

УДК 658.513

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГРУППИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА РОБОТИЗИРОВАННОГО СЕРВИСА

Рябов Д. Б., *Эксперт, ПАО "Вымпелком", Москва, Россия, rdimb@yandex.ru, SPIN 9844-3540*

Назаров А. Н., *доктор технических наук, профессор, МИРЭА - Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия, a.nazarov06@bk.ru, ORCID: 0000-0002-0497-0296*

В настоящий момент технология роботизированной автоматизации процессов (Robotic Process Automation, RPA), позволяющая создавать и использовать «программных роботов» для выполнения рутинных, повторяющихся задач в интерфейсах обычных компьютерных программ в цифровых системах вместо человека является одной из наиболее востребованной технологией автоматизации рабочих процессов в бизнесе и на производстве. Получение методов оценки эффективности работы подобных систем видится крайне актуальной задачей, поскольку скорость и эффективность работы системы роботизированной автоматизации процессов, при обработке и выполнении заложенных программами заданий, влияет как на производительность всей информационной системы в целом, так и на капитальные расходы при планировании этих систем, а в дальнейшем и на операционные затраты при эксплуатации. Качество использования технологии роботизированной автоматизации процессов зависит не только от эффективного написанного программного кода, но и от внешних факторов, таких как влияние сетевой IT инфраструктуры, оборудования пакетной сети, длины линий связи, используемых для решения функциональных задач. В статье рассмотрены методы оценки прохождения трафика систем роботизированной автоматизации процесса в общем мультиплексированном потоке данных через узлы пакетной коммутации. Рассчитаны оценки влияния битовой скорости передачи мультиплексированного потока на сервис RPA. Показаны возможности применения метода геометрической вероятности для оценки временных характеристик прохождения реального битового трафика через узлы пакетной коммутации. Также, описаны вопросы влияния задержек, появляющиеся на стыках сетей с различными NTP серверами. Проанализированы причины появления задержек и предложен метод их оценки.

Ключевые слова: технология роботизированной автоматизации процессов, Robotic process automation (RPA), протокол сетевого времени, Network Time Protocol (NTP), метод геометрической вероятности, протокол передачи гипертекста, HyperText Transfer Protocol (HTTP)

METHODOLOGICAL FEATURES OF GROUPING AND CALCULATING THE TRAFFIC CHARACTERISTICS OF A ROBOTIC SERVICE

Dmitry B. Ryabov, *Expert, PJSC "Vimpelcom" Moscow, Russia, rdimb@yandex.ru*

Alexey N. Nazarov, *Doctor of Technical Sciences, Professor, MIREA - Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia a.nazarov06@bk.ru, ORCID: 0000-0002-0497-0296*

Robotic process automation (RPA), which enables the creation and use of "software robots" to perform routine, repetitive tasks within the interfaces of conventional computer programs in digital systems instead of humans, is currently one of the most sought-after technologies for automating workflows in business and manufacturing. Developing methods for evaluating the performance of such systems is a highly relevant task, as the speed and efficiency of a robotic process automation system in processing and executing program-defined tasks affects both the performance of the entire information system and the capital expenditures involved in planning these systems, as well as the operating costs during operation. The effectiveness of robotic process automation technology depends not only on the efficient use of written software but also on external factors, such as the impact of the IT network infrastructure, packet network equipment, and the length of communication lines used to solve functional problems. This article discusses methods for evaluating the flow of traffic through robotic process automation systems in a common multiplexed data stream through packet switching nodes. Estimates of the impact of the bit rate of the multiplexed stream on the RPA service are calculated. The potential of using the geometric probability method to estimate the timing characteristics of real-world bit traffic passing through packet switching nodes is demonstrated. The impact of delays occurring at network junctions with different NTP servers is also discussed. The causes of delays are analyzed, and a method for their estimation is proposed.

Keywords: Robotic process automation (RPA), Network Time Protocol (NTP), Geometric probability method, HyperText Transfer Protocol (HTTP)

Введение

В настоящий момент RPA роботизация применяется во многих направлениях бизнеса и на производстве для ускорения различных процессов, автоматизация ручного труда, в таких направлениях как финансы и бухгалтерия, управления персоналом, логистика, автодорожное хозяйство, образование, медицина, работа с клиентами и многое другое. Влияние этих систем в последнее время стало настолько велико, что возникла необходимость получения методов оценки эффективности применения этих систем, оценка влияния различных сетевых и прочих факторов на их работу, количества таких систем в зависимости от объема выполняемых работ, централизованное или децентрализованное распределение этих систем в зависимости от зон, где выполняются те или иные работы и пр. факторы.

1. Методы оценки прохождения трафика RPA в мультиплексированном потоке

Для оценки прохождения потока с трафиком RPA можно применить методику, предложенную в публикациях [3, 4]. Для этого необходимо описать процесс изменения скорости передачи k -го сервиса, в данном случае принимаем, что это поток RPA в широкополосной цифровой сети. Соответственно процесс изменения скорости k -го сервиса будет случайным и представляет из себя совокупность функций времени и иметь вероятностный характер. Вероятностными характеристиками могут быть плотности распределения вероятностей случайных величин, являющимися точечными функциями процесса фиксированных моментов времени. Совокупность функций времени, к примеру битовой скорости передачи, для k -го сервиса будет представлять ансамбль, где компонента $b^{(k)}$ есть выборочная функция случайного процесса $b^{(k)}(t)$, относящаяся к конкретной сессии или сеансу. Ее значения в некоторый момент времени t_i будет представлять случайную величину $B_i^{(k)}$.

Для реального трафика за сеанс связи $b_r^{(k)}(t)$ будет характеризоваться неоднократным достижением битовой скорости передачи информации k -го сервиса значений $B_{\max}^{(k)}$ (см. рисунок 1). На рисунке представлены временные отрезки $[t_{o_i}, t_{p_i}]$, где $i = 1 \div n$ соответствует максимальному уровню скорости информационного потока k -го сервиса, где $\forall i = 1 \div n$, то распределение вероятности

$$p_i^{(k)} = k_{\Pi}^{(k)} \frac{t_{p_i} - t_{o_i}}{T_c^{(k)}} \quad (1.1)$$

Где $k_n^{(k)}$ - коэффициент пачечности трафика определяемое соотношением $\frac{B_{\max}^{(k)}}{B_{cp}^{(k)}}$

Среднее время пика $T_c^{(k)}$

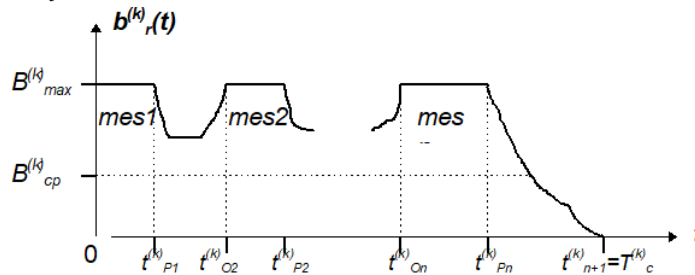


Рис. 1

то получаем следующее соотношение,

$$p^{(k)} = P(b_r^{(k)} = B_{\max}^{(k)}) = \sum_{i=1}^n k_{\Pi}^{(k)} \frac{t_{p_i} - t_{o_i}}{T_c^{(k)}} = k_n^{(k)} \frac{T_p^{(k)}}{T_c^{(k)}}, \quad (1.2)$$

$$T_p^{(k)} = \sum_{i=1}^n (t_{p_i} - t_{o_i}). \quad (1.3)$$

Можно свести к краткосрочному сеансу связи. Перегруппировав временные полуинтервалы $[t_{o_i}, t_{p_i}]$ в начало координат, получив при этом новую функцию $\tilde{b}_r^{(k)}(t)$ (см. рисунок 2).

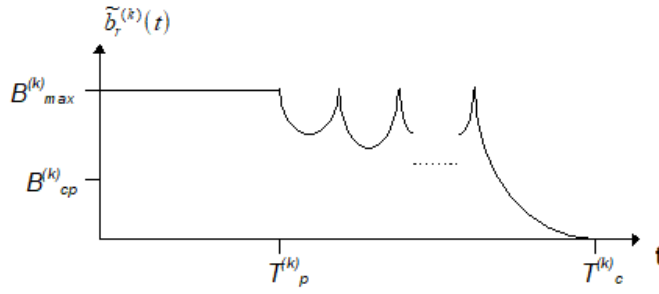


Рис. 2

Функции $b_r^{(k)}(t)$ и $\tilde{b}_r^{(k)}(t)$ интегрально эквивалентны в соответствии по объему переданной на момент t информации k -го сервиса и имеют одинаковое интегральное среднее на одном сеансе связи.

Если рассмотреть случай с многоэкстремальной функцией $b_d^{(k)}(t)$ (см. рисунок 3) с разными значениями локальных экстремумов равным $\left\{B_{\max_i}^{(k)}\right\}_{i=1}^m$ получаем для $\forall i = 1 \div m$

$$\tilde{p}_i^{(k)} = P(b_d^{(k)} = B_{\max_i}^{(k)}, \mu_{ii} \neq 0) = k_{\Pi_i}^{(k)} \frac{t_{p_i} - t_{o_i}}{T_c^{(k)}}, \quad (1.4)$$

где

$$k_{\Pi_i}^{(k)} = \frac{B_{\max_i}^{(k)}}{B_{cp}^{(k)}}, \quad (1.5)$$

μ_{ii} - лебегова мера [5] i -го временного промежутка. Т.е. выражение заключенное в скобки при вероятности P означает, что $b_d^{(k)} = B_{\max_i}^{(k)}$ для некоторого промежутка времени $t \in (t_{o_i}, t_{p_i}]$. Тогда можно записать, что в данном сеансе связи для $B_{\max_{i_1}}^{(k)} = B_{\max_{i_2}}^{(k)} = \dots = B_{\max_{i_s}}^{(k)}$, $i_j \in I$, где $j = 1 \div s$.

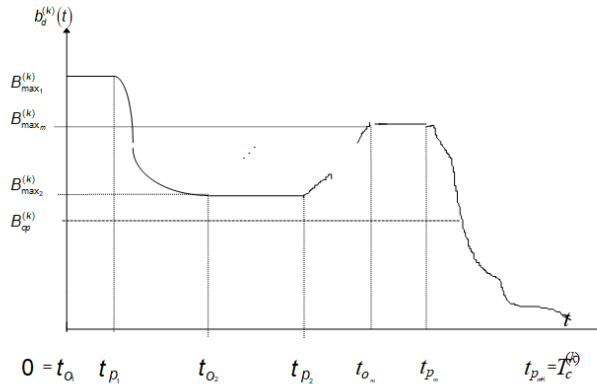


Рис. 3

То, можно записать следующее выражение для плотности вероятности

$$\tilde{p}_i^{(k)} = F(b_d^{(k)} = B_{\max_i}^{(k)}, \mu_{ii} \neq 0) = k_{\Pi_i}^{(k)} \sum_{j=1}^s \frac{t_{p_{ij}} - t_{o_{ij}}}{T_c^{(k)}} = k_{\Pi_i}^{(k)} \frac{T_{p_i}^{(k)}}{T_c^{(k)}}, \quad (1.6)$$

Где

$$T_{p_i}^{(k)} = \sum_{j=1}^s (t_{p_{ij}} - t_{o_{ij}}). \quad (1.7)$$

Для дальнейшего рассмотрения этой функции проведем графическое преобразование в соответствии с понятием геометрической вероятности [7,8], перегруппировав временные полуинтервалы $(t_{o_i}, t_{p_i}]$, $i \in I$ в соответствие с локальными максимумами функции $b_d^{(k)}(t)$ в начало координат с одновременным упорядочением и перенумерацией значений по возрастанию, после чего получим новую "ступенчатую" функцию $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ (рис. 4).

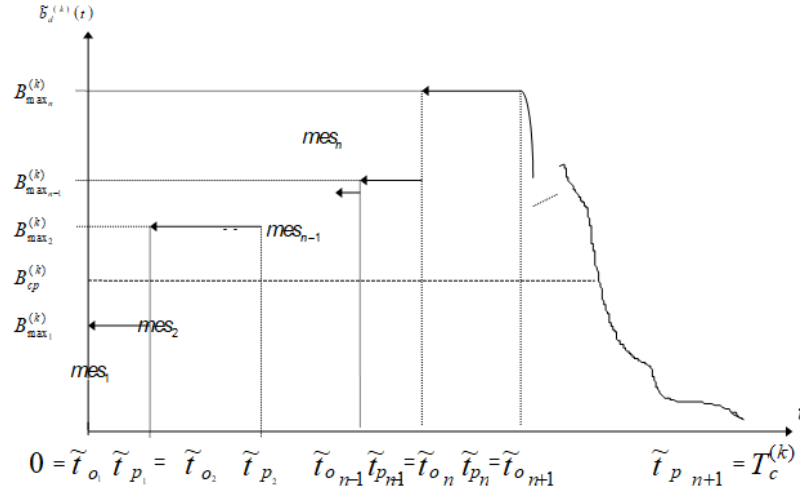


Рис.4

Функции $b_d^{(k)}(t)$ и $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ интегрально эквивалентны и имеют аналогию с функцией $b^{(k)}(t)$ для короткого сеанса связи (рис. 1). Функция $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ имеет число локальных экстремумов $n \leq m$, где m - число локальных экстремумов функции $b_d^{(k)}(t)$, в связи с объединением полуинтервалов $(t_{o_i}, t_{p_i}]$ и $(t_{o_j}, t_{p_j}]$ для $B_{\max_j}^{(k)} = B_{\max_i}^{(k)}$, $i, j \in I$ получаем следующую цепочку равенств для $\forall i = 1 \div n$

$$\begin{aligned} p_i^{(k)} &= F(b_d^{(k)} = B_{\max_i}^{(k)}, \mu_{ti} \neq 0) = F(\tilde{b}_d^{(k)}(\tilde{t}_{p_i} - \tilde{t}_{o_i}) = B_{\max_i}^{(k)}(\tilde{t}_{p_i} - \tilde{t}_{o_i})) = \\ &= F(v^{(k)} = V_{\max_i}^{(k)}) = \frac{B_{\max_i}^{(k)} T_{p_i}^{(k)}}{B_{\text{ср}}^{(k)} T_c^{(k)}} = k_{\Pi_i}^{(k)} \frac{T_{p_i}^{(k)}}{T_c^{(k)}} < 1, \end{aligned} \quad (1.8)$$

где

$$\begin{aligned} T_{p_i}^{(k)} &= \tilde{t}_{p_i} - \tilde{t}_{o_i}, \\ q^{(k)} &= F(\tilde{b}_d^{(k)} \neq B_{\max_i}^{(k)}, \mu_{ti} \neq 0, \forall i = 1 \div n) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^{(k)} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Из графика $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ на рис. 4 следует, что из-за несовместности случайных событий $B_{\max_i}^{(k)}$, $i = 1 \div n$ и значений $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ на отрезке $[\tilde{t}_{o_{n+1}}, \tilde{t}_{p_{n+1}}]$ плотность распределения вероятностей $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ на сеансе связи будет

$$f(\tilde{b}_d^{(k)}) = \sum_{j=1}^n p_j^{(k)} \delta(\tilde{b}_d^{(k)} - B_{\max_j}^{(k)}) + \psi(\tilde{b}_d^{(k)}), \quad (1.10)$$

где $\psi(\tilde{b}_d^{(k)})$ - плотность распределения вероятностей $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ на $\tilde{t} = [\tilde{t}_{o_{n+1}}, \tilde{t}_{p_{n+1}}]$.

Предлагается рассмотреть один из возможных способов построения $\psi(\tilde{b}_d^{(k)})$.

Из приведенных выше выражений получаем выражение плотности вероятности такого вида

$$p_n^{(k)} \frac{B_{\max_n}^{(k)}}{B_{cp}^{(k)}} = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} p_j^{(k)} k_{\Pi_j}^{(k)}, \quad (1.11)$$

где

$$B_{\max_n}^{(k)} = \left[1 - \sum_{j=1}^{n-1} p_j^{(k)} k_{\Pi_j}^{(k)} \right] \frac{B_{cp}^{(k)}}{p_n^{(k)}}. \quad (1.12)$$

Подставляя полученное значение $B_{\max_n}^{(k)}$ в формулу получим плотность распределения вероятностей случайной величины $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ на сеансе связи. Из последнего соотношения следует, что $B_{\max_{n+2}}^{(k)} = 0$, когда выражение в квадратных скобках равно 0. Перегруппируем обратно множество временных интервалов $\left\{ \left[\tilde{t}_{o_i}, \tilde{t}_{p_i} \right] \right\}_{i=1}^{n+1}$ в исходное множество временных интервалов $\left\{ \left[t_{o_i}, t_{p_i} \right], i \in I \right\}$ (см. рис.3) вместе с «переносом» соответствующих значений "ступенчатой" функции $\tilde{b}_d^{(k)}(t)$ и введем переменную времени t и с помощью ступенчатой функции Хевисайда $\Theta(t)$ для общего случая передачи битового трафика k -го сервиса с трафиком изменяющей скорости передачи (ИСП) можно записать процесс «ступенчатой» полипачечной аппроксимации как

$$\tilde{b}_d^{(k)}(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} B_{\max_i}^{(k)} \left[\Theta(t - t_{o_i}) - \Theta(t - t_{p_i}) \right], \quad (1.13)$$

где

$$\Theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0. \end{cases} \quad (1.14)$$

Тогда плотность распределения вероятностей случайного процесса полипачечного битового трафика можно записать так

$$f(\tilde{b}_d^{(k)}(t)) = \sum_{j=1}^{n(t)} p_j^{(k)} \delta(\tilde{b}_d^{(k)}(t) - B_{\max_j}^{(k)}) \left[\Theta(t - t_{o_j}) - \Theta(t - t_{p_j}) \right], \quad (1.15)$$

С помощью этой формулы можно записать плотности распределения вероятностей для любого момента времени сессии из множества возможных $\left\{ \left[0, T_{c_i}^{(k)} \right] \right\}_{i=1}^{\infty}$.

Таким образом, на основе метода полипачечной аппроксимации можно получить метод оценки плотности вероятностей случайного процесса передачи битового пачечного, трафика, что дает возможность получить плотность распределения вероятности для трафика, сформированного потоком RPA внутри общего, группового мультиплексированного трафика как поток k -го сервиса.

На рисунке 5 для в упрощенном виде представлен процесс мультиплексирования различных сервисов в общий групповой тракт ТСП пакета [3]. Трафик RPA это трафик, формируемый текстовым протоколом HTTP [8]. В основном RPA системы устанавливаются на серверах или персональных компьютерах (ПК), поэтому в соответствии с представленной схемой считаем, что RPA система установлена на представленном на схеме сервере и ПК. Т.е. видно, что трафик, генерируемый сервером и ПК, попадает в общий групповой тракт, где происходит мультиплексирование совместно с другими типами трафика, к примеру видеопоток или голосовой поток и уже передается в групповом тракте со скоростью, определенной средой передачи и оборудованием, передающего тракта. Для оценки эффективности мультиплексирования группового трафика удобно воспользоваться формулой, описанной в публикации [3] для момента t отношением суммарного количества виртуальных соединений.

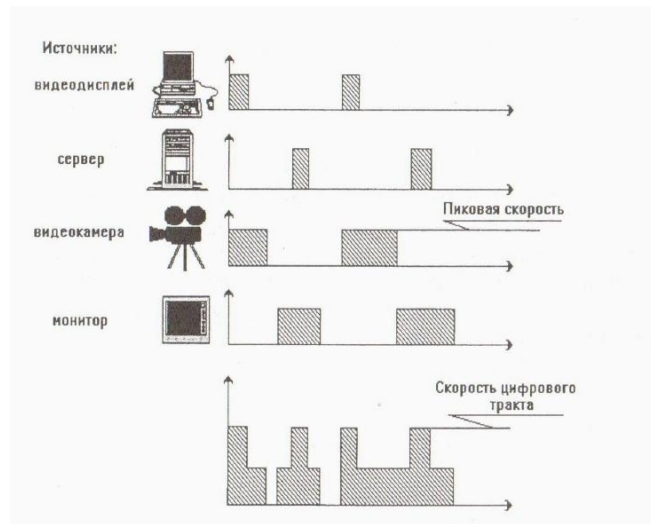


Рис. 5. Процесс мультиплексирования сервисов в групповой поток.2

$$N_{BC_i}(t) = \sum_{k=1}^K N_{BC_i}^{(k)}(t) \quad (1.16)$$

От

$$N_{a\bar{o}_i}(t) = \sum_{k=1}^K N_{a\bar{o}_i}^{(k)}(t) \quad (1.17)$$

Абонентов K -го сервиса i -го узла связи, трафик которых мультиплексируется в соответствии с заданным QoS [14] для каждого сервиса с качеством $P_{PLR}^{(k)} \leq \sum_{k=1}^K P_{PLR}^{(kH)}$, $k=1,2,3,\dots,K$ в групповом тракте пропускной способностью $B_{TP_i}(t)$ к числу каналов $N_{MCKK_i}(t)$ в тракте методом многоскоростной коммутации каналов,

$$G_i(t) = \frac{N_{BC_i}(t)}{N_{MCKK_i}(t)} \quad (1.18)$$

при

$$N_{MCKK_i}(t) = \sum_{k=1}^K N_{MCKK_i}^{(k)}(t) = \frac{B_{TP_i}(t)}{\sum_{k=1}^{K-N^{(k)}} \sum_{s=1}^{MCKK_i(t)} B_{\max}^{(sk)}} \quad (1.19)$$

где $B_{\max}^{(sk)} = \max_{j=1,2,\dots,n(t)} \{B_{\max}^{(sk)}\}$ либо $B_{\max}^{(sk)} = B_{cp}^{(sk)}$, либо $B_{\max}^{(sk)} = B_{\max_{n_s(t)}}^{(sk)}$ в зависимости от системы многоскоростной коммутации каналов.

При одновременной работе $N_{a\bar{o}_i}^{(k)}$ или служб организуется $N_{BC_i}(t)$ виртуальных каналов. Обслуживание этих виртуальных каналов необходима пропускная способность где математическое ожидание скорости передачи для k -го сервиса в момент t для i -го узла связи

$$E[b_{\sum_i}^{(k)}(t)] = \sum_{j=1}^{N_{BC_i}(t)} E[\tilde{b}_{b_d}^{(jk)}(t)], \quad (1.20)$$

Среднеквадратичное отклонение

$$\delta^2[b_{\sum_i}^{(k)}(t)] = D[b_{\sum_i}^{(k)}(t)] = \sum_{j=1}^{N_{BC_i}(t)} D[\tilde{b}_d^{(jk)}(t)] \quad (1.21)$$

Т.е. для функционирования абонентов (служб) в момент t необходимо предоставить пропускную способность группового канала связи:

$$\begin{aligned}
 B_{TP_i}(t) &\cong \sum_{K=1}^K \{E[b_{\sum_i}^{(k)}(t)] + u^{(k)} \delta [b_{\sum_i}^{(k)}(t)]\} = \\
 &= \sum_{K=1}^K \left\{ \sum_{s=1}^{N_{BC_i}^{(K)}(t)} \sum_{j=1}^{n_s(t)} p_j^{(sk)} B_{\max_j}^{(sk)} + \right. \\
 &\quad \left. + u^{(k)} \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{N_{BC_i}^{(K)}(t)} \sum_{j_1=1}^{n_s(t)} \sum_{j_2=1}^{n_s(t)} p_{j_1}^{(sk)} p_{j_2}^{(sk)} (B_{\max_{j_1}}^{(sk)} + B_{\max_{j_2}}^{(sk)})^2} \right\}
 \end{aligned} \tag{1.22}$$

где $u^{(k)}$ коэффициент, зависящий от допустимого уровня потери пакетов для k -го сервиса.

Дополнительно, в случае участков сетей где присутствует сети с коммутацией пакетов необходимо учесть возможные задержки очереди обслуживания поступающих пакетов. Учесть среднее время задержки можно с помощью формулы Поячека-Хинчина [15],

$$T(t) = \frac{pt}{2(1-p)} \left(1 + \frac{\delta^2}{\bar{t}^2}\right) + \bar{t} \tag{1.23}$$

где $p = \bar{a}\bar{t}$, a – интенсивность пакетов,

$\bar{t} = \frac{\bar{L}}{b}$ – среднее время обслуживания пакетов,

δ^2 – дисперсия времени обслуживания,

L – средняя длина пакета (бит),

b – скорость передачи (бит/с).

2. Оценка влияний задержек на длинных линиях из-за синхронизации от разных, региональных эталонных NTP генераторов

В публикации [8] было дано предположение, что в некоторой степени приближения RPA работает в среде IoT и в соответствии, с существующими моделями построения IoT [20] сетей была предложена модель, основанная методе случайных графов, минимально связующего дерева для получения общей длины линии на определенной площади и заданном количестве точек (узлов/сайтов). Этот метод дает возможность оценить время задержки от расстояния. Как было отмечено в [8, 12] задержки на длинах линий до 1000 км можно принять за константу равную 5 мс на 1000 км. На линиях с расстоянием более 1000 км необходимо рассчитывать задержку, в линии в соответствии с предложенной формулой

$$T_{dist} = comst \sum_{n=1}^M l / 1000. \tag{2.1}$$

В этой формуле не учитывается возможное влияние на передачу TCP пакета слипов (проскальзывания) на каналах связи. Это явление возникает в цифровых каналах связи при срыве тактовой синхронизации на стыках сетей, имеющих разные источники синхронизации. Проявляется как удаление или добавление лишних бит в передаваемом потоке данных, что приводит к ошибкам в тракте и повторам передачи TCP пакета, а соответственно к дополнительным задержкам в тракте. Такие явления в основном проявляются в случае длинных линий, поскольку каналы связи могут проходить через разные региональные сети, имеющие свои региональные источники синхронизации [9], у которых может быть разная стабильность ПЭГ или ВЗГ [10].

Дополнительно, на пакетных сетях используется протокол NTP который синхронизирует часы клиентских устройств. При этом сигнал тактовой синхронизации может быть получен из Интернет с применением протокола NTP, что позволяет обеспечить точность синхронизации времени не более 1 мс.

Синхронизация формируется рассылкой NTP пакетов по сети. При этом гарантированная доставка, такая как TCP [21], может сделать доставленный пакет NTP менее надёжным, поскольку повторы передачи увеличивают задержку и другие ошибки (1).

Типовая архитектура серверов NTP синхронизации представлена на рисунке 7 и имеет иерархическое построение и включает 16 уровней (страт) с 1 по 16. Более низкое значение уровня (страты) дает более высокую точность. Часы NTP на уровнях с 1 по 15 находятся в синхронизированном состоянии, часы NTP на уровне 16 не синхронизированы. Каждый последующий уровень получает сигналы синхронизации от предыдущего уровня. Нулевой уровень образуют эталонные источники времени, к которым относятся, например, приемники сигналов

ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система), атомные часы, ПЭГ. На рисунке 6 представлен сравнительный график стабильности источников синхронизации существующих технологий (2).

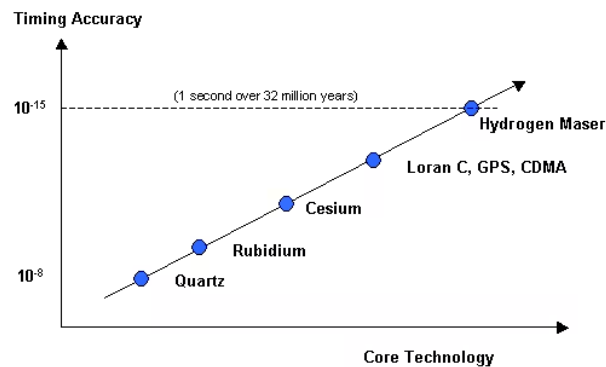


Рис. 6. Сравнительный график стабильности источников синхронизации существующих технологий

Часы NTP на нижележащих уровнях являются ведомыми по отношению к вышестоящим часам NTP (ведущим). Ведомые часы NTP получают сигналы синхронизации от нескольких ведущих часов NTP. Выбор источника синхронизации ведомыми часами NTP осуществляется на основе страты, информация о которой содержится в сообщениях, передаваемых часами NTP [9].

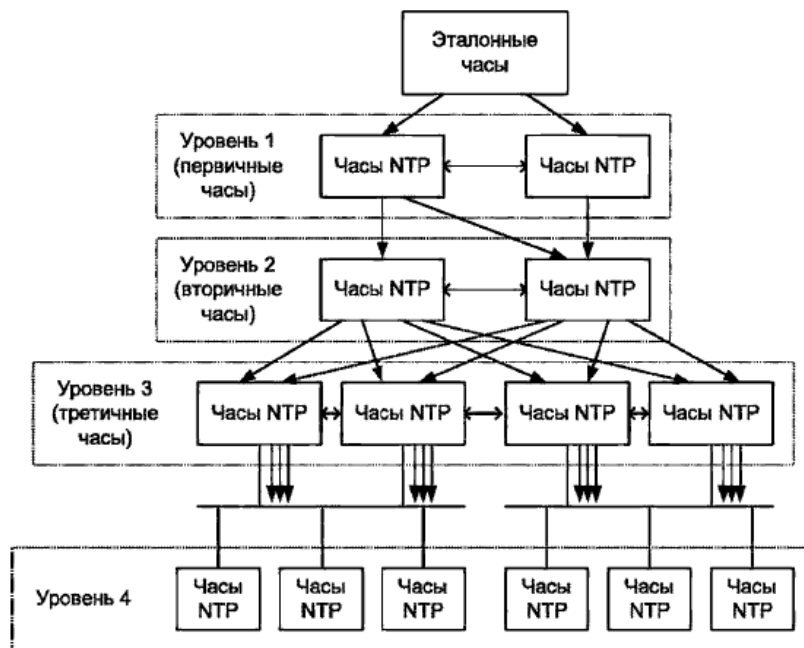


Рис. 7. Типовая архитектура серверов NTP синхронизации

Кроме того, подобная структура может быть распространена на нескольких, самостоятельных (региональных) участках сети, поскольку территории, по которым проходит канал связи может состоять из нескольких временных зон, к примеру канал Москва – Владивосток, 7 временных зон. Точность синхронизации часов на длинных линиях достигается на уровне 10 мс. на дистанции 2000 км (2).

Основной принцип NTP синхронизации заключается в следующем. Клиент NTP отправляет пакет запроса на сервер NTP, и сервер отвечает пакетом ответа, который содержит две временные метки: одна - это время получения пакета запроса (t_2'), а другая - время отправки пакета ответа (t_3'). Что касается клиента, то он знает время отправки пакета запроса (t_1) и время получения пакета ответа (t_4). После того, как клиент получает ответный пакет, он содержит все четыре временные метки и затем можно рассчитать разницу во времени с сервером. Временные метки (t_2') и (t_3') выражаются простым числом, поскольку они основаны на часах сервера, в то время как (t_1) и (t_4) основаны на часах клиента. Разница между часами сервера и часами клиента называется

смещением часов θ . Т.е. это смещение NTP и должен найти. Значение δ_1 это задержка в одну сторону (включая время передачи пакета и задержку распространения) от клиента к серверу и δ_2 задержка в одну сторону от сервера к клиенту. Тогда получаем следующее:

$$\begin{aligned} t_2 &= t_2' - \theta = t_1 + \delta_1 \\ t_4 &= t_3 + \delta_2 = t_3' - \theta + \delta_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

где t_2 и t_3 были бы t_2' и t_3' если бы основывались на часах клиента. Если имеется симметричная односторонняя задержка, то, $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ и получаем следующее:

$$\begin{aligned} t_2' - \theta &= t_1 + \delta \\ t_4 &= t_3' - \theta + \delta \end{aligned} \quad (2.3)$$

На рисунке 8 представлен пример обмена пакетными данными между NTP Сервер - NTP Клиент. И далее:

$$\theta = \frac{(t_2' - t_1) + (t_3' - t_4)}{2} \quad (2.4)$$

Время задержки в оба конца $\delta_1 + \delta_1$ (не включающее врем обработки $t_3' - t_2'$ на сервере) будет следующим:

$$\delta_1 + \delta_1 = (t_4 - t_1) - (t_3' - t_2')$$

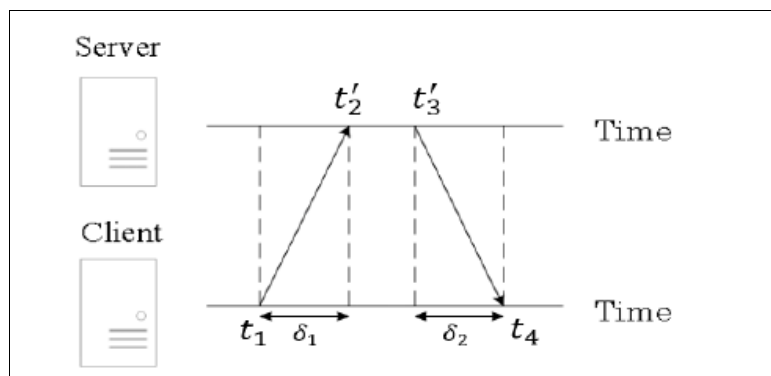


Рис. 8. Пример обмена пакетными данными между NTP Сервер - NTP Клиент

Датой события считается время UTC, при котором событие произошло. Метка времени $T(t)$ представляет дату UTC или смещение от UTC в момент t – время отправки пакета. Для поиска смещение во времени $t-t_0$ можно посредством следующей формулы (1):

$$T(t) = T(t_0) + R(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}D(t_0)(t - t_0)^2 + e \quad (2.5)$$

Где $T(t)$ – смещение во времени, $R(t)$ – смещение по частоте, $D(t)$ – первая производная от $R(t)$, e – стохастическая ошибка. Значение $D(t)$ важно для определения точности задающих генераторов, но это значение обычно опускается для компьютерных тактовых генераторов в LAN сетях. Для удобства $T(t)$ преобразуем ряд Тейлора второго порядка, в интегральный вид получим следующее выражения:

$$T(t) = T(t_0) + \int_{t_0}^t T'(\tau) d\tau \quad (2.6)$$

Через второй интеграл (если будет известна вторая производная) подставим

$$T'(\tau) = T'(t_0) + \int_{t_0}^{\tau} T''(\xi) d\xi \quad (2.7)$$

$$T(t) = T(t_0) + \int_{t_0}^t [T' + \int_{t_0}^{\tau} T''(\xi) d\xi] d\tau \quad (2.8)$$

Раскрыв второй интеграл получим:

$$T(t) = T(t_0) + T'(t_0)(t - t_0) + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{\tau} T''(\xi) d\xi d\tau$$

Если $T''(\xi)$ постоянна $T''(\xi) = D(t_0)$:

$$\int_{t_0}^t \int_{t_0}^{\tau} T''(\xi) d\xi d\tau = D(t_0) \int_{t_0}^t (\tau - t_0) d\tau = \frac{1}{2} D(t_0) (t - t_0)^2$$

То получим изначальную формулу:

$$T(t) = T(t_0) + R(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2} D(t_0)(t - t_0)^2 + e$$

Таким образом можно учесть возможные дополнительные задержки, вносимые за счет смещения времени синхронизации сервера и клиентских устройств.

Заключение

Рассмотрены вопросы влияния скорости передачи на передачу TCP пакета k -го сервиса, по отношению к трафику RPA в общем, мультиплексированном потоке. Для оценки характеристик трафика общего мультиплексированного потока применена методика геометрического вероятностного подхода в качестве наглядного и удобного механизма получения оценки влияния общего трафика на k -сервис.

Применен способ расчета особого отрезка времени в пиковой нагрузке. Предложенная модель может быть применена для оценки эффективности прохождения RPA трафика как k -сервиса в групповых трактах линии передач пакетных сетей.

Подходы, описанные в статье, дают возможность применения принципа статистического мультиплексирования, при оценках эффективности прохождения трафика различных сервисов в групповых трактах линий передачи, а также влияния производительности узлов коммутации, пакетных шлюзов данных, сервисных гейтвеев и пр. на предоставление сервисами различных инфокоммуникационных услуг.

Предложенные математические модели предоставляют инструмент для оценки передаваемой битовой информации и описания битового трафика в условиях априорной структурной неопределенности. Данный подход ориентирован на современную вычислительную технику, а также различных пользовательских приложений и системных сервисов, что дает возможность оценки трафика, в том числе трафика, формируемого системами RPA.

Также в статье рассмотрено влияние на протокол синхронизации NTP пакетных сетей, имеющих стыки в различных временных зонах на длинных линиях связи, в части внесения дополнительных задержек при передаче инфокоммуникационного трафика.

Описаны основные принципы NTP синхронизации и методы расчета задержек при отправке и получении пакета синхронизации.

Рассмотрена формула расчета смещения во времени меток отправки и получения пакета синхронизации, а также возможного влияния TCP пакета на задержку, вносимую при передаче и получении NTP пакета синхронизации.

Список литературы

1. Д.Б.Рябов: Опыт использования технологии RPA для ситуационного мониторинга пула однородных объектов телекоммуникационной инфраструктуры: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах. Воронеж, 2025. С. 256-259.
2. Рябов Дмитрий Борисович, Назаров Алексей Николаевич: Роботизированная автоматизация процессов в среде IoT и облачных кластеров SaaS, PaaS, IaaS и RPAaaS. I-methods. 2026. Т. 18. №1
3. Назаров Алексей Николаевич- Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров АТМ сетей.

М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 256 с.: ил.

4. А. Н. Назаров, Модели трафика служб с битовой скоростью передачи информации в широкополосных цифровых сетях интегрального обслуживания, Автомат. и телемех., 1998, выпуск 9, 52–63
5. Кудрявцев Л. Д. Математический анализ. М.: Высш. шк., 1973. Т. 1.
6. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М.: Физматгиз, 1961.
7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1977.
8. Рябов Д.Б., Назаров А.Н. Методические рекомендации оценки времени реакции технологии RPA в системах Интернета-вещей. Научные технологии в космических исследованиях земли. №5.2026
9. Требования по построению систем синхронизации сетей связи: сетей связи с коммутацией каналов, сетей связи с коммутацией пакетов. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2024
10. Рябов Д.Б., Тамм Ю.А., Припачкин Ю.И., Бух-Винер Н.Ф.: Опыт построения системы тактовой сетевой синхронизации МВОС – Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского и инженерно-технического состава: МТУСИ - 26.02-01.03.2001
11. Ting-Chao Hou, Lin-Hung Liu, Yan-Kai Lan, Yi-Ting Chen and Yuan-Sun Chu. An Improved Network Time Protocol for Industrial Internet of Things. Sensors 2022
12. Смелянский Руслан Николаевич. Введение в сети ЭВМ.: ВМК МГУ, 2013. 190с.:ил.
13. С.М. Никольский. Курс математического анализа, Том 1: Издательство “Наука”. Москва. 1983г. 464с
14. Степанов Сергей Николаевич. Основы телетрафика мультисервисных сетей. –М.:Эко-Трендз, 2010.-392с.:ил
15. Давыдов А.Е., Смирнов П.И., Парамонов А.И. Проектирование телекоммуникационных систем и сетей. –Университет ИТМО 2016.-47с.:ил
- А. Tayab and Y. Li, "The Contribution of the RPA Technology in Enhancing Better Business Performance in Warehouse Management," in IEEE Access, vol. 12, pp. 142419-142426, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3470221.
- В. Ke et al., "Prototype System and Technical Verification of Automatic Optimization of Business Distribution Based on RPA Principle," 2023 International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems (ICIICS), Kalaburagi, India, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICIICS59993.2023.10421688.
16. X. Chen, M. Luo, D. Lin, Y. Zhang and R. Bao, "Design and Implementation of Rpa Tools for Power Service Scenarios for Business Monitoring Automation," 2025 IEEE 3rd International Conference on Electrical, Automation and Computer Engineering (ICEACE), Changchun, China, 2025, pp. 1419-1424, doi: 10.1109/ICEACE67491.2025.11439100.
17. M. M, M. P. R and A. S. C, "A Smart Wearable System for Predictive Cardiac Using IoT, ML and RPA," 2025 International Conference on Emerging Technologies in Electronics and Green Energy (ICETEG), MYSORE, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICETEG66194.2025.11473058.
18. Бушеленков Сергей Николаевич. Разработка моделей и методов организации сетей интернета вещей высокой плотности: «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» СПб 202
19. Transmission Control Protocol [RFC 0793]. Information Sciences Institute University of Southern California 4676 Admiralty Way Marina del Rey, California 90291 1981 p.85
20. Николай Малых. Энциклопедия сетевых протоколов <https://www.protokols.ru/rfc5905/> 13.06.2010
21. Use Best Practices for Network Time Protocol <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/availability/high-availability/19643-ntp.html> 14.03.2024

References

1. D.B.Ryabov: Experience in using rpa technology for situational monitoring of a pool of homogeneous telecommunication infrastructure facilities: XXXI International Scientific and Technical Conference
2. Ryabov Dmitry Borisovich, Nazarov Alexey Nikolaevich: Robotic automation of processes in the environment of IoT and cloud clusters SaaS, PaaS, IaaS and RPAaaS. I-methods. 2026. Vol. 18. No. 1.
3. Nazarov Alexey Nikolaevich- Models and methods for calculating the structural and network parameters of ATM networks. Moscow: Hotline – Telecom, 2002. 256 p.: ill.
4. А. Н. Назаров, Traffic models of bit-rate information transmission services in broadband digital integrated service networks, Automatic. and Telemech., 1998, issue 9, 52-63
5. Kudryavtsev L. D. Mathematical analysis. Moscow: Higher School, 1973. Vol. 1.
6. Gnedenko B. V. Course of probability theory. Moscow: Fizmatgiz, 1961.

7. Gmurman V. E. Probability theory and mathematical statistics. Moscow: Higher School, 1977.
8. Ryabov D.B., Nazarov A.N. Methodological recommendations for estimating the reaction time of RPA technology in Internet of Things systems. HIGH-TECH TECHNOLOGIES IN SPACE EXPLORATION OF THE EARTH. No. 5.10.2026 (accepted for publication)
9. Requirements for the construction of communication network synchronization systems: circuit-switched communication networks, packet-switched communication networks. Federal agency for technical regulation and metrology. 2024
10. Ryabov D.B., Tamm Yu.A., Pripachkin Yu.And, Bukh-Wiener N.F.: Experience in building an MVOS clock network synchronization system – Scientific and Technical conference of faculty and engineering staff: MTUCI - 26.02-01.03.2001
11. Ting-Chao Hou, Lin-Hung Liu, Yan-Kai Lan, Yi-Ting Chen and Yuan-Sun Chu. An Improved Network Time Protocol for Industrial Internet of Things. Sensors 2022
12. Ruslan Nikolaevich Smelyansky. Introduction to computer networks.: VMK MSU, 2013. 190c.:ill.
13. S.M. Nikolsky. Course of Mathematical Analysis, Volume 1: Nauka Publishing House. Moscow. 1983. 464c
14. Stepanov Sergey Nikolaevich. Fundamentals of teletraffics of multiservice networks. –M.:Eco-Trends, 2010.392 pp.:ill.
15. Davydov A.E., Smirnov P.I., Paramonov A.I. Design of telecommunication systems and networks. –ITMO University 2016.47c.:ill.
16. A. Tayab and Y. Li, "The Contribution of the RPA Technology in Enhancing Better Business Performance in Warehouse Management," in IEEE Access, vol. 12, pp. 142419-142426, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3470221.
17. B. Ke et al., "Prototype System and Technical Verification of Automatic Optimization of Business Distribution Based on RPA Principle," 2023 International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems (ICIICS), Kalaburagi, India, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICIICS59993.2023.10421688.
18. X. Chen, M. Luo, D. Lin, Y. Zhang and R. Bao, "Design and Implementation of Rpa Tools for Power Service Scenarios for Business Monitoring Automation," 2025 IEEE 3rd International Conference on Electrical, Automation and Computer Engineering (ICEACE), Changchun, China, 2025, pp. 1419-1424, doi: 10.1109/ICEACE67491.2025.11439100.
19. M. M, M. P. R and A. S. C, "A Smart Wearable System for Predictive Cardiac Using IoT, ML and RPA," 2025 International Conference on Emerging Technologies in Electronics and Green Energy (ICETEG), MYSORE, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICETEG66194.2025.11473058.
20. Bushelenkov Sergey Nikolaevich. DEVELOPMENT OF MODELS AND METHODS FOR ORGANIZING HIGH-DENSITY INTERNET OF THINGS NETWORKS: "St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич" St. Petersburg 2022
21. Transmission Control Protocol [RFC 0793]. Information Sciences Institute University of Southern California 4676 Admiralty Way Marina del Rey, California 90291 1981 p.85
22. Nikolai Malykh. Encyclopedia of Network Protocols <https://www.protokols.ru/rfc5905> / 13.06.2010
23. Use Best Practices for Network Time Protocol <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/availability/high-availability/19643-ntpm.html> 14.03.2024