений по организации обмена через резервированные каналы воспользуемся двумя вариантами представления мультипликативного критерия, объединяющего частные критерии, — вероятность безошибочной доставки пакета и задержку этой доставки.

В первом варианте мультипликативного критерия $M_1 = P/T$ учитывается, что среднее время T должно быть как можно меньше, а во втором — $M_2 = P(t_0 - T)$, что запас времени $(t_0 - T)$ должен быть как можно больше. Специфике передачи пакетов, критичных к времени доставки, более соответствует второй вариант мультипликативного критерия.

Зависимости $M_1(k)$ и $M_2(k)$ представлены на рис. 3, а, б соответственно. Расчет проведен при значениях параметров, принятых выше. На графиках кривые 1 — б соответствуют интенсивности $\Lambda = 1,4 \cdot 10^5, 10^5, 7 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^4, 2,5 \cdot 10^4, 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Представленные зависимости показывают, что при увеличении кратности резервирования передач эффективность резервированной передачи растет до некоторого порогового значения, после чего снижается. Иначе говоря, существует оптимальное значение кратности резервирования передач. Таким образом, при выборе проектных решений по организации передачи пакетов в сетях с резервированием каналов требуется решить оптимизационную задачу. Дробное значение оптимальной кратности резервирования свидетельствует о целесообразности смешанной стратегии назначения величины k , когда целые значения k выбираются из множества значений с некоторыми вероятностями. Расчет, иллюстрируемый рис. 3, проведен при использовании каналов связи с вероятностью битовых ошибок $B = 10^{-4}$, с уменьшением этой вероятности оптимальная кратность резервирования передач увеличивается.

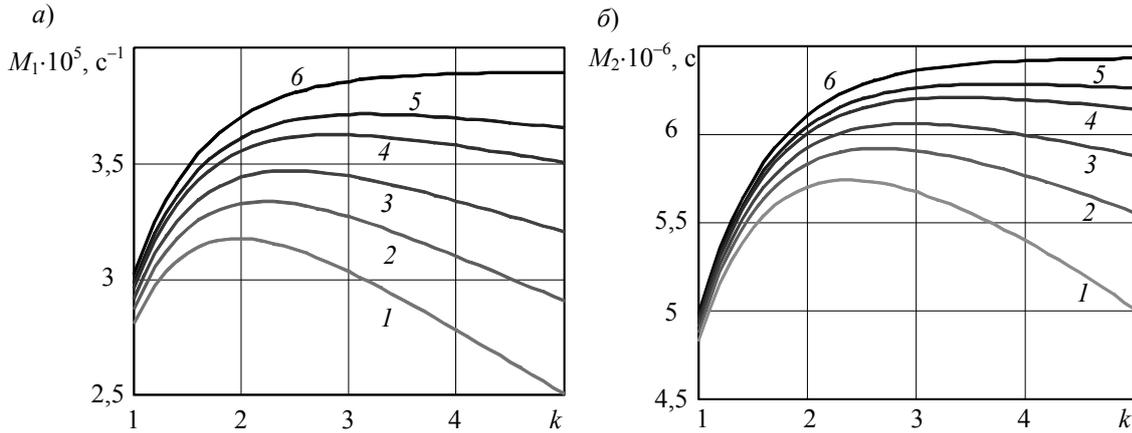


Рис. 3

Для подтверждения результатов исследования эффективности резервированных передач по мультипликативному критерию проведем аналогичный анализ по аддитивному критерию:

$$A = P + (t_0 - T) / (t_0 - T_{\min}),$$

где T_{\min} — минимально возможное время пребывания запросов на передачу пакетов в системе.

Пренебрегая потерями на ожидание запросов в очереди, можно считать, что $T_{\min} = V$. С учетом ожидания запросов в очередях примем время пребывания запросов минимальным при обслуживании с балансировкой нагрузки без резервирования передач:

$$T_{\min} = V / (1 - V / m).$$

На рис. 4 представлены результаты расчета эффективности резервированной передачи по аддитивному критерию A в зависимости от кратности передач k в предположении, что $T_{\min} = V$, здесь кривые 1 — 6 соответствуют интенсивностям $\Lambda = 1,4 \cdot 10^5, 10^5, 7 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^4, 2,5 \cdot 10^4, 10^3 c^{-1}$. Расчет выполнен при уже известных параметрах и $B = 10^{-4}$, когда время предельно допустимой задержки $t_0 = 9 \cdot 10^{-6} c$.

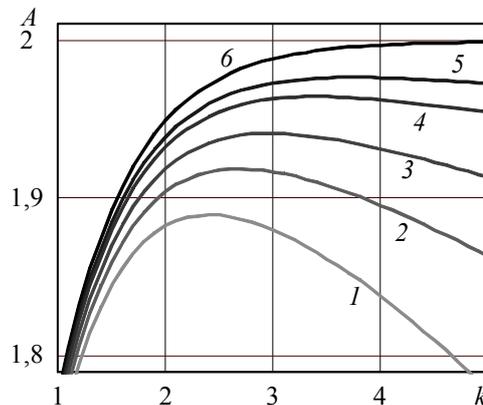


Рис. 4

Представленные зависимости эффективности резервированных передач копий пакетов по аддитивному критерию подтверждают результаты исследования эффективности по мультипликативному критерию.

Заключение. Проанализирована возможность повышения эффективности передачи данных, критичных к времени их доставки, через агрегированные каналы на основе резервированной передачи копий пакетов по нескольким каналам.

Для вариантов организации обмена через агрегированный (резервированный) канал без повторов передач на основе аддитивного и мультипликативного критериев показано наличие оптимального значения кратности резервирования копий передаваемых пакетов и области эффективности резервированных передач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sorin D.* Fault Tolerant Computer Architecture. Morgan & Claypool 2009. 103 p.
2. *Черкесов Г. Н.* Живучесть и отказобезопасность ответственных технических систем // Проектирование и технология электронных средств. 2015. № 1. С. 15—24.
3. *Шубинский И. Б.* Функциональная надежность информационных систем: методы анализа. М.: Изд-во «Журнал „Надежность“», 2012. 296 с.
4. *Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Коробейников А. Г.* Математические модели оценки инфраструктуры системы защиты информации на предприятии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 92—95.
5. *Колбанёв М. О., Татарникова Т. М., Воробьёв А. И.* Оценка вероятностно-временных характеристик процесса предоставления информационно-справочных услуг // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 15—18.
6. *Aliev T. I., Rebezova M. I., Russ A. A.* Statistical methods for monitoring travel agencies // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. Vol. 49, N 6. P. 321—327.
7. *Bogatyrev V. A.* An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing // Automatic Control and Computer Sciences. 2000. Vol. 34, N 6. С. 51—57.
8. *Bogatyrev V. A.* Protocols for dynamic distribution of requests through a bus with variable logic ring for reception authority transfer // Automatic Control and Computer Sciences. 1999. Vol. 33, N 1. С. 57—63.
9. *Богатырев В. А., Осипов А. В., Богатырев С. В.* и др. Организация межмашинного обмена при резервировании магистралей // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 2. С. 171.
10. *Lee M. H., Dudin A. N., Klimenok V. I.* The SM/V/N queueing system with broadcasting service // Math. Problems in Engineering. 2006. Vol. 2006. Art. ID 98171. 18 p.
11. *Богатырев В. А., Богатырев А. В.* Оптимизация резервированного распределения запросов в кластерных системах реального времени // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 7. С. 495—502.
12. *Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В.* Перераспределение запросов между вычислительными кластерами при их деградации // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 9. С. 54—58.
13. *Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В.* Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 4. С. 46—48.
14. *Богатырев В. А.* Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 18—21.
15. *Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В.* Оптимизация кластера с ограниченной доступностью кластерных групп // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 1 (71). С. 63—67.
16. *Bogatyrev V. A.* On interconnection control in redundancy of local network buses with limited availability // Engineering Simulation. 1999. Vol. 16, N 4. С. 463—469.
17. *Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V.* Functional Reliability of a Real-Time Redundant Computational Process in Cluster Architecture Systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. Vol. 49, N 1. P. 46—56. DOI: 10.3103/S0146411615010022.

18. *Ojiganov A. A.* The use of hamming codes in digital angle converters based on pseudo-random code scales // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58, N 5. P. 512—519.
19. *Galina O., Mikhaylov K., Andreev S., Turlikov A., Koucheryavy Y.* Smart home gateway system over Bluetooth low energy with wireless energy transfer capability // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2015. N 178. P. 18.
20. *Уткин Л. В.* Анализ рисков и принятие решений при неполной информации. СПб: Наука, 2007. 404 с.

Сведения об авторах

- Владимир Анатольевич Богатырев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Иван Александрович Сластихин** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: Stopgo89@gmail.com

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
05.02.16 г.

Ссылка для цитирования: *Богатырев В. А., Сластихин И. А.* Эффективность резервированной передачи данных через агрегированные каналы // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 370—376.

**EFFECTIVENESS OF REDUNDANT DATA TRANSMISSION
OVER AGGREGATE CHANNELS**

V. A. Bogatyrev, I. A. Slastikhin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com

The possibility to improve efficiency of data exchange over redundant channel is analyzed for the case when the channel is used for request for transmission of data packets sensitive to delay of faultless delivery to the addressee. The effectiveness of redundant transmission of packet copies over several channels is considered to allow for compromise between decrease of average time of request processing and requirements for faultless transfer for a given time for systems with excluded feasibility of repeated packet sending due to delivery time limitation. The existence of optimal multiplicity of backup copies and an area of effectiveness of redundant data transfer over an aggregate channel are demonstrated on the base of additive and multiplicative criteria.

Keywords: network, reliability, sensitivity to delay of delivery, redundant data packets, packets, aggregate channel, data transfer

Data on authors

- Vladimir A. Bogatyrev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computation Technologies; E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Ivan A. Slastikhin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Computation Technologies; E-mail: Stopgo89@gmail.com

For citation: *Bogatyrev V. A., Slastikhin I. A.* Effectiveness of redundant data transmission over aggregate channels // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2016. Vol. 59, N 5. P. 370—376 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-370-376