



## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

УДК 004.7, 004.9

DOI: 10.31799/2077-5687-2026-1-3-13

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СЕТИ SPACEFIBRE ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ БУФЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ МЕЖДУ ПОТОКАМИ ДАННЫХ

**Е. А. Суворова**

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*В сетях аэрокосмического назначения управление ресурсами осуществляется по статической схеме. Зачастую это приводит к длительным простоям сетевого оборудования, зарезервированного для передачи определенных потоков данных. Это происходит вследствие того, что интервалы времени передачи данных чередуются с интервалами времени, в которых передачи отсутствуют. Динамическое перераспределение ресурсов позволяет в разные моменты времени использовать их для разных потоков данных. Использование для динамического управления распределением ресурсов в сетях SpaceFibre мультиагентных самообучающихся систем позволяет сократить количество сетевых ресурсов, необходимое для передачи данных. Но при использовании этой схемы управления результат существенно зависит от того, какую информацию о состоянии сети получают агенты. В статье проанализированы оценки состояния сетевого оборудования, используемые для сетей на базе Ethernet, Infiniband. Показано, что эти оценки состояния не подходят для сетей на базе SpaceFibre. В статье предложены механизмы оценки состояния сети для SpaceFibre, приведены достижимые характеристики при их использовании.*

*Ключевые слова:* динамическая реконфигурация, SpaceFibre, адаптивность, мультиагентные системы, обучение с подкреплением.

**Для цитирования:**

*Суворова, Е. А. Оценка состояния сети SpaceFibre для динамического распределения ресурсов буферного пространства сетевых устройств между потоками данных / Е. А. Суворова // Системный анализ и логистика. – 2026. – № 1(49). – с. 3-13. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-1-3-13.*

### THE SPACEFIBRE NETWORK STATE EVALUATION FOR DYNAMIC ALLOCATION OF BUFFER SPACE RESOURCES FOR NETWORK DEVICES BETWEEN DATA FLOWS

**E. A. Suvorova**

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

*In aerospace networks, resource management is carried out according to a statistical scheme. This often leads to long downtime of network equipment reserved for the transmission of certain data flows (streams). This is due to the fact that the time intervals of data transmission alternate with time intervals in which there are no transmissions. Dynamic resource reallocation allows us to use resources for different data streams at different points in time. The use of multi-agent self-learning systems for dynamic resource allocation management in SpaceFibre networks reduces the amount of network resources required for data transfer. However, when using this control scheme, the result depends significantly on what information about the network status the agents receive. The article analyzes the assessments of the condition of network equipment used for networks based on Ethernet, Infiniband. It is shown that these condition estimates are not suitable for SpaceFibre-based networks. The article proposes mechanisms for assessing the network status for SpaceFibre, and provides achievable characteristics when using them.*

*Keywords:* dynamic reconfiguration, SpaceFibre, adaptivity, multi-agent systems, reinforcement learning.

**For citation:**

*Suvorova, E. A. The SpaceFibre network state evaluation for dynamic allocation of buffer space resources for network devices between data flows / E. A. Suvorova // System analysis and logistics. – 2026. – № 1(49). – p. 3-13. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-1-3-13.*

### Введение

В большинстве современных сетей аэрокосмического назначения на базе стандарта SpaceFibre [1] управление ресурсами сети осуществляется по статической схеме. На этапе разработки сети определяются пути передачи потоков данных, количество буферного



пространства и правила разделения во времени физического канала между потоками данных. В соответствии с этим определяются начальные настройки для сетевого оборудования. В дальнейшем, при изменении режима функционирования сети, возникновении сбоев, отказов сетевого оборудования, масштабировании сети менеджер сети вносит соответствующие изменения в настройки оборудования. Такой подход имеет ряд существенных ограничений. Характеристики потоков данных могут значительно изменяться во времени (в разных фазах вычислительного процесса) [2-4]. При предоставлении им ресурсов в соответствии с их максимальными характеристиками, большая часть ресурсов будет простаивать в течение продолжительных периодов времени. Если же предоставлять потокам ресурсы, например, в соответствии с некоторым уровнем, требуемых для них характеристик, например, среднее значение или 0,75 от максимального значения, то некоторое количество трафика может быть отброшено из-за нехватки ресурсов. Для сетей аэрокосмического назначения, как правило, допустимы потери только очень небольшого количества трафика. Из-за этого может оказаться, что приемлемые потери достигаются только при выделении более 0,9 от максимального значения требуемых ресурсов. Таким образом, получить сколько-нибудь ощутимый выигрыш в части количества ресурсов таким образом не получится.

При изменениях в сети менеджер действует в соответствии с заранее определенными сценариями (заготовленными наборами настроек). Зачастую количество таких сценариев очень невелико, в частности, из-за ограниченного объема памяти для их хранения и требованиям по детерминированности поведения системы [3, 4]. Из-за этого довольно часто реконфигурация в случае отказа сетевого оборудования сводится к переключению с основного комплекта оборудования на резервный. В результате для парирования отказов используется очень большое количество оборудования.

Сокращение количества используемого сетевого оборудования, обеспечение живучести сети, продление ее срока эксплуатации может быть достигнуто за счет перехода к динамическому распределению сетевых ресурсов и распределенному управлению сетью с использованием самообучающихся агентов [5- 7]. Основными проблемами для таких систем является обеспечение согласованности действий агентов (распределенное управление не должно приводить к переходу системы в недопустимое состояние) и оперативность реакции на изменения состояния сети [7- 9]. Часть этих проблем может быть решена за счет того, что менеджер сети задает границы, в пределах которых агенты могут выбирать текущие значения параметров. Эффективность функционирования сети при таком управлении очень значительно зависит от того, каким образом определяется текущее состояние сети, сетевых ресурсов, являются ли наблюдаемыми параметры, значения которых необходимы для принятия решений [5, 6, 8, 9, 10].

Подобные схемы управления в настоящее время довольно широко применяются в сетях на базе Ethernet и Infiniband [10-12]. В этих сетях оценка состояния основана на уровне загрузки буферов транзитных коммутаторов/маршрутизаторов. В данной статье рассматривается применимость такого способа оценки состояния для сети SpaceFibre, предлагаются другие способы оценки состояния, выполняется оценка и сравнение достижимых характеристик.

### **Мультиагентные самообучающиеся системы для управления распределением сетевых ресурсов**

Даже в системах с довольно жестко детерминированным поведением, циклическим выполнением задач, к которым относятся сети аэрокосмического назначения, характеристики потоков данных могут достаточно значительно меняться на разных этапах вычислительного процесса. Такие изменения могут происходить достаточно часто. Для того, чтобы рационально (без длительных простоев) использовать сетевое оборудование целесообразно использовать динамическое перераспределение ресурсов между потоками данных. Поскольку такого рода изменения потоков данных являются не детерминированными (детерминированы



только граничные значения характеристик), то не может быть использован детерминированный алгоритм управления ресурсами. Вследствие этого происходит переход к самообучающимся системам управления, которые могут самостоятельно адаптироваться к изменениям характеристик потоков данных и изменениям, происходящим в сети. Поскольку для обучения нет возможности использовать размеченные наборы данных и должен обеспечиваться детерминизм результатов, наиболее целесообразно использование самообучения с подкреплением. Наиболее подходящей является схема актор-критик, поскольку в этом случае и целевая функция и функция вознаграждения адаптируется к изменениям, происходящим в сети.

Изменения характеристик потоков данных могут происходить достаточно часто, вследствие этого реакция на них должна быть быстрой. (При длительном времени реакции могут возникать ситуации, когда характеристики потоков данных меняются быстрее, чем происходит реакция на предыдущие изменения.) Вследствие этого для таких систем целесообразно использовать распределенные мультиагентные схемы управления. В таких схемах все агенты работают над достижением общей цели – обеспечением передачи прикладного трафика с требуемыми характеристиками качества сервиса. Поскольку агенты работают над достижением общей задачи (не конкурируют между собой), данные системы относятся к системам, ориентированным на «достижение всеобщего блага» (collective good|welfare).

С точки зрения моментов времени, в которые агенты принимают решения, такие системы являются асинхронными, поскольку пакеты пользовательского трафика поступают к агентам в различные моменты времени и информация о изменениях состояния системы достигает агентов также за различное время.

Рассматриваемый класс сетей относится к сетям с требованиями реального времени. В этих сетях весь трафик, который нет возможности доставить вовремя, отбрасывается. Вследствие этого в качестве оценки управления будем использовать долю отброшенных данных по отношению к общему количеству передаваемых данных.

Для мультиагентных систем достижимые характеристики очень сильно зависят от того, насколько оперативно они получают информацию о событиях, происходящих в системе (о изменениях состояния системы) и от детальности информации, от того, насколько наблюдаемы те характеристики системы, которые необходимы для принятия решений. Детальность предоставления информации в большинстве систем, с одной стороны, ограничена долей пропускной способности сети, которая может быть выделена для передачи этой служебной информации. С другой стороны, она ограничена возможностями сетевых устройств по оценке состояния имеющихся у них ресурсов.

### **Механизмы оценки текущего состояния сетевых ресурсов в сетях Ethernet, Infiniband**

Мультиагентные самообучающиеся системы в настоящее время широко применяются для динамического управления распределением сетевых ресурсов в сетях на базе стандартов Ethernet и Infiniband. Они используются для выбора пути передачи пакета (фрейма) данных среди некоторого набора потенциально возможных путей, для распределения буферного пространства, доступного в маршрутизаторе (портах маршрутизатора между потоками данных).

Агент выбирает (формирует, изменяет) путь для передачи очередного пакета на основе информации о состоянии сети (о состоянии группы альтернативных путей передачи для потока данных, к которому относится данный пакет), требований качества сервиса, критичности для рассматриваемого потока данных и оценочных характеристик остальных потоков данных. Лучшие пути выбираются, прежде всего для критичного трафика.

Можно говорить, что оценка пути - это вероятность того, что пакет будет успешно передан по этому пути (не будет отброшен вследствие перегрузки или отказов сетевого



оборудования, физических каналов связи). Соответственно, агенту необходимо получать информацию о состоянии сети, на основе которой он сможет выполнить эту оценку.

В качестве основных критериев для оценки состояния сетевых ресурсов в сетях Ethernet и Infiniband используются уровень заполнения буферов и доступность физических каналов связи. В данной статье мы сконцентрируемся на оценке ресурсов буферного пространства [4, 5].

Для того, чтобы минимизировать накладные расходы на передачу данных о состоянии сети и на выполнение самой оценки критерия заполнения буфера, как правило, оценивается по следующей формуле

$$\begin{aligned} C_b &= 1, \text{ iff } (V_d \geq K_v * V_{\max}) \\ C_b &= 0, \text{ iff } (V_d < K_v * V_{\max}) \end{aligned} \quad (1)$$

Где  $C_b$  – текущее значение критерия заполнения буфера,

$V_d$  – текущее количество данных в буфере,

$V_{\max}$  – максимальный объем буфера,

$K_v$  – коэффициент уровня заполнения,  $K_v \in (0, 1)$

В ряде систем используется более детальная градация, рассматривается несколько уровней заполнения. В этом случае  $C_b$  может принимать более, чем два значения, используется несколько коэффициентов ( $K_{v_i}$ , где  $i$  – номер уровня).

Текущие значения коэффициента(ов)  $K_v$  могут изменяться в процессе обучения. Они определяются на основе связи между уровнем заполнения буфера и вероятностью того, что пакет будет отброшен. В большинстве систем может быть определено значение  $K_v$ , такое, что при  $V_d \geq K_v * V_{\max}$  вероятность отбрасывания пакета начинает быстро возрастать.

Агент оценивает каждый из альтернативных путей передачи данных в соответствии со значениями критериев для транзитных портов коммутаторов/маршрутизаторов. На основе этой оценки и с учетом требований качества сервиса/критичности для системы потока данных, предположений о возможных изменениях характеристик остальных потоков, выбирается путь передачи данных для очередного пакета (фрейма) данных. Для сетей Ethernet и Infiniband лучшим считается путь, на котором уровень загрузки буферов ниже.

### **Предлагаемые механизмы оценки текущего состояния сетевых ресурсов в сетях SpaceFibre**

В сетях на базе стандарта SpaceFibre основными сетевыми ресурсами являются буфера виртуальных каналов и пропускная способность физических каналов. Потенциально для сетей на базе стандарта SpaceFibre могут быть применены критерии оценки состояния сети, которые используются для сетей Ethernet и Infiniband. Но в портах маршрутизаторов SpaceFibre размер буферов на порядок меньше, чем в современных коммутаторах Ethernet и Infiniband. (Это связано с необходимостью жестко ограничивать площадь и энергопотребление кристаллов маршрутизаторов.) Как правило размер одного буфера порта SpaceFibre составляет 256 – 1024 байта (позволяет вместить 1 – 4 фрейма SpaceFibre максимального размера). В ходе функционирования сети большую часть времени такие буферы могут быть (почти) полностью заполнены данными (более, чем на 90 – 95%). При этом ситуации перегрузки, отбрасывания данных может не происходить, поскольку скорость выборки данных из буфера примерно равна скорости поступления данных в буфер. Таким образом, использование для такой сети критерия заполнения  $C_b$  не позволяет различать ситуации, в которых передача данных идет штатно, без необходимости отбрасывания пакетов от ситуаций, в которых выборка данных из буфера остановилась/приостановилась, т.е. произошла перегрузка, могущая повлечь за собой отбрасывание пакетов. Таким образом при использовании этого критерия состояние сети SpaceFibre оказывается не наблюдаемо.



Для решения этой проблемы предлагается использовать другие критерии, ориентированные на оценку скорости продвижения данных через буфер. При выборе критериев необходимо учитывать также техническую возможность реализации их оценки, существующие ограничения по аппаратным затратам.

Для выбора критериев были проанализированы особенности передачи данных через буфера SpaceFibre. Эти особенности определяются небольшими размерами буферов и используемой схемой кредитования. В стандарте SpaceFibre схема кредитования используется для исключения ситуаций переполнения приемного буфера. Приемный буфер отправляет передающему буферу информацию о наличии в нем свободного места – кредиты (FCT). Передающая сторона передает данные в соответствии с количеством имеющихся у нее кредитов. Приемная сторона по мере приема данных и последующей их передачи на следующий уровень, отправляет следующие кредиты. Один кредит соответствует 256 Nchar (байтов данных, концов пакетов или символов - заполнителей). Обозначим этот параметр  $V_c$ .

Вследствие наличия механизма кредитования скорость поступления данных в (очередной) буфер зависит не только от скорости их генерации в источнике, но может зависеть и от скорости их вычитывания из рассматриваемого буфера. Если в буфере есть откредитованное свободное место, то данные будут поступать в буфер со скоростью, с которой их формирует источник (выдает предыдущий буфер). Если в буфере нет откредитованного свободного места, то данные вообще не будут поступать в буфер (ситуация, когда на передающей стороне нет кредитов). При этом в буфере может быть некоторое количество свободного места (меньше 256 Nchar), на которое невозможно выслать кредит, пока его размер не достигнет 256 Nchar.

Обозначим текущее количество данных в буфере –  $V_d$ . Текущее количество свободного места в буфере  $N_f = V_{max} - V_d$ . Текущее количество откредитованного свободного места в буфере ( $N_{fc}$ ) удовлетворяет следующим условиям:

$$N_{fc} \leq N_f \quad (2)$$

$$N_f - N_{fc} \leq V_c \quad (3)$$

Если  $N_{fc} = 0$ , то с точки зрения наблюдателя (агента), расположенного в сетевом узле, к которому относится буфер, скорость поступления данных не наблюдаема. Если количество кредитов, выданное рассматриваемому буферу следующим буфером ( $N_{nc}$ ) равно нулю, то скорость выборки из буфера будет равна 0 при  $V_d > 0$ . (Можно говорить, что потенциально возможная скорость выборки данных не наблюдаема.)

В стандарте Infiniband, в котором тоже для исключения переполнения буфера приёмной стороны используется кредитование, последствия попадания буфера в эти зоны потенциальной ненаблюдаемости сглаживаются за счет того, что выбирается довольно продолжительное по времени окно наблюдения. Продолжительность окна наблюдения (окна, в течении которого вычисляется очередное значение скорости) выбирается таким образом, чтобы оно было существенно (на порядок) больше времени пребывания в зоне ненаблюдаемости при нормальном функционировании сети. При этом фактические (оцениваемые) скорости продвижения данных оказываются близки к потенциально возможным (к скоростям генерации данных источником). Если в сети складывается ситуация, близкая к перегрузке, то продолжительность пребывания в зонах ненаблюдаемости увеличивается. При этом критерий заполнения буфера ( $C_b$ ) достигает значения 1.

В отличие от стандарта Infiniband, соотношение  $V_{max}/V_c$  для SpaceFibre редко превосходит 4, в ряде случаев может быть равно 1 (для Infiniband оно обычно 20 и более). При таком соотношении при нормальной работе (отсутствие перегрузок) в течении 0,25 – 0,5 времени работы буфер может пребывать в зоне ненаблюдаемости. Соответственно, оценка скорости прохождения данных через буфер будет не достоверной. Возможна оценка скорости



прохождения данных через буфер в остальное время, но возможны трудности с его интерпретацией из-за того, что наступления зон ненаблюдаемости по входу и по выходу происходят асинхронно по отношению друг к другу.

Потенциально возможно использование в качестве критерия времени ожидания кредитования (FCT) при наличии данных в буфере. Критерий может быть определен следующим образом:

$$\begin{aligned} Cf &= 1, \text{ iff } ((Tcf \geq Tf) \cap (Vd > 0)) \\ Cf &= 0, \text{ iff } ((Tcf < Tf) \cup (Vd = 0)) \end{aligned} \quad (4)$$

Из-за этих особенностей для стандарта SpaceFibre может быть более целесообразно использовать критерии, связанные с таймаутами, определенными в стандарте. В стандарте определено два типа таймаутов – таймауты приема/передачи Nchar (в пределах одного/каждого пакета) и таймаут арбитража. Таймаут приема/передачи Nchar (Ttr) определяет максимально допустимое время между двумя последовательными приемами/передачами Nchar (или слов, если передача идет группами Nchar) относящимися к одному пакету. (Между пакетами данный таймаут не контролируется.) Таймаут арбитража (Ta) – это максимально допустимое время между моментом времени начала запроса выходного порта и его предоставлением. Срабатывание этих таймаутов является событием, при возникновении которого соответствующий пакет данных отбрасывается, т.е. при возникновении этого события перегрузка уже возникла. Но эти таймауты могут использоваться для потенциальной оценки того, что ситуация близка к перегрузке, использоваться для вычисления значений соответствующих критериев.

Для таймаута приема/передачи критерий может быть сформулирован следующим образом:

$$\begin{aligned} Ctr &= 1, \text{ iff } (Ttrc \geq Ktr * Ttr)[Wtr] \cap F(EP) = 0 \\ Ctr &= 0, \text{ iff } (Ttrc < Ktr * Ttr)[Wtr] \cup F(EP) = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Где Ttrc – текущее значение счетчика таймаута

Ktr – коэффициент,  $Ktr \in (0,1)$

Wtr – количество символов в окне,  $Wtr \geq 1$ .

Для таймаута арбитража критерий может быть сформулирован следующим образом:

$$\begin{aligned} Ca &= 1, \text{ iff } (Tac \geq Ka * Ta)[Wa] \\ Ca &= 0, \text{ iff } (Tac < Ka * Ta)[Wa] \end{aligned} \quad (6)$$

Где Tac – текущее значение счетчика таймаута,

Ka – коэффициент,  $Ka \in (0,1)$ ,

Wa – количество пакетов в окне,  $Wa \geq 1$ .

Если  $Wa = 1$ , оценка делается на основе одного (каждого) пакета.

Потенциально может быть целесообразно учитывать ситуацию по нескольким подряд идущим пакетам. В этом случае Wa может принимать значения больше 1.

Агентами в маршрутизаторах используются критерии вознаграждения, основанные на количестве успешно переданных/отброшенных пакетов в рассматриваемом маршрутизаторе. При отбрасывании пакета формируется отрицательное вознаграждение. При успешной передаче пакета формируется положительное вознаграждение.

Используются следующие стратегии изменения коэффициентов. Для коэффициентов определен некоторый диапазон допустимых значений. Данный диапазон является вложенным в интервал (0,1). Например, может быть задан диапазон [0.1, 0.9]. При получении



отрицательного вознаграждения (каждого) коэффициенты  $K$  уменьшаются (если еще не была достигнута нижняя граница диапазона), при получении некоторого суммарного положительного вознаграждения коэффициенты  $K$  увеличиваются (если еще не была достигнута верхняя граница диапазона).

### Оценка достижимых характеристик

Для оценки и сравнения достижимых характеристик были разработаны имитационные модели сетей с топологиями баньян и древовидными топологиями на SystemC. Данные модели сформированы из узлов, являющихся генераторами и приемниками потоков данных, узлов - маршрутизаторов и узлов - граничных маршрутизаторов. В каждом узле - граничном маршрутизаторе расположен агент, который выбирает один из альтернативных путей передачи данных для каждого пакета данных. В каждом узле - маршрутизаторе расположены агенты, которые выполняют функции оценки состояния буферов и посылают граничным маршрутизаторам информацию о изменениях состояния в соответствии с используемыми критериями оценки состояния.

Были промоделированы следующие схемы принятия решений, разной информации о состоянии сети:

- (1) – агенты в граничных маршрутизаторах выбирают путь передачи случайным образом;
- (2) – агенты в граничных маршрутизаторах выбирают путь передачи на основе критерия  $C_b$
- (3) – агенты в граничных маршрутизаторах выбирают путь передачи на основе критерия  $C_f$
- (4) - агенты в граничных маршрутизаторах выбирают путь передачи на основе критерия  $C_{tr}, C_a$

Были рассмотрены разные размеры буферов виртуальных каналов (256, 512, 1024, 5120). Были рассмотрены разные средние уровни загрузки виртуальных каналов – фактической доли используемой ими пропускной способности (0,3, 0,5, 0,7, 0,8, 0,9).

На рис. 1 – рис. 4 представлены графики зависимости доли отброшенных пакетов от загрузки виртуального канала для разных схем принятия решений, разных способов определения информации о сети

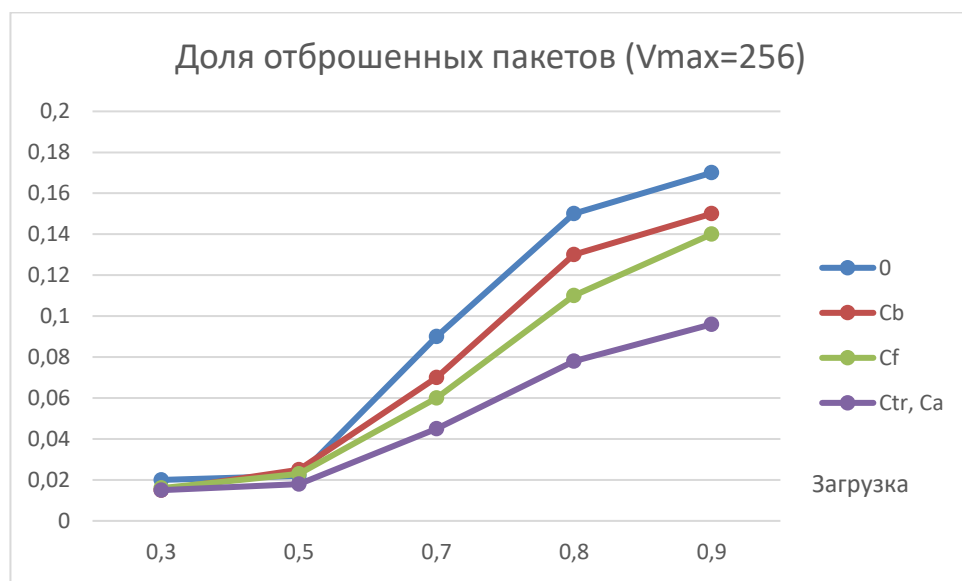


Рис. 1. Доля отброшенных пакетов при размере буфера 256

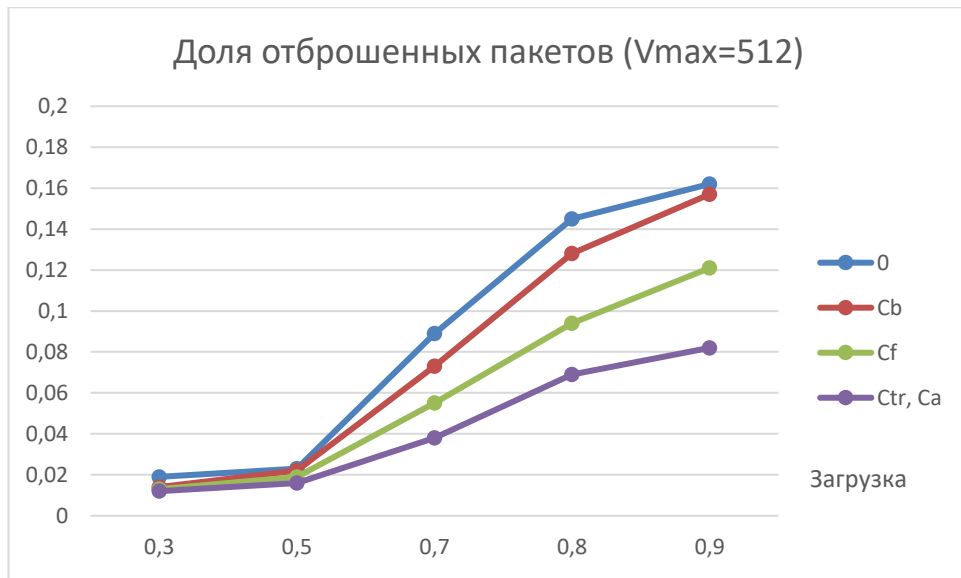


Рис. 2. Доля отброшенных пакетов при размере буфера 512

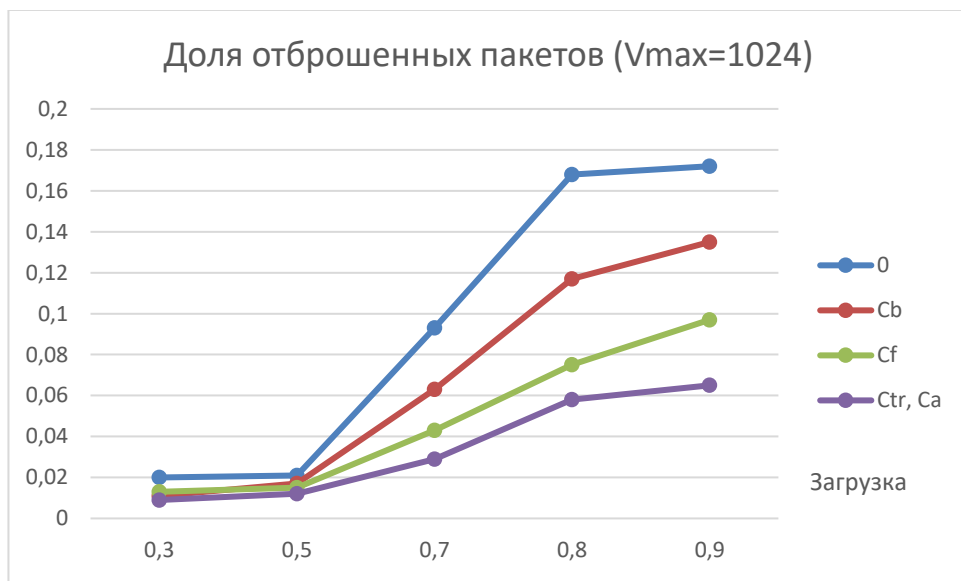


Рис. 3. Доля отброшенных пакетов при размере буфера 1024

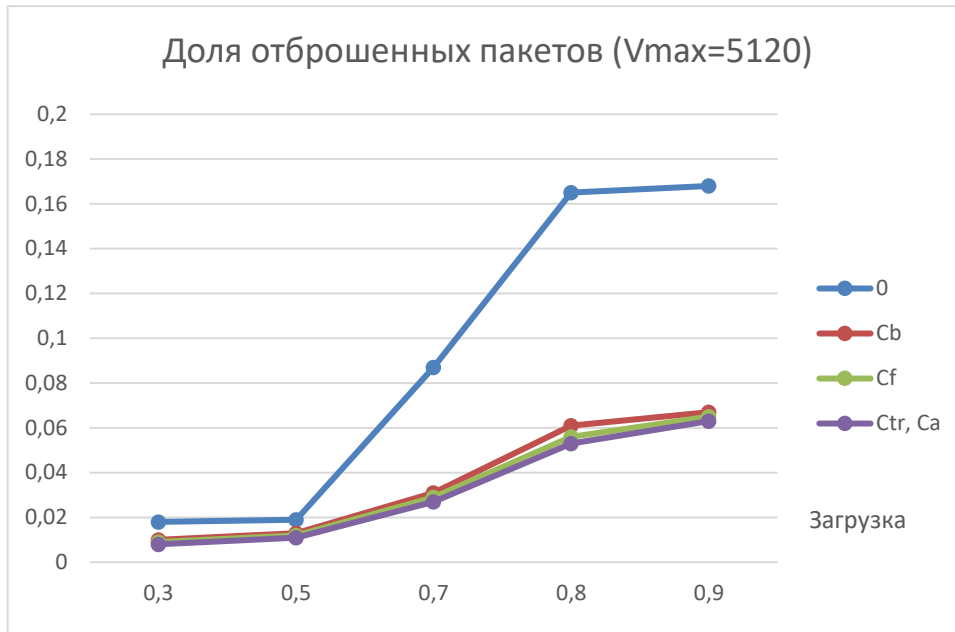


Рис. 4. Доля отброшенных пакетов при размере буфера 5120

При выборе пути случайным образом практически одинаковый результат получился при всех рассмотренных размерах буферов. При небольшой загрузке виртуального канала (0,3 – 0,5) практически одинаковый результат получился для всех рассмотренных схем принятия решений, использовании разной информации о состоянии сети.

При большей загрузке виртуального канала доля отброшенных пакетов существенно зависит от используемой информации о сети при небольших размерах буферов. Для размера буфера 256, 512 при использовании критерия  $C_b$  получается почти тот же самый результат, что и при использовании случайного выбора пути. Таким образом, можно говорить, что для этих размеров буферов данный критерий не несет информации о состоянии сети. При использовании критериев  $C_f$  и ( $C_{tr}$ ,  $C_a$ ) количество отброшенных пакетов оказывается меньше до 1,5 и 2 раз соответственно. Разница увеличивается с увеличением загрузки.

При использовании размера буфера 1024 использование критерия  $C_f$  и ( $C_{tr}$ ,  $C_a$ ) позволяет получить выигрыш в 1,8 и 3 раза соответственно. Использование классического критерия  $C_b$  позволяет получить выигрыш в 1,4 раза.

При использовании буфера 5120 (размер, обеспечивающий соотношение  $V_{\max}/V_c$ , близкое к используемому в Infiniband) результаты для критериев  $C_b$ ,  $C_f$  и ( $C_{tr}$ ,  $C_a$ ) практически совпали. Они в 3 раза лучше, чем при использовании случайного выбора пути. При дальнейшем увеличении размера буфера эта тенденция сохраняется.

Изменения доли отброшенных пакетов в зависимости от размера буфера при загрузке виртуального канала равной 0,9 представлены на рис. 5.

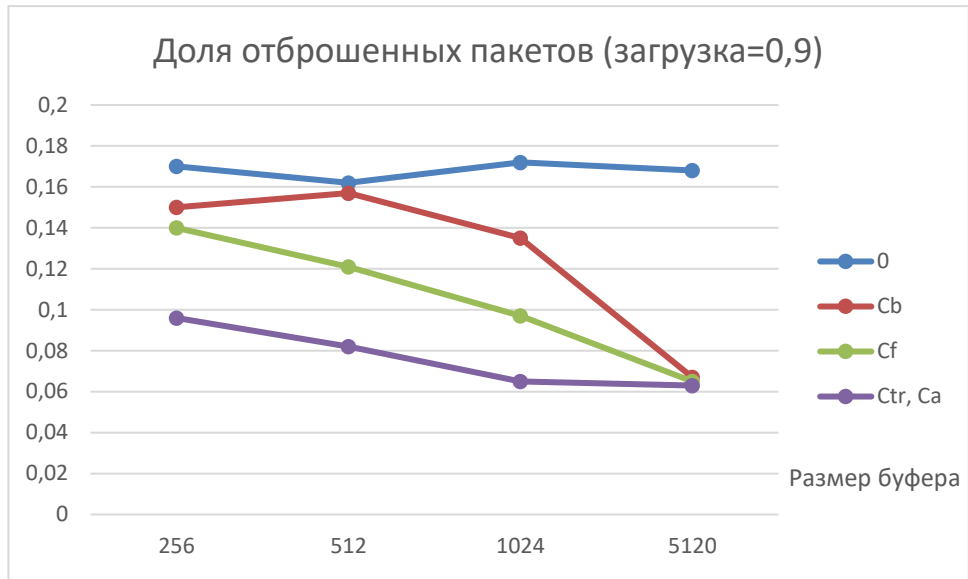


Рис. 5. Доля отброшенных пакетов при загрузке = 0,9

Использование предложенных критериев позволило получить результаты, лучшие, чем использование классического критерия для размеров буферов 256 – 1024. Использование критерия (Ctr, Ca) позволяет получить результат в 2 – 2,3 раза лучший, чем при использовании классического критерия.

### Заключение

В статье рассмотрена проблема оценки текущего состояния буферов виртуальных каналов транзитных маршрутизаторов для выбора путей передачи пакетов среди альтернативных путей. Показано, что в сетях SpaceFibre из-за их специфики – используемой схемы кредитования и малых размеров буферов не целесообразно использовать критерий, применяемый в задачах балансирования загрузки для сетей Ethernet и Infiniband. Предложены критерии для сети SpaceFibre. Показано, что использование предложенного критерия (Ctr, Ca) позволяет получить выигрыш 2 – 2,3 раза по сравнению с использованием классического критерия Cb при размере буферов 256 – 1024.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, "Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга".

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C. – Noordwijk: ESA-ESTEC, 2019. – 233 p.
2. Angel J. Survey on Software Defined Networks: Technical Challenges, Recent Advances and Security Issues / J. Angel, A. Keziah, N. Saritakumar // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2017. – № 5. – P. 1 – 10.
3. Houtan B. Bergstrom A. An Automated Configuration Framework for TSN Networks // 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – Valencia, 2021. – P. 771–778.
4. Shen D., Zhang T., Wang J., Deng Q., Han S., and Hu X. S. QoS guaranteed resource allocation for coexisting embb and urllc traffic in 5g industrial networks // IEEE 28th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and



- Applications (RTCSA). – Taipei, 2022. – P. 81–90.
5. *Song C. H., Khooi X. Z., Joshi R., Choi I., Li J., Chan M. C.* Network load balancing with in-network reordering support for RDMA // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2023 Conference. – New York, 2023. – P. 816–831.
  6. *Qiu Y.* Improving sample efficiency of multi-agent reinforcement learning with non-expert policy for flocking control / Y. Qiu, Y. Jin, L. Yu, J. Wang, Y. Wang, X. Zhang // IEEE Internet of Things Journal. – 2023. – № 10 (14). –P. 14014–14027.
  7. *Lin Q., Gong Z., Wang Q., Li J.* RILNET: A Reinforcement Learning Based Load Balancing Approach for Datacenter Networks // Machine Learning for Networking, First International Conference. – Paris, 2018. – P. 44–55.
  8. *Sharma A.* A Temporal Deep Q Learning for Optimal Load Balancing in Software-Deined Networks / A. Sharma, V. Balasubramanian, J. Kamruzzaman // Sensors – 2024. – № 24 (1216). – P. 1–20.
  9. *Krouka M.* Communication-efficient and federated multiagent reinforcement learning / M. Krouka, A. Elgabli, C. Issaid, M. Bennis // in IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. – 2022. – Vol. 8, № 1. – P. 311–320.
  10. *Jin Y.* Achieving collective welfare in multi-agent reinforcement learning via suggestion sharing / Y. Jin, S. Wei, G. Montana // Machine Learning. – 2025. – № 114. – 27 p.
  11. *Zhang Y., Meng Q., Hu C., Ren F.* Revisiting congestion control for lossless ethernet // 21st USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 24). – California, 2024. – P. 131 - 148.
  12. Deploying HPC Cluster with Mellanox InfiniBand Interconnect Solutions. – California: Mellanox Technologies, 2017. – 40 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### **Суворова Елена Александровна**

Канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А

E-mail: wildcat15@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### **Suvorova Elena Alexandrovna**

PhD. tech. Sciences, associate Professor

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: wildcat15@yandex.ru

Дата поступления: 09.12.2025

Дата принятия: 20.01.2026