

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНТЕРНЕТ-ТРАФИКА В МАГИСТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ

*П. В. Зрелов^а, Вал. В. Иванов^{б, 1}, Вик. В. Иванов^{а, в},
Ю. А. Крюков^г, И. И. Татаринев^д*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б ЗАО МПОТК «Технокомплект», Дубна, Россия

^в Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

^г Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^д АО «Лаборатория Касперского», Москва

Основная цель настоящего исследования состояла в том, чтобы получить ответ на главный вопрос, на который не смогли ответить авторы работы [1], а именно: какому закону подчиняются статистические распределения агрегированных измерений трафика. Нами показано, что при агрегировании измерений трафика формируются распределения, которые, в зависимости от периода наблюдения, с высокой точностью аппроксимируются логнормальным либо суммой двух логнормальных распределений.

The main objective of this study was to get an answer to the main question that was not answered by the authors of the work [1], namely, what law do the statistical distributions of aggregated traffic measurements obey? We have shown that when aggregating traffic measurements distributions are formed which, depending on the observation period, are approximated with high accuracy by a lognormal or a sum of two lognormal distributions.

PACS: 2.50.-r; 05.45.Tr; 07.05.Bx; 89.70.Eg

ВВЕДЕНИЕ

Ранее в работах [2,3] анализировались статистические особенности потоков информации на входном шлюзе локальной сети среднего размера (250–300 компьютеров) университета «Дубна». Было показано, что при агрегировании измерений трафика формируется (начиная с некоторого порогового значения окна агрегирования: в рассматриваемом случае это 1 с) статистическое распределение величины потока, которое не меняет своей формы при дальнейшем росте окна агрегирования (вплоть до 10 с). Также было показано, что указанное распределение с высокой точностью аппроксимируется логнормальным распределением.

Авторами работы [4] проводилось агрегирование измерений трафика и был сделан вывод о том, что «гистограмма байтовой интенсивности соответствует логнормальному распределению». Однако никакого обоснования этого утверждения не было приведено.

¹E-mail: ivanov@jinr.ru

Более того, в указанной гистограмме наблюдается пик в области малых интенсивностей, не согласующийся с логнормальным законом.

В работе [1] исследовались статистические характеристики интернет-трафика в магистральном канале при трех значениях окна агрегирования: 1, 10 и 100 мс. Как отмечали авторы данной работы, полученные ими графики плотностей распределения вероятностей величины интенсивности трафика не удалось аппроксимировать каким-либо из известных распределений.

1. АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТРАФИКА УНИВЕРСИТЕТА «ДУБНА»

1.1. Логнормальное распределение сетевого трафика. Для проведения измерений сетевого трафика на входном шлюзе локальной сети университета «Дубна» была разработана специализированная система (ССАУ «Трафик»), позволявшая проводить в реальном времени мониторинг параметров сетевого трафика, записывать и структурировать в базу данных сведения о переданном объеме информации, включая время приема отдельного пакета, измеренное с точностью 1 мс [5]. В сети университета «Дубна» использовались два протокола: NetBEUI — для внутренних обменов, и TCP/IP — для внешней связи. Вклад NetBEUI-трафика составлял примерно 1–6 пакетов в секунду в течение рабочего дня, что ничтожно мало по сравнению с трафиком TCP/IP. Поэтому влиянием NetBEUI на трафик TCP/IP можно пренебречь.

Зарегистрированные данные сетевого трафика, которые обсуждаются в первой части настоящего раздела, соответствуют приблизительно 20 ч (1 600 000 записей с частотой до 10 кГц, что соответствует промежутку в 1 мкс) измерений. Часть этих данных, отвечающая примерно 1 ч измерений, агрегированных с различными размерами окон агрегации, представлена рис. 1. Имея в наличии данные трафика, измеренные с высокой частотой

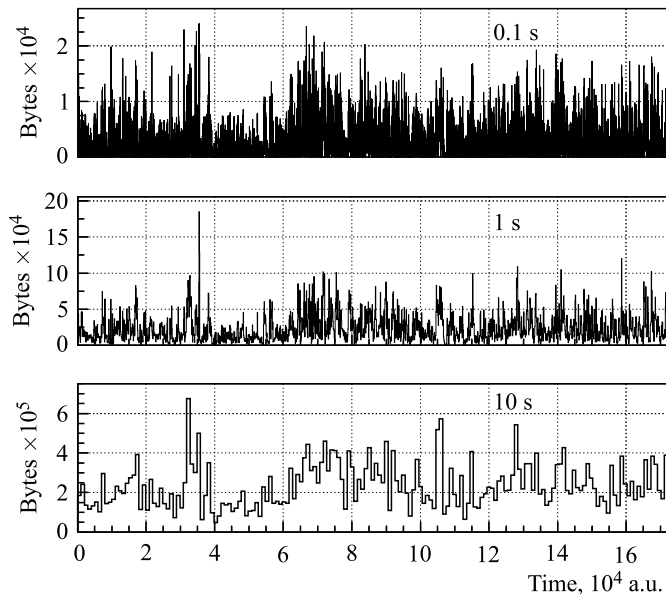


Рис. 1. Измерения информационного трафика, агрегированные с различным окном: 0,1, 1, 10 с

(каждый пришедший пакет регистрировался и записывался в базу данных независимо), можно анализировать влияние процедуры агрегации с разными размерами окна на форму распределения размеров пакетов.

На рис. 2 приведено распределение размеров пакетов необработанных измерений трафика, а на рис. 3, 4 и 5 представлены распределения для тех же измерений, агрегированных с окнами 10 мс, 100 мс и 1 с соответственно.

Видно, что для малых значений величины окна агрегации распределение информационного потока не носит выраженного характера. При приближении величины окна к 1 с (см. рис. 5) распределение приобретает устойчивую форму, которая не меняется при дальнейшем увеличении окна агрегации: см. рис. 6 для окна 10 с.

Распределения, приведенные на рис. 5 и 6, хорошо аппроксимируются функцией плотности логнормального распределения [6]

$$f(x) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x - \mu)^2\right], \quad (1)$$

где x — переменная; σ и μ — параметры распределения и a — нормировочный множитель.

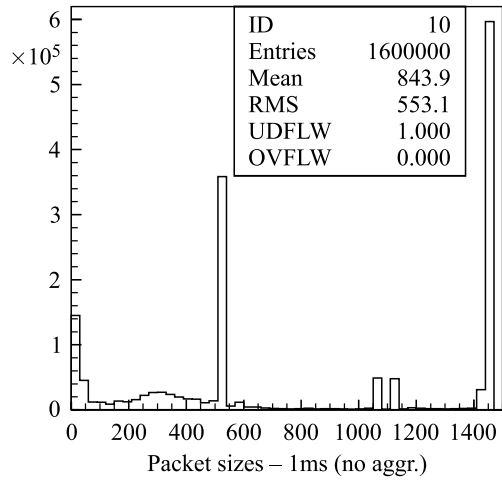


Рис. 2. Распределение размеров пакетов измерений информационного трафика

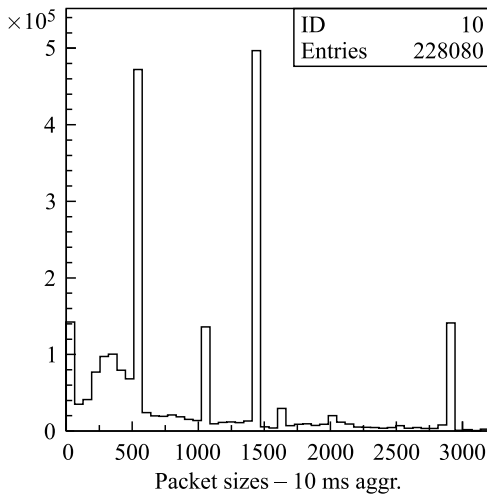


Рис. 3. Распределение размеров пакетов измерений информационного трафика, агрегированных с окном 10 мс

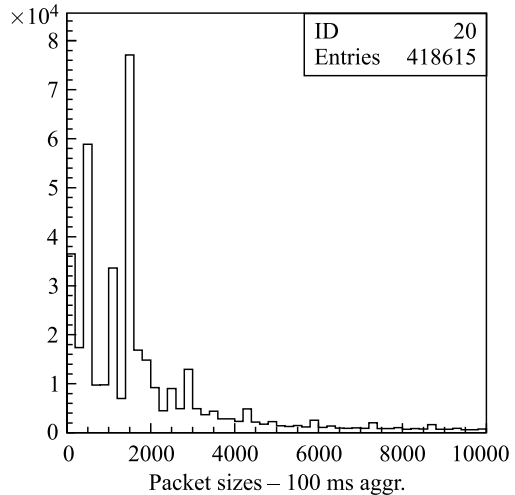


Рис. 4. Распределение размеров пакетов измерений информационного трафика, агрегированных с окном 100 мс

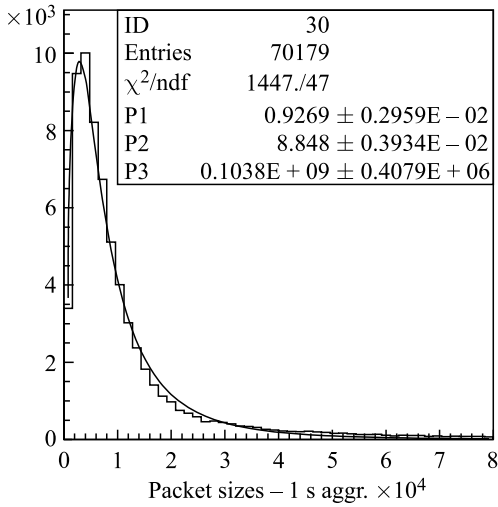


Рис. 5. Распределение размеров пакетов измерений информационного трафика, агрегированных с окном 1 с

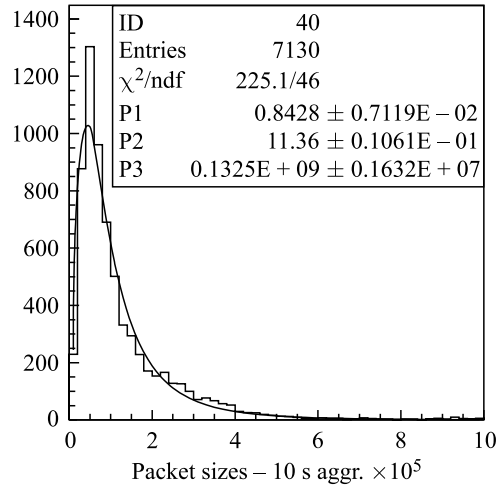


Рис. 6. Распределение размеров пакетов измерений информационного трафика, агрегированных с окном 10 с: аппроксимирующая кривая соответствует функции (1)

Процедура фитирования статистических распределений была реализована с помощью пакета MINUIT [7] в среде широкоизвестного графического пакета PAW (Physics Analysis Workstation) [8]. Пакет MINUIT предназначен для нахождения минимального значения многопараметрической функции и анализа формы функции в окрестности ее минимума.

1.2. Смена режимов функционирования сети. Очевидно, что для продолжительных интервалов времени параметры регистрируемых информационных потоков не могут оставаться неизменными (самый простой пример — это падение сетевой активности в ночное время). Естественно предположить, что в этом случае временной ряд можно разбить на определенное количество интервалов, каждый из которых соответствует своему режиму функционирования.

При этом мы исходим из того предположения, что можно различать стабильные режимы с конкретными параметрами логнормального распределения, а также переходные режимы, когда соответствие определенному логнормальному распределению отсутствует. Все это хорошо проиллюстрировано на примере анализа второго набора данных, охватывающего временной интервал длительностью примерно 32 ч. Временные ряды, отвечающие рассматриваемому набору данных для разных уровней агрегации, представлены на рис. 7, слева. Статистические распределения для соответствующих временных рядов представлены на рис. 7, справа.

В отличие от рассмотренных ранее примеров увеличение уровня агрегации не приводит к формированию распределения, соответствующего единственному логнормальному распределению. Вместо этого наблюдается распределение, представляющее собой сумму разных распределений. Составляющие распределения в согласии с нашей гипотезой должны соответствовать различным режимам функционирования сети. Для того чтобы исследовать эти режимы, необходимо решить задачу их разделения.

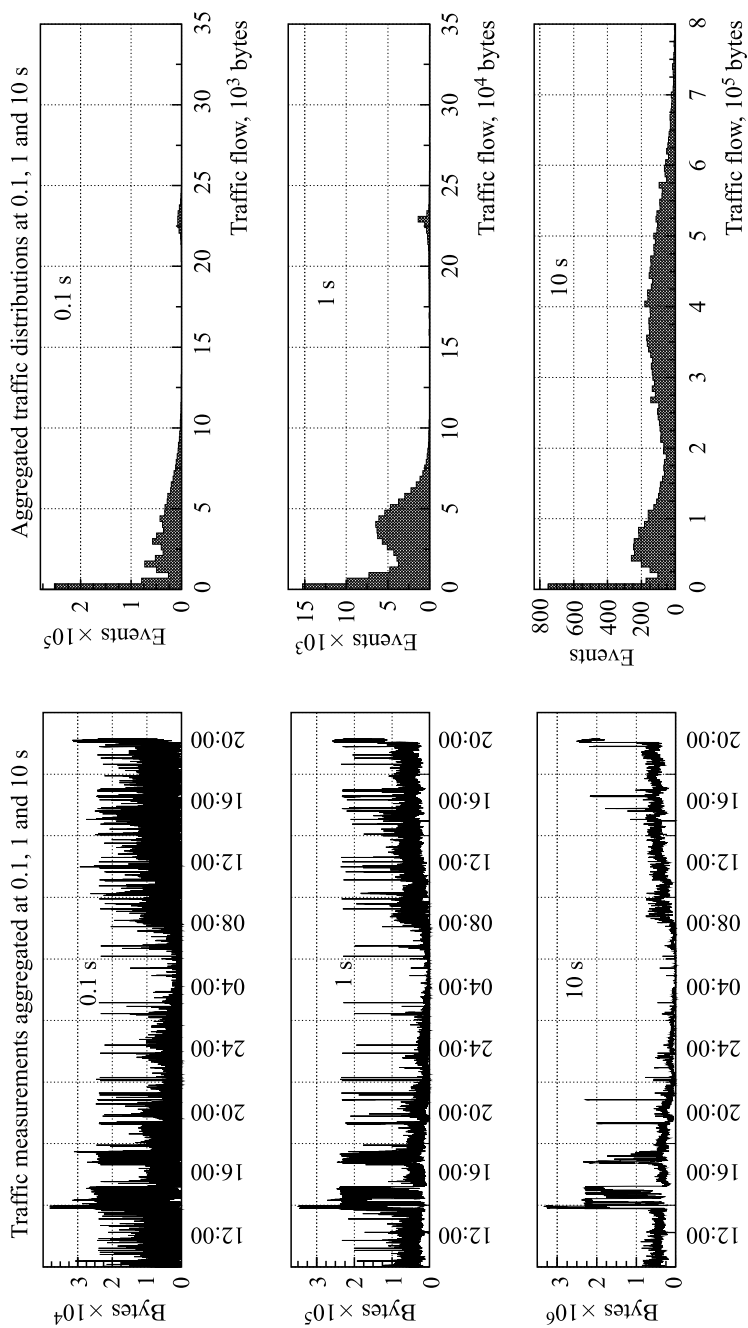


Рис. 7. Слева: агрегированные (при 0,1, 1 и 10 с) временные ряды потока сетевого трафика, $5 \cdot 10^6$ точек, 32 ч (включая дневное и ночное время). Справа: распределения агрегированного потока сетевого трафика при 0,1, 1 и 10 с

Для решения указанной проблемы нами был развит новый подход для определения моментов смены состояния системы на основе принципов иммунокомпьютинга [9]. Его можно рассматривать как расширение алгоритма «отбора от противного» [10]. Предлагаемый алгоритм можно сформулировать следующим образом:

- определяется набор выборок заданного объема n , формируемых из последовательных величин временного ряда;

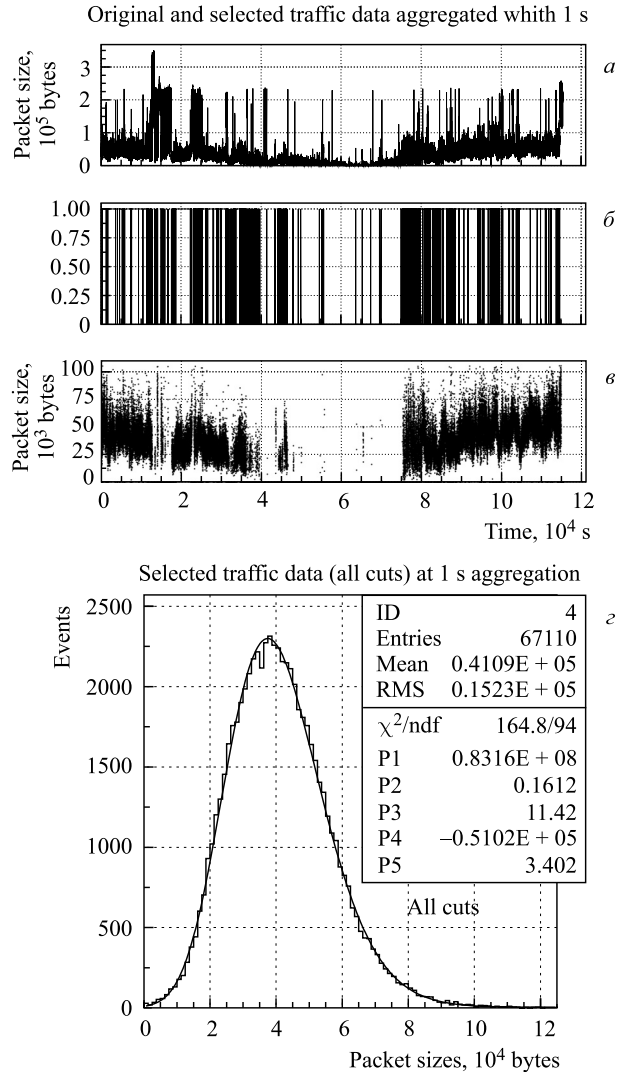


Рис. 8. Агрегированный на уровне 1 с временной ряд трафика (все 32 ч). Моменты структурных изменений — 237 интервалов длительностью более 10 с, 63 интервала длительностью более 1 мин, 25 интервалов — более 5 мин, 6 — более 30 мин и 1 интервал длительностью более 2 ч (что соответствует ночному режиму). «Отфильтрованный» трафик — основное (дневное) состояние общей длительностью 18,5 ч (т. е. 58 % от общего времени измерений)

- строится вектор признаков параметров, характеризующих анализируемый процесс;
- определяется множество «свой» в виде набора векторов, отвечающих основному режиму процесса;
- задается правило соответствия, определяющее отличие «своего» вектора от «чужого».

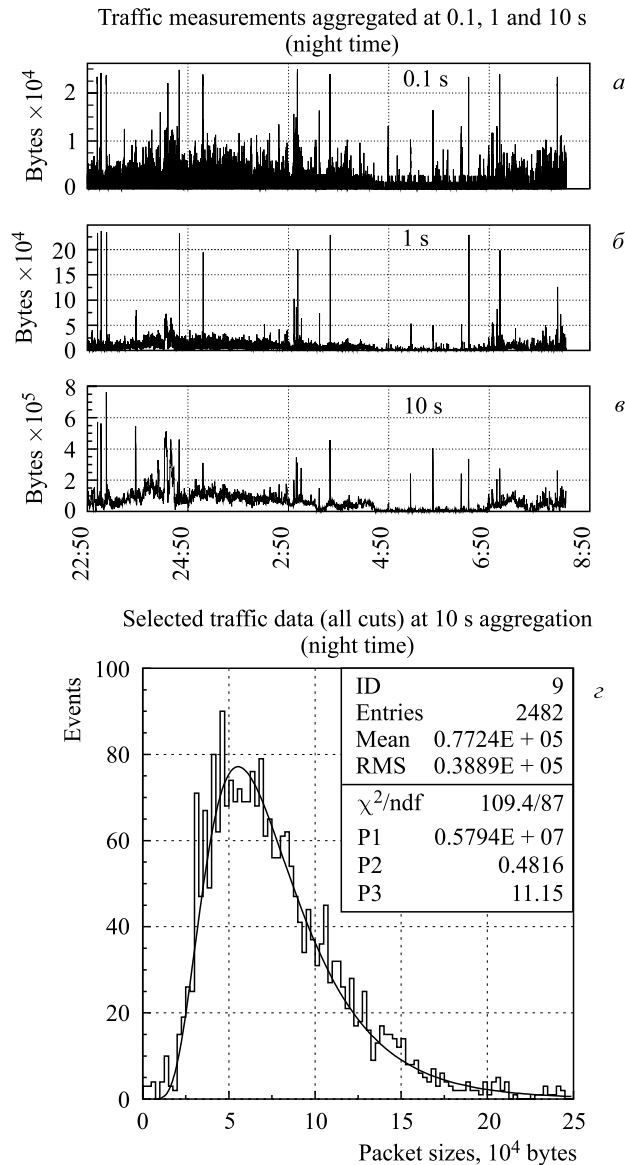


Рис. 9. а-в) Агрегированный (при 0,1, 1 и 10 с) трафик (ночное время). з) Распределение агрегированного на уровне 10 с «ночного» потока трафика

При анализе данных оказалось достаточным использование двумерных векторов, что, в свою очередь, позволило свести задачу к поиску и классификации кластеров на плоскости.

Для анализа использовались два типа векторов и, соответственно, два метода разделения кластеров, применяемых последовательно. В первом методе (методе временных задержек) использовалось двумерное распределение на фазовой плоскости для «задержанных» координат $(x_i, x_{i+\tau})$ с последующей классификацией различных аттракторов как «нормальных (своих)» или «аномальных (чужих)». Во втором методе использовались две величины — среднее и дисперсия скользящей выборки объема $n = 10$, определяющие вектор (μ_j, σ_j) . Так же как в и первом методе, использовалось разделение кластеров на плоскости (μ, σ) на «свои» и «чужие».

На рис. 8 приведены моменты структурных изменений трафика. «Отфильтрованный» трафик, отвечающий основному (дневному) состоянию длительностью 18,5 ч (т. е. 58 % от общего времени измерений) с наложенной фитирующей кривой логнормального распределения, показан на рис. 8, г. Видно, что выделенное состояние следует логнормальному закону.

На рис. 9, а–в представлены временные ряды, отвечающие ночному режиму, для разных уровней агрегации (0,1, 1 и 10 с). На рис. 9, г приведено распределение для потока трафика, агрегированного на уровне 10 с с наложенной фитирующей кривой логнормального распределения. Видно, что рассматриваемое распределение с высокой точностью согласуется с логнормальным законом.

2. АНАЛИЗ ИНТЕРНЕТ-ТРАФИКА В МАГИСТРАЛЬНЫХ КАНАЛАХ

2.1. Анализ самоподобия трафика в высокоскоростных каналах. Авторами работы [4] анализировалось самоподобие информационного трафика в высокоскоростных каналах передачи данных. При этом ими проводилось агрегирование измерений трафика и был сделан вывод о том, что «гистограмма байтовой интенсивности соответствует логнормальному распределению». Однако никакого обоснования данного утверждения в работе не было приведено. Более того, в указанной гистограмме наблюдается пик в области малых интенсивностей, который никак не согласуется с логнормальным законом, (рис. 10, а).

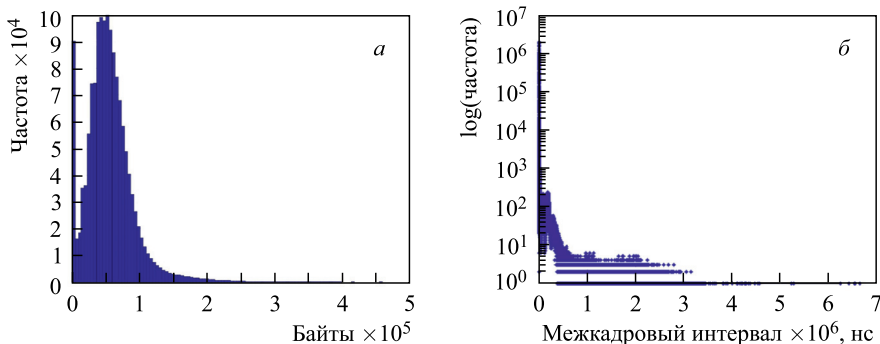


Рис. 10. Гистограммы: а) распределение байтовой интенсивности; б) распределение межкадровых интервалов

2.2. Анализ статистических характеристик интернет-трафика. В работе [1] проводился анализ статистических характеристик интернет-трафика, накопленного в течение 15 мин с магистрального канала одной из крупнейших японских точек обмена трафиком [11]. Измерения трафика анализировались при трех значениях времени агрегирования: 1, 10 и 100 мс. Как отмечали авторы данной работы, полученные ими графики плотностей распределения вероятностей величины интенсивности трафика не удалось аппроксимировать каким-либо из известных распределений.

С целью воспроизведения результатов работы [1] и оценки получаемых в результате агрегирования трафика статистических распределений известными распределениями нами был проведен детальный анализ распределений, полученных в [1]. При этом была найдена и устранена ошибка в программе Wireshark [12] (она использовалась для обработки измерений трафика), не позволявшая проводить обработку данных, отвечающих длительному периоду измерений.

На рис. 11 приведены плотности вероятности распределения (ПВР) размеров переданных пакетов, а на рис. 12 представлены доли данных, переданных пакетами разного размера. Из рис. 11 видно, что заметную долю составляют пакеты размером до 100 байт. В их число могут входить служебные пакеты многих протоколов, ICMP-трафик, DNS-трафик, трафик протоколов реального времени, АСК-пакеты протокола TCP и другие. Также значительную долю составляют пакеты размером свыше 1400 байт, которые в основном генерируются протоколами HTTP, FTP и другими, работающим поверх протокола TCP. При этом из рис. 12 мы видим, что основная часть переданной информации приходится именно на пакеты, имеющие размер свыше 1400 байт.

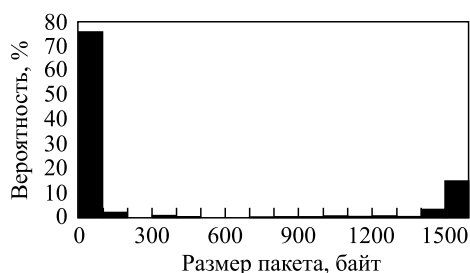


Рис. 11. Плотности вероятности распределения размеров переданных пакетов

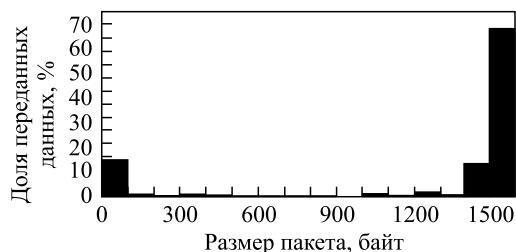


Рис. 12. Доля переданных данных пакетами разного размера

На рис. 13 показана еще одна известная из теории телетрафика характеристика интернет-трафика — ПВР интервалов времени между двумя последовательно поступающими пакетами.

Главная цель работы [1] заключалась в получении и анализе статистических характеристик интернет-трафика при трех значениях времени агрегирования: 1 мс (рис. 14), 10 мс (рис. 15) и 100 мс (рис. 16).

Как отмечали авторы работы [1], при малой величине окна усреднения приведенные на рис. 14–16 распределения обладают так называемым «тяжелым хвостом», что означает спадание «хвоста» распределения не по экспоненциальному, а по степенному закону, т. е. его медленное убывание.

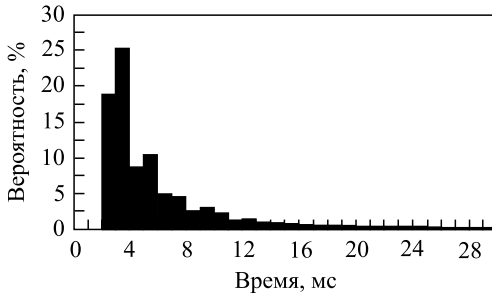


Рис. 13. ПВР интервалов времени между пакетами

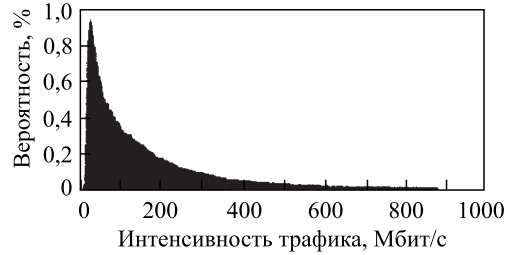


Рис. 14. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 1 мс)

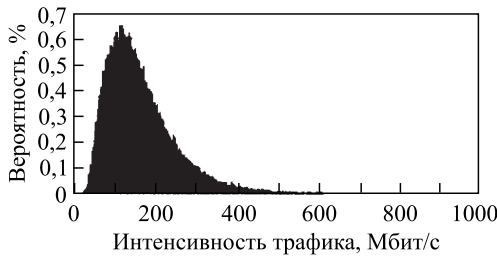


Рис. 15. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 10 мс)

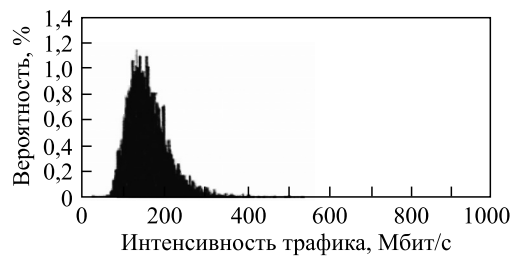


Рис. 16. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 100 мс)

Однако полученные данные плотностей вероятностей распределения величины интенсивности трафика авторам не удалось описать каким-либо из известных статистических распределений.

3. ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРНЕТ-ТРАФИКА В МАГИСТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Как отмечалось выше, на начальном этапе нами были воспроизведены результаты работы [1] и выполнен тщательный анализ полученных статистических распределений. Основная цель данного исследования заключалась в подтверждении известных и поиске новых закономерностей в статистических характеристиках сетевого трафика.

3.1. Анализ сетевого трафика. Из доступных данных (всего 68 108 883 сетевых пакета) нами были выбраны сетевые пакеты с одинаковым MAC-адресом источника (всего 37 802 271 сетевой пакет). Таким образом, при последующем анализе исключалось взаимное влияние данных сетевых пакетов, полученных при параллельной работе сетевого оборудования в дуплекс-режиме.

На рис. 17 и 18 приведены плотности вероятности распределения размеров переданных пакетов, построенные для каналов гистограммирования величиной 100 байт (рис. 17 для сравнения с данными, полученными в работе [1]) и 1 байт (рис. 18) соответственно. Из рис. 17 видно, что большая часть сетевых пакетов сгруппирована в области до 100 байт, меньшая часть имеет размеры, превышающие 1400 байт. На рис. 18 видно, что большая доля сетевых пакетов распределена по небольшому количеству групп, каждой из которых может быть поставлена в соответствие определенная служба или протокол.

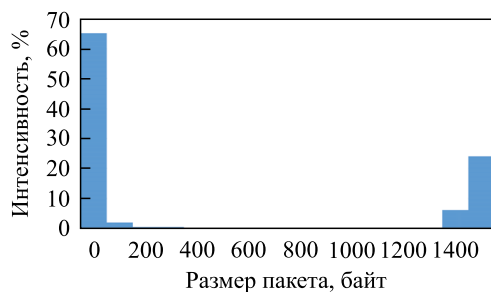


Рис. 17. ПВР размеров передаваемых пакетов (ширина столбца — 100 байт)

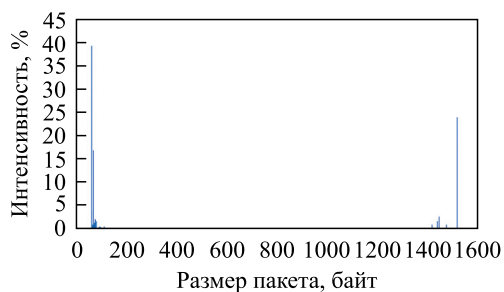


Рис. 18. ПВР размеров передаваемых пакетов (ширина столбца — 1 байт)

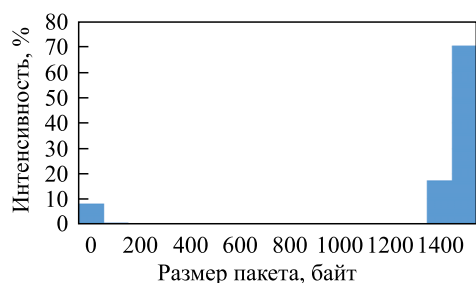


Рис. 19. Доля данных, переданных пакетами разного размера



Рис. 20. Доля данных, переданных пакетами разного размера

На рис. 19 и 20 представлены плотности вероятности распределения доли данных, переданных пакетами разного размера, построенные для каналов гистограммирования величиной 100 байт (рис. 19 для сравнения с данными, полученными в работе [1]) и 1 байт (рис. 20) соответственно.

Из рис. 19 видно, что в отличие от ситуации на рис. 17 большая часть переданных данных приходится на сетевые пакеты размером свыше 1400 байт, что естественно, поскольку основной объем передаваемых данных приходится не на служебные пакеты, а на «полезные» данные.

Рис. 20 так же как и рис. 18, показывает, что большая часть сетевых пакетов распределена по небольшому количеству групп, части из которых может быть поставлена в соответствие определенная служба или протокол.

Анализ приведенных выше результатов показывает, что влияние служебных сетевых пакетов на поведение сетевого трафика является незначительным.

На рис. 21–23 приведены статистические распределения интернет-трафика при трех значениях времени агрегирования.

Полученные нами распределения и зависимости согласуются с результатами, представленными в работе [1].

3.2. Анализ сетевого трафика в области малых интенсивностей. На рис. 7, справа, рис. 10, а, рис. 14–16, рис. 21–23 наблюдаются пики в области низкой интенсивности сетевого трафика (рис. 24).

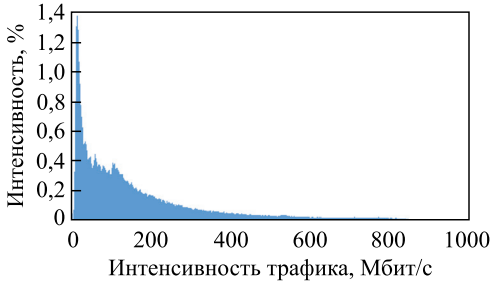


Рис. 21. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 1 мс)

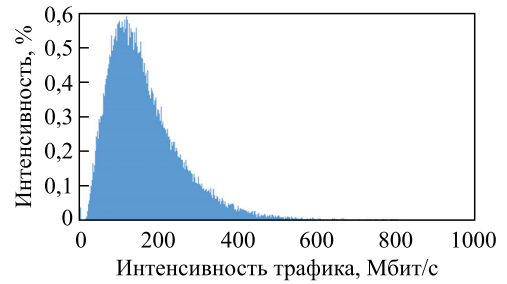


Рис. 22. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 10 мс)

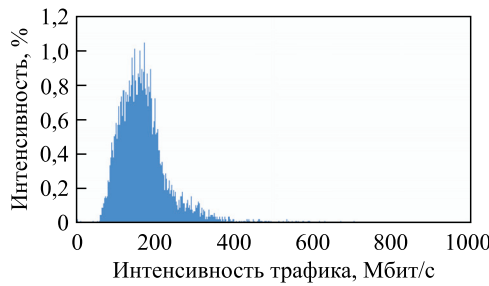


Рис. 23. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 100 мс)

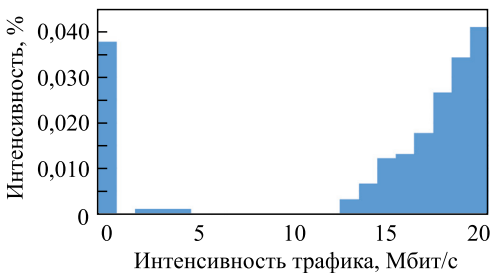


Рис. 24. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 10 мс)

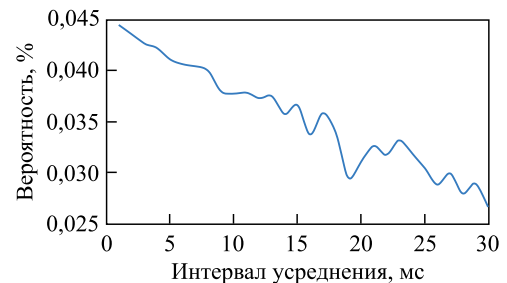


Рис. 25. ПВР при малой интенсивности сетевого трафика

При этом с ростом интервала агрегирования наблюдается уменьшение указанного пика (рис. 25).

Такое поведение трафика обусловлено тем, что сетевые пакеты приходят неравномерно и существуют временные интервалы, на которых сетевые пакеты не приходят вовсе или приходят очень редко (рис. 26). При этом временной вклад таких временных интервалов в итоговое ПВР интенсивности сетевого вклада может быть существенным (рис. 27).

Таким образом, интенсивность сетевого трафика на упомянутых временных интервалах будет стремиться к нулю, что и наблюдается на приведенных выше графиках.

Из рис. 26 видно, что наибольшая доля сетевых пакетов с интервалом времени между получением сетевых пакетов приходится на 1–2 мкс, а вклад каждого последующего ин-

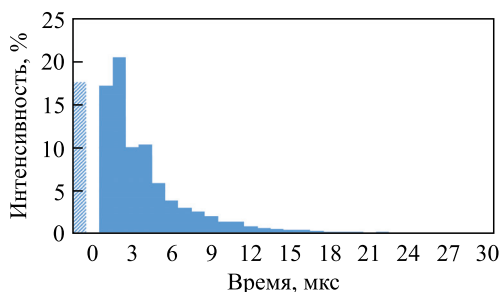


Рис. 26. ПВР интервалов времени между пакетами

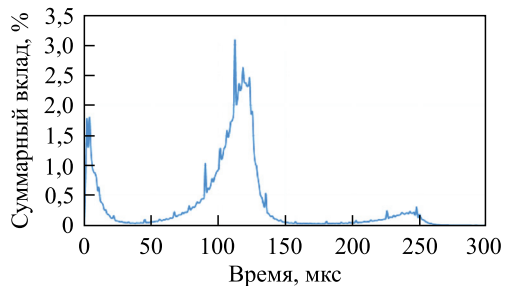


Рис. 27. ПВР вклада времени между пакетами

тервала в общую вероятность распределения интенсивности существенно падает. При этом наблюдается длинный хвост, вклад которого превышает 17% (заштрихованный столбец слева). На рис. 27 мы видим, что наибольший вклад в пик при малой интенсивности сетевого трафика вносят пакеты с временными интервалами между их получением от 80 до 150 мкс.

3.3. Логнормальное распределение сетевого трафика. Авторы статьи [1] отмечали, что агрегированный сетевой трафик магистрального канала обладает высокой дисперсией, степенью самоподобия и характеризуется распределением интенсивности, обладающим «тяжелым хвостом», однако они не смогли сделать никаких предположений относительно возможного закона его распределения.

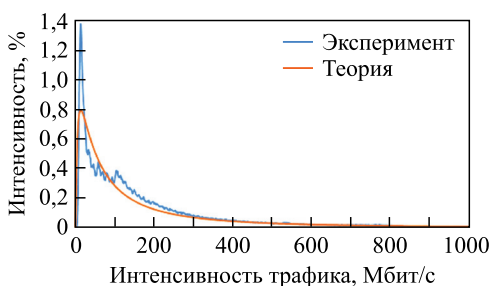


Рис. 28. Фитирование ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 1 мс)

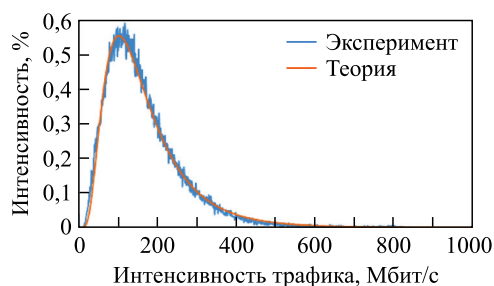


Рис. 29. Фитирование ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 10 мс)

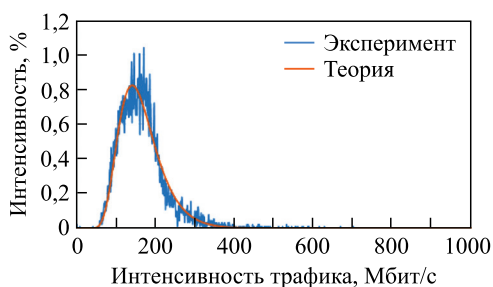


Рис. 30. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 100 мс)

Анализируя поведение распределений, изображенных на рис. 21–23, можно предположить, что так же, как в рассмотренном выше случае [2, 3], указанные распределения описываются одним из вариантов γ -распределения, а именно логнормальным распределением.

Для подтверждения данного предположения нами было проведено фитирование полученных распределений логнормальным распределением (1). Из рис. 28–30 видно, что рассматриваемые данные неплохо (рис. 28) или же с высокой точностью (рис. 29, 30) аппроксимируются логнормальным распределением.

Также были проанализированы ПВР интенсивности сетевых пакетов. В отличие от интенсивности сетевого трафика интенсивность сетевых пакетов не зависит от размера сетевых пакетов, что, в свою очередь, более точно отражает работу сетевого оборудования.

Распределения, представленные на рис. 31–33, так же, как и предыдущие, имели признаки схожести с логнормальным распределением. Фитирование данных распределений логнормальным распределением, приведенное на рис. 31–33, показало, что указанные измерения также с высокой точностью аппроксимируются логнормальным распределением.

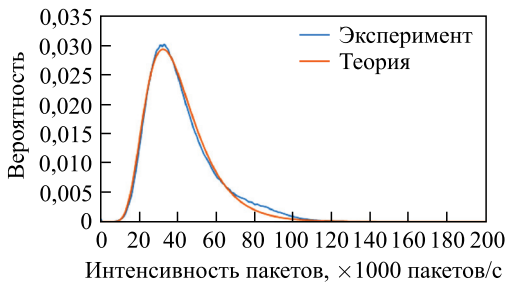


Рис. 31. Фитирование ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 1 мс)

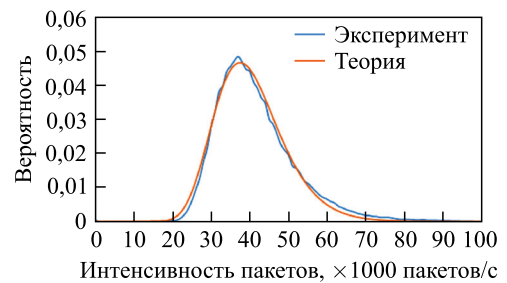


Рис. 32. Фитирование ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 10 мс)

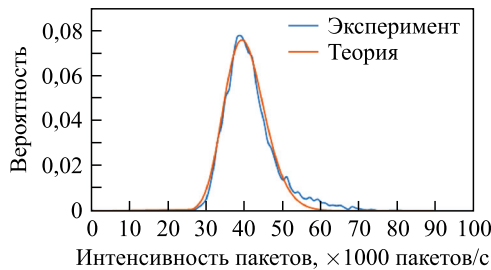


Рис. 33. ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал агрегирования — 100 мс)

3.4. Наблюдение более сложного поведения сетевого трафика. При анализе всех доступных данных, содержащих 68 108 883 сетевых пакета (как полученных с одного MAC-адреса, так и переданных на этот MAC-адрес, т.е. сетевых пакетов, полученных в дуплексном режиме), в ПВР интенсивности сетевого трафика проявился второй пик.

Такое поведение ПВР интенсивности сетевого трафика может быть связано с тем, что анализировались сетевые пакеты одновременно двух режимов работы сетевого оборудова-

ния — передачи и получения сетевых пакетов, которые могут выполняться одновременно (дуплексный режим).

Полученные данные аппроксимировались суммой двух логнормальных распределений, т. е. функцией следующего вида:

$$f(x) = \frac{a_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_1^2}(\ln x - \mu_1)^2\right] + \frac{a_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_2^2}(\ln x - \mu_2)^2\right], \quad (2)$$

где x — переменная; σ_1 , σ_2 и μ_1 , μ_2 — параметры распределений; a_1 и a_2 — нормирующие множители.

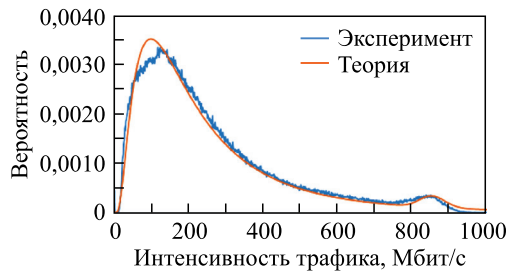


Рис. 34. Фитирование ПВР интенсивности сетевого трафика (интервал усреднения — 1 мс)

Фитирование распределения, приведенного на рис. 34, функцией (2) показывает, что рассматриваемые данные неплохо аппроксимируются суммой двух логнормальных распределений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДЫ

Нами были воспроизведены основные итоги работы [1], выполненной на основании результатов измерений интернет-трафика в магистральном канале, взятых на сайте [11] и обработанных с помощью программы Wireshark [12]. В этой части данного исследования мы посчитали важным получить ответ на главный вопрос, на который не смогли ответить авторы работы [1], а именно, какому закону подчиняются статистические распределения агрегированных измерений трафика.

В результате детального анализа измерений сетевого трафика нами было показано, что, так же как для локальной сети среднего размера, при агрегировании измерений интернет-трафика в магистральном канале формируются статистические распределения, которые с высокой точностью аппроксимируются логнормальным распределением.

Нами также были проанализированы ПВР интенсивности сетевых пакетов, которые в отличие от интенсивности сетевого трафика не зависят от размеров сетевых пакетов, что, в свою очередь, более точно отражает работу сетевого оборудования. Показано, что рассматриваемые распределения также с высокой точностью аппроксимируются логнормальным распределением.

Анализ сетевого трафика при малых интенсивностях показал, что в указанной области может наблюдаться группировка событий (см., например, рис. 10, а), что может быть обусловлено тем, что сетевые пакеты приходят неравномерно и существуют временные

интервалы, на которых они не приходят вовсе или же приходят очень редко (рис. 26). При этом вклад таких событий может быть довольно заметным.

Нами также наблюдается сложное поведение интернет-трафика для сетевых пакетов, полученных в дуплексном режиме. Показано, что данное распределение с приемлемой точностью аппроксимируется суммой двух логнормальных распределений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симаков Д. В., Кучин А. А. Анализ статистических характеристик интернет-трафика в магистральном канале // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9, № 5. С. 31–35.
2. Antoninou I., Ivanov V. V., Ivanov V. V., Zrelov P. V. On the Log-Normal Distribution of Network Traffic // Physica D. 2002. V. 167. P. 72–85.
3. Antoninou I., Ivanov V. V., Ivanov V. V., Zrelov P. V. Statistical Model of Network Traffic // Part. Nucl. 2004. V. 35, No. 4. P. 984–1019.
4. Крюков Ю. А., Чернягин Д. В. Исследование самоподобия трафика высокоскоростного канала передачи пакетных данных // III Междунар. науч. конф. «Современные проблемы информатизации в системах моделирования, программирования и телекоммуникациях», Москва, 2009; <http://econf.rae.ru/article/4819>.
5. Васильев П. М., Иванов В. В., Кореньков В. В., Крюков Ю. А., Куцов С. И. Система сбора, анализа и управления трафиком фрагмента сети ОИЯИ на примере подсети университета «Дубна». Сообщ. ОИЯИ Д11-2001-266. Дубна, 2001.
6. Eadie W. T., Dryard D., James F. E., Roos M., Sadoulet B. Statistical Methods in Experimental Physics. Amsterdam; London: North-Holland Publ. Comp., 1971.
7. James F. MINUIT — Function Minimization and Error Analysis. Reference Manual. Version 94.1. CERN Program Library D506. 1998.
8. Brun R., Couet O., Vandoni C., Zanarini P. PAW — Physics Analysis Workstation. CERN Program Library Q121. 1989.
9. Ivanov V. V., Ivanov V. V., Kryukov Yu. A., Zrelov P. V. Detection of Abrupt Changes in Network Traffic Dynamics: Scientific Report of Laboratory of Information Technologies, 2004–2005 Years. Dubna: JINR, 2005. P. 66–72.
10. Dasgupta D. An Overview of Artificial Immune Systems and Their Applications // Artificial Immune Systems and Their Applications. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. P. 3–21.
11. MAWI Working Group Traffic Archive. <http://mawi.wide.ad.jp/mawi/>.
12. Wireshark. May 2014. <http://www.wireshark.org>.

Получено 21 декабря 2018 г.