

УДК 623.611

П.С. ВОРОБЬЕВ

Г.С. ТОЛСТОВ, кандидат технических наук

ГИБРИДНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ И НИЗКОСКОРОСТНЫХ КАНАЛАХ ВОЕННОЙ СВЯЗИ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПЕРЕГРУЗКИ И ПРИОРИТЕТАМИ ОБРАБОТКИ МНОГОПОТОЧНОГО ТРАФИКА

В статье рассматриваются вопросы создания расчетной модели в интересах обоснования рациональной политики управления загрузкой каналов военной связи различной пропускной способности в условиях нестационарных потоков смешанного многопоточного TCP и UDP трафика при реализации различных алгоритмов управления перегрузкой и различных приоритетов обработки трафика. Для высокоскоростных потоков пакетного трафика по протоколам TCP и UDP в магистральных каналах связи разработана жидкостная модель на основе системы дифференциальных уравнений баланса потоков данных, для низкоскоростных потоков в линиях связи конечных абонентов тактического и оперативного уровней управления разработана расчетная модель процесса доставки многопакетных сегментов в иерархической сети передачи данных на основе параллельных конечных марковских цепей.

Ключевые слова: информационный поток; алгоритм предотвращения перегрузки; пропускная способность канала; жидкостная модель; конечная марковская цепь.

Введение

В современных условиях ведения войн и вооруженных конфликтов роль системы связи в управлении группировками войск (сил) на театре военных действий существенно возрастает. Система связи, выполняя задачи обеспечения информационного обмена для всех уровней управления от тактического звена до центральных органов военного управления, должна быстро реагировать на изменения обстановки, совершенствовать способы обеспечения качества связи в высокоскоростных многопоточных магистральных каналах и низкоскоростных каналах конечных пользователей, обеспечивать надежную доставку данных с учетом их приоритетов.

Для моделирования информационных потоков в каналах связи применяют расчетные аналитические модели на основе теории массового обслуживания, марковских процессов [1-6], программы-генераторы сетевого трафика¹, пакетные симуляторы² на основе описания движения отдельных пакетов, однако указанные модели не реализуют механизм «медленного старта» и алгоритмы предотвращения перегрузки, свойственные протоколу TCP. При высоких скоростях информационного потока (более 50-100 Мбит/с) применение таких моделей требует неприемлемо больших затрат вычислительных ресурсов.

Для высокоскоростных информационных потоков более перспективной является жидкостная модель [7-11], которая может быть доработана для учета дискретного характера активности пользователей, вариантов реализации механизма предотвращения перегрузок по протоколу TCP, вариативности параметров пакетов, применяемых приоритетов потоков, различных механизмов управления очередями, установленных ограничений пропускной способности каналов и других особенностей профилей пользователей. Адекватность разработанной модели следует оценить путем сравнения количественных показателей реального и модельного трафика.

¹ Программы Ostinato – <https://ostinato.org/>, Cat Karat – <https://packetbuilder.net/>

² NS-3: Network simulator. NS-3 Tutorial. Release ns-3.30 // NS-3 project. 2019, Aug 21. – <https://www.nsnam.org/docs/release/3.30/tutorial/ns-3-tutorial.pdf>

В сетях передачи данных управляемый трафик по протоколу TCP сосуществует с мультимедиа трафиком по протоколу UDP, который по своей природе нестабилен, не предполагает подтверждений доставки и повторной отправки пакетов, создает дополнительные проблемы для управления качеством связи. В основных версиях протокола TCP для подавления перегрузки используется механизм скользящего окна на стороне источника, который управляется потерей пакетов. Обеспечение необходимого качества связи требует выбора рационального алгоритма управления потерей пакетов и размерами окон передачи данных на стороне источников.

Постановка задачи

В магистральной сети передачи данных на маршрутизатор поступает многопоточный трафик различного приоритета по протоколам TCP и UDP, созданный N источниками. Маршрутизатор осуществляет классификацию – анализирует содержимое полей заголовка пакета и определяет уровень его приоритета (класс) по записи заголовка (маркировке) или по критериям, заданным программным способом маршрутизатору. Пакеты разных классов обслуживаются по различному алгоритму, который предполагает свою политику сброса, передачи пакета, ограничения трафика при превышении заданного порога скорости. Алгоритмы обслуживания очереди в зависимости от класса и передачи пакетов на внешний порт являются основными механизмами обеспечения качества связи QoS. Для обеспечения оптимальной пропускной способности канала на всех маршрутизаторах должна применяться единая программно реализуемая политика назначения и обслуживания классов трафика, использоваться общая маркировка пакетов, без использования сигнализации об установленной политике.

В качестве динамических переменных модели выступают мгновенный и усреднённый по времени размер окна перегрузки W , мгновенное значение длины очереди q и экспоненциально взвешенное скользящее среднее значение длины очереди q^{cp} . Параметром модели является функция сброса пакетов P , определяемая согласно используемому алгоритму управления перегрузкой.

Разные политики обслуживания пакетов реализуются на основе различной вероятности отбрасывания пакетов разных классов на основе их приоритетов. Функция сброса P зависит от установленных пороговых значений величины очереди q_{min} , q_{max} и включает составляющие P_{TO} , P_{TD} , P_{TW} , характеризующие способ информирования источника о потере пакета. Функция P_{TO} определяет потери пакетов вследствие возникновения тайм-аута (Timed Out, TO), когда источник не получает информации о доставке или недоставке пакета. Функция P_{TD} определяет потери пакетов, обнаруживаемые по событию тройного подтверждения одного номера пакета (Triple Duplicate, TD – три подтверждения одного АСК-пакета). Функция P_{TW} определяет сокращение скорости передачи пакетов источником по ограничению окна со стороны приемника.

Для наиболее применяемого алгоритма управления перегрузкой в сети на основе протокола RED (произвольного раннего обнаружения, Random Early Detection,) окно перегрузки на источнике формируется с фазы медленного старта. Далее следует фаза избежания перегрузок на основе алгоритма избежания перегрузок, определяющего потери, характеризуемые случайными функциями потери по тайм-ауту, потери по получению задублированных АСК-пакетов, потери по ограничению окна со стороны приемника (TW). В фазе медленного старта размер окна увеличивается на единицу, а в фазе избежания перегрузок размер окна увеличивается на $1/w$ при получении каждого подтверждения, в случае TD-потери размер окна сокращается вдвое (или в установленное количество раз), а при TO-окно становится равным 1 (или установленному значению), при получении ограничения окна со стороны приемника окно становится равным полученному от приемника ограничению.

Вывод системы уравнений в рамках жидкостной модели информационного потока в высокоскоростных магистральных каналах связи

Процесс передачи информационного высокоскоростного потока в магистральной сети может быть описан стохастическим дифференциальным уравнением (СДУ) Ланжевена [9] первого порядка в виде:

$$\frac{dW(t)}{dt} = a(W) + b(W)\xi(t), \quad (1)$$

где: a и b – детерминированные функции, характеризующие изменение окна перегрузки источника W , а ξ – случайная функция потерь, связанных с потерей пакетов по ТО, TD и TW.

Считая, что потери по ТО, TD и TW взаимно независимы и описываются случайными пуассоновскими процессами N_{TD} , N_{TO} и N_{TW} соответственно, получим стохастическое уравнение для изменения окна перегрузки W :

$$\begin{aligned} dW(t) = & I(W_{sst}(t) - W(t)) \frac{W(t)dt}{T(t)} + I((W(t) - W_{sst}(t))(W_{max} - W(t)) \frac{Adt}{T(t)} - \\ & - I((W_{max} - W(t))(W(t) - C)) \left[\frac{W(t)}{B} dN_{TD}(t) + (W(t) - C) dN_{TO}(t) \right] - \\ & - I(W(t) - W_{TW}(t)) [(W(t) - W_{TW}(t)) dN_{TW}(t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где: $I(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда, $I(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$; A – параметр, характеризующий изменение окна на передающей стороне на шаге подтверждения, $A = 1$ – для алгоритма увеличения окна перегрузки на $1/W$ на шаге подтверждения; B – параметр, характеризующий изменение окна перегрузки при обработке события TD, $B = 2$ – для сокращения окна в два раза по алгоритму обработки TD; C – параметр, характеризующий изменение окна при обработке события ТО, $C = 1$ – для сокращения окна до одного пакета по алгоритму обработки ТО; $W_{sst}(t)$ – пороговое значение окна перегрузки (ssthreshold – Slow Start Threshold), при котором происходит переход от фазы медленного старта к фазе преодоления перегрузки; $W_{TW}(t) \in (W_{TW}^{max}, W_{TW}^{min})$, $W_{TW}(t) = 0$ – случайная функция ограничения окна источника со стороны приемника, событие $W_{TW}(t) \neq 0$ появляется с интенсивностью $\lambda_{TW}(t)$. Вариантом реализации функции может быть ограничение скорости передачи данных маршрутизатором путём отбрасывания лишнего трафика (Traffic Policing).

Время $T(t)$ – время оборота пакетов от источника к маршрутизатору и обратно в виде АСК-пакетов, которое вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} T(t) &= R_{TT} + \frac{q(t)}{G(t)} \text{ при } q(t) > 0; \\ T(t) &= T_b \text{ при } q(t) = 0; \\ G(t) &= G \text{ при } q(t) > G, \end{aligned}$$

где R_{TT} – время на передачу и подтверждение приёма (Round Trip Time, RTT) пакетов без учета ожидания в очереди; $q(t)$ – значение мгновенной длины очереди в момент времени t , $t > 0$; $G(t)$ – интенсивность обслуживания нагрузки.

Для решения СДУ осуществим переход к обыкновенному дифференциальному уравнению (ОДУ) путём усреднения по времени всех членов, входящих в СДУ. Под усреднением по времени будем понимать выражение:

$$E[x(t)] = \frac{1}{t} \int_0^t x(t') dt'. \quad (3)$$

Среднее значение $E[W(t)dN_{TD}(t)]$ будем считать равным $E[W(t)]E[dN_{TD}(t)]$, полагая независимость функций.

Введем представления для усредненных значений приращений случайных функций:

$$E[dN_{TD}(t)] = \lambda_{TD}(t)dt;$$

$$E[dN_{TO}(t)] = \lambda_{TO}(t)dt;$$

$$E[dN_{TW}(t)] = \lambda_{TW}(t)dt,$$

где $\lambda_{TD}(t)$ – интенсивность потерь по получению задублированных АСК-пакетов, $\lambda_{TO}(t)$ – интенсивность потерь по таймауту, $\lambda_{TW}(t)$ – интенсивность потерь по ограничению окна со стороны приемника.

Усредняя по времени, преобразуем уравнение (2) следующим образом:

$$E\left[\frac{dW(t)}{dt}\right] = I(W_{sst}(t) - E[W(t)])\frac{E[W(t)]}{E[T(t)]} + \\ + I\left(\left(E[W(t)] - W_{sst}(t)\right)(W_{max} - E[W(t)])\right)\frac{A}{E[T(t)]} - I\left(\left(W_{max} - W(t)\right)(W(t) - C)\right) \\ \left[\left(\frac{E[W(t)]}{B}\right)\lambda_{TD}(t) + (E[W(t)] - C)\lambda_{TO}(t)\right] - I(E[W(t)] - E[W_{TW}(t)])(E[W(t)] - W_{TW}(t))\lambda_{TW}(t). \quad (4)$$

Интенсивности потери пакетов могут быть определены из предположения их пропорциональности скорости передачи пакетов источником и вероятности сброса пакета для средневзвешенного значения очереди на маршрутизаторе с учетом задержки реакции источника на потерю пакета и состояния очереди маршрутизатора в момент потери пакета:

$$\lambda_{TD}(t) = \frac{E[W(t-R_{TT})]}{E[T(t-R_{TT})]} E[p_{TD}(q^{cp}(t - R_{TT}/2))], \quad (5)$$

$$\lambda_{TO}(t) = \frac{E[W(t-2R_{TT})]}{E[T(t-2R_{TT})]} E[p_{TO}(q^{cp}(t - 1,5R_{TT}))]. \quad (6)$$

Интенсивности сброса пакетов по ограничению окна со стороны приемника определяется из условия пропорциональности скорости поступления пакетов на приемник от N источников и вероятности использования опции ограничения окна источника со стороны приемника в зависимости от свободного места в буфере:

$$\lambda_{TW}(t) = \frac{NW(t)}{T(t)} P_{TW}(Q_{max} - q(t)). \quad (7)$$

Определим приращение средней взвешенной длины очереди:

$$q^{cp}(t_{k+1}) = (1 - w_q)q^{cp}(t_k) + w_q q(t_k), \quad t_k = t_0 + k\delta, \quad (8)$$

где: $q^{cp}(t)$ – экспоненциально взвешенная скользящая средняя длины очереди; $q(t_k)$ – мгновенное значение очереди в момент t_k ; δ – время между поступлениями пакетов в систему; w_q – параметр (весовой коэффициент) экспоненциально взвешенного скользящего среднего, определяемый:

$$w_q = 1 - e^{-1/G}, \quad (9)$$

где: G – скорость передачи данных в канале связи (обслуживания нагрузки при наличии очереди).

Функция $q^{cp}(t)$ в зависимости от мгновенной длины очереди $q(t)$ и весового коэффициента w_q определяется:

$$\frac{dq^{cp}(t)}{dt} = \frac{\ln(1-w_q)}{\delta} q^{cp}(t) - \frac{\ln(1-w_q)}{\delta} q(t), \quad (10)$$

где: $\delta = t_{k+1} - t_k = 1/G$.

Для усредненных значений $q(t)$ и $q^{cp}(t)$:

$$\frac{dE[q^{cp}(t)]}{dt} = \frac{\ln(1-w_q)}{\delta} E[q^{cp}(t)] - \frac{\ln(1-w_q)}{\delta} E[q(t)]. \quad (11)$$

Уравнение для мгновенной длины очереди $q(t)$:

$$\frac{dq(t)}{dt} = -G(t) + I(Q_{max} - q(t)) \frac{Nw(t)}{T(t)} (1 - P_d(q^{cp}(t))), \quad (12)$$

где: P_d – вероятность сброса пакета в соответствии с политикой управления очередью; N – число поступающих в очередь потоков; Q_{max} – емкость буфера.

Для усредненных значений $q(t)$:

$$\frac{dE[q(t)]}{dt} = -E[G(t)] + I(Q_{max} - E[q(t)]) \frac{NE[w(t)]}{E[T(t)]} (1 - E[P_d(q^{cp}(t))]). \quad (13)$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений, характеризующих изменение усредненного значения окна перегрузки на источнике в зависимости от средневзвешенной и мгновенной значений величины очереди на маршрутизаторе, значений потерь и принятой политики управления перегрузкой, будет иметь вид:

$$E \left[\frac{dW(t)}{dt} \right] = I(E[W_{sst}(t)] - E[W(t)]) \frac{E[W(t)]}{E[T(t)]} + I((E[W(t)] - E[W_{sst}(t)])(W_{max} - E[W(t)])) \frac{A}{E[T(t)]} - I((W_{max} - W(t))(W(t) - C)) \left[\left(\frac{E[W(t)]}{B} \right) \frac{E[W(t - R_{TT})]}{E[T(t - R_{TT})]} E \left[p_{TD} \left(q^{cp} \left(t - \frac{R_{TT}}{2} \right) \right) \right] + (E[W(t)] - C) \frac{E[W(t - 2R_{TT})]}{E[T(t - 2R_{TT})]} E \left[p_{To} \left(q^{cp} \left(t - 1,5R_{TT} \right) \right) \right] \right] - I(E[W(t)] - E[W_{TW}(t)])(E[W(t)] - W_{TW}(t)) \frac{NW(t)}{T(t)} P_{TW}(Q_{max} - q(t)), \quad (14)$$

$$\frac{dE[q(t)]}{dt} = -E[G(t)] + I(Q_{max} - E[q(t)]) \frac{NE[w(t)]}{E[T(t)]} (1 - E[P_d(q^{cp}(t))]), \quad (15)$$

$$\frac{dE[q^{cp}(t)]}{dt} = \frac{\ln(1-w_q)}{\delta} E[q^{cp}(t)] - \frac{\ln(1-w_q)}{\delta} E[q(t)]. \quad (16)$$

Начальные условия для системы ОДУ (14-16):

$$W_i(t_{0i}) = 1, q(t_{0i}) = 0.$$

При моделировании потока в сети режимы on/off работы источника можно устанавливать путем задания значения размера «окна данных» $W(t) = 0$ в моменты времени, соответствующие паузам между отправками групп пакетов.

Установленные вероятности сброса пакета для трех вариантов класса обслуживания трафика приведены на рисунке 1. Манипулируя значениями вероятностей сброса пакетов для различных классов трафика (приоритетов), на основе решения системы уравнений модели определяют оптимальный уровень пропускной способности и качества обслуживания канала связи.

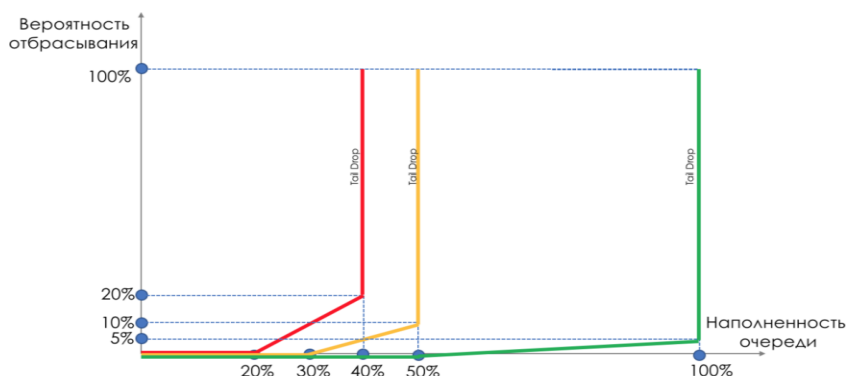


Рисунок 1 – Вероятности сброса пакетов для трех классов обслуживания в зависимости от наполненности очереди

Приведенная жидкостная математическая модель сетевого трафика в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений представляет собой уравнения баланса потоков, входящих в соответствующий узел (маршрутизатор) и выходящих из него: сумма потоков, входящих в данный узел, равна сумме потоков, выходящих из этого узла. При этом учитывается конечность времени распространения сигнала от одного узла сети к другому (запаздывание), а также эффекты обратной связи, присущие протоколу TCP.

Вывод системы уравнений для низкоскоростных каналов связи на основе описания движения отдельных пакетов с использованием параллельной конечной марковской цепи

Для низкоскоростных каналов связи конечных потребителей услуг связи, для которых на шаге по времени R_{TT} (время на передачу и подтверждение приема пакета) осуществляется передача менее двух пакетов, жидкостная модель не применима. Для моделирования таких каналов связи, имеющих в случае военных сетей связи многоуровневую иерархическую структуру, следует применять расчетную модель на основе описания движения отдельных пакетов с использованием параллельной конечной марковской цепи процесса доставки многопакетных сегментов в иерархической сети передачи данных.

Иерархическая сеть передачи данных включает совокупность базовых подсетей, каждый из которых включает звенья управления вышестоящего уровня иерархии и смежные подчиненные звенья управления нижележащего уровня. Модель такого базового элемента сети рассмотрена для случая передачи сообщения из заданного количества и величины пакетов станцией вышестоящего уровня управления и приема этих пакетов смежными с ней принимающими станциями нижестоящего уровня. Принято, что доведение сообщений в каждой базовой подсети на всех уровнях иерархии осуществляется независимо и параллельно. Качество каналов в базовой подсети по вероятности ошибки на бит сообщения одинаково для уровня иерархии. На каждом уровне реализуется доставка сообщений до потребителей. Общее время доставки разбивается на независимые этапы по уровням иерархии, на каждом этапе имеется своя канальная скорость передачи данных и свой уровень потерь. Требуемая вероятность доставки сообщения P_{tr} задается для всей сети из расчета доставки сообщения до звеньев управления нижнего уровня иерархии.

В рамках разработанной модели реализована трехуровневая топология сети передачи данных – радиально-узловая структура без рокадных связей, пример которой приведен на рисунке 2. Информационный обмен между звеньями осуществляется по протоколу TCP и UDP, реализована двунаправленная передача сообщений. Сегмент из N сообщений доводится последовательно от звеньев управления верхнего уровня до звеньев нижнего уровня (возможен расчет до тысяч звеньев управления с использованием вычислительных мощностей персонального компьютера), одновременно идет встречное дуплексное движение квитанций подтверждения. Характеристики сети (надежность, пропускная способность, коэффициент потерь, длина физического канала) для каждого уровня управления задаются независимо, для всех звеньев управления и линий связи в пределах одного уровня характеристики одинаковы.

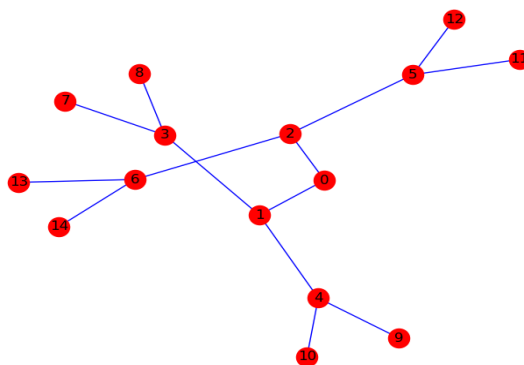


Рисунок 2 – Пример трехуровневой радиально-узловой топологии сети передачи данных

Сформирована расчетная модель на основе параллельной конечной марковской цепи процесса доставки многопакетных сегментов в иерархической сети передачи данных. Расчетным путем определяются вероятностно-временные характеристики (ВВХ) – время доведения сегмента пакетов с заданной вероятностью и вероятностные характеристики (ВХ) – математическое ожидание времени доставки, дисперсия (среднеквадратичные отклонения – СКО) времени доставки сегментов. ВВХ доведения сообщений рассчитывается на основе решения уравнения Колмогорова-Чепмена (УКЧ), а ВХ – на основе фундаментальной матрицы.

Изменение во времени характеристик конечной марковской цепи описывается уравнением Колмогорова-Чепмена (УКЧ):

$$P_{S(n)}^{(k)} = P_{S(n)}^{(0)} P_{[n,n]}^k = P_{S(n)}^{(k-1)} P_{[n,n]}, \quad (17)$$

где: $P_{S(n)}^{(0)} = (P_{S_1}^{(0)}, P_{S_2}^{(0)}, \dots, P_{S_n}^{(0)})$ – вектор вероятностей состояния цепи на нулевом шаге;

$P_{S(n)}^{(k-1)}, P_{S(n)}^{(k)}$ – вектор вероятностей состояния цепи на $(k-1)$ -м и k -м шаге;

$P_{[n,n]}$ – матрица переходных вероятностей.

Временные характеристики конечной марковской цепи – среднее время перехода и дисперсия времени перехода – находятся из фундаментальной матрицы $Q_{[n-r,n-r]}$, которая формируется из матрицы переходов.

Фундаментальная матрица равна:

$$Q_{[n-r,n-r]} = (I_i - Q)^{-1}, \quad (18)$$

где: I_i – единичная матрица размером $(n-r) \times (n-r)$.

Математическое ожидание числа шагов $M(L)$, затрачиваемое процессом для перехода из L -го состояния в поглощающее, равно сумме элементов L -й строки матрицы (18). Переход к реальному времени осуществляется умножением среднего числа шагов на длительность шага:

$$M(t) = M(L)T_{ш}. \quad (19)$$

Дисперсия числа шагов находится по дисперсионной матрице, получаемой по выражению:

$$N_{D[n-r,n-r]} = N_{[n-r,n-r]}(2N_{dg[n-r,n-r]} - I_i) - N_{sq[n-r,n-r]}, \quad (20)$$

где: $N_{dg[n-r,n-r]}$ – матрица, полученная из фундаментальной путем замены всех элементов нулями, кроме элементов главной диагонали; $N_{sq[n-r,n-r]}$ – матрица, полученная из фундаментальной путем возведения каждого ее элемента в квадрат.

Дисперсия числа шагов $D(L)$, затрачиваемых процессом для перехода из L -го состояния в поглощающее, равно сумме элементов L -й строки матрицы (20). Переход к реальному времени осуществляется по формуле:

$$D(t) = D(L)T_{ш}^2. \quad (21)$$

Определяется матрица шагов переходов (МШП):

$$T_{ij} = Dl_{ij}/V_{пи}, \quad (22)$$

где: Dl_{ij} – длина передаваемого сообщения в битах при переходе процесса из i -го состояния в j -е; $V_{пи}$ – скорость передачи информации (бит/с).

Переход к реальному времени событий осуществлен на основе осреднения шагов переходов по состояниям системы и шагам решения УКЧ. Матрица вероятностей перехода реализована как стационарная, возможен учет нестационарного состояния системы в процессе передачи сегмента. Задержки и потери пакетов при обработке сообщений на аппаратных средствах звеньев управления рассчитываются отдельно и полученные значения добавляются в расчетную модель системы передачи данных (СПД).

В рамках разработанной модели решаются следующие задачи:

нахождение ВВХ и ВХ доведения сообщений в СПД заданной иерархической структуры с известным стеком протоколов и заданными параметрами характеристики сети (топология, надежность, пропускная способность, коэффициент потерь, длина физического канала) для каждого уровня управления;

обоснование скорости передачи в каналах СПД заданной структуры и известным стеком протоколов, обеспечивающей доведение сообщений с заданными ВВХ и ВХ;

оптимизация параметров стека протоколов транспортной сети СПД при сохранении качества информационного обмена пользователей сети;

определение динамики получения пакетов по уровням управления на шаге решения УКЧ и в реальном времени (для определения оперативности информационного обмена, изменения математического ожидания количества полученных пакетов и СКО по времени).

Пример расчета времени доведения пакетов при заданной вероятности доведения, заданных значениях вероятности ошибок в сети по уровням управления, длине пакета, длине квитанции, коэффициентах готовности каналов связи, скоростей передачи сообщений, таймера повтора сообщений, протяженностей каналов связи приведен на рисунке 3.

Пример расчета динамики доведения пакетов до адресатов на уровне управления приведен на рисунке 4.

Изменение математического ожидания и среднеквадратичного отклонения времени доведения пакетов до адресатов в зависимости от размеров пакетов приведено на рисунке 5.

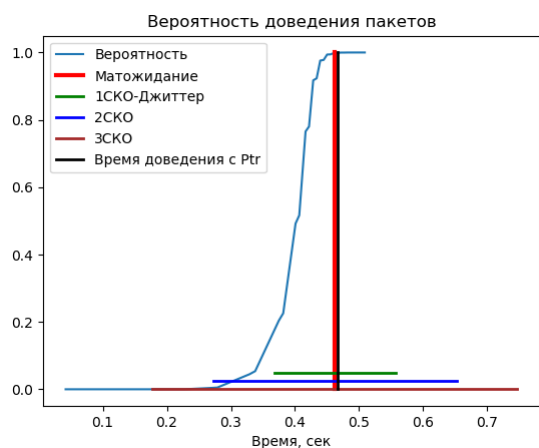


Рисунок 3 – Расчет времени доведения пакетов, значения джиттера, при заданной вероятности доведения пакета до адресата

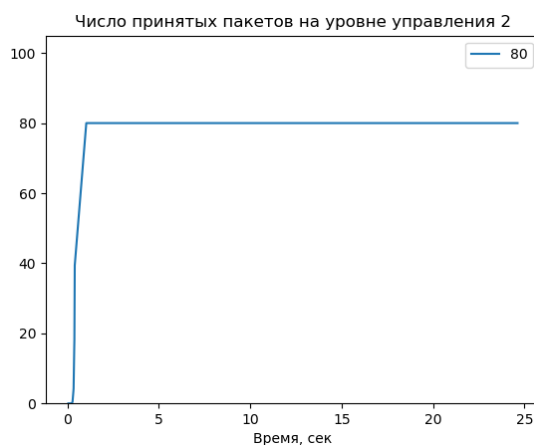


Рисунок 4 – Расчет динамики доведения пакетов до адресатов на уровне управления 2 (доведение 80 пакетов)

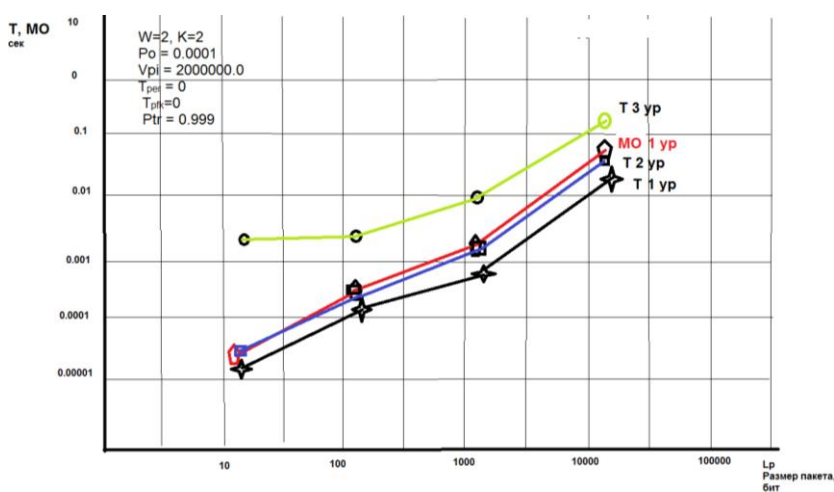


Рисунок 5 – Изменение математического ожидания и среднеквадратичного отклонения времени доведения пакетов до адресатов в зависимости от размеров пакетов

Выводы

В статье рассмотрены вопросы создания расчетной модели в интересах обоснования рациональной политики управления загрузкой каналов военной связи различной пропускной способности в условиях нестационарных потоков смешанного TCP и UDP трафика при реализации различных алгоритмов управления перегрузкой и различных приоритетов обработки трафика. Для высокоскоростных потоков пакетного трафика по протоколам TCP и UDP в магистральных каналах связи представлена жидкостная модель на основе системы дифференциальных уравнений баланса потоков данных, для низкоскоростных потоков в линиях связи конечных абонентов тактического и оперативного уровней управления представлено описание расчетной модели процесса доставки многопакетных сегментов в иерархической сети передачи данных на основе параллельных конечных марковских цепей, приведены результаты расчетов времени доставки сообщений при заданной вероятности получения и параметрах канала связи.

Список использованных источников

1. Соколов Н.А. Телекоммуникационные сети: монография. Ч.1-4. М.: Альварес Паблшинг, 2003-2004. – 640 с.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
3. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Караев Д.А., Винокуров А.М. Математическая модель доставки информации в радиосистеме оповещения без обратной связи с повторами сообщений // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2017. №1(32). – С. 67-76.
4. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Сандулов Н.В., Хаптар В.В. Оперативность информационного обмена в иерархической радиосети автоматических систем управления военного назначения с протоколом типа X.25 // Радиотехника и связь. 2016. №1. – С. 26-31.
5. Цимбал В.А., Шиманов С.Н., Тоискин В.Е. Нахождение характеристик конечных марковских цепей при произвольных шагах переходов // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №9-2(40). – С. 110-113.
6. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. М.: Советское радио, 1973. – 232 с.
7. Misra V., Gong W.-B., Towsley D. Stochastic Differential Equation Modeling and Analysis of TCP-WindowSize Behavior // Technical Report ECE-TR-CCS-99-10-01: presented at Performance 99, Istanbul, 1999, October 15 -17. – P. 1-8.
8. Misra V., Gong W.-B., Towsley D. Fluid-Based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED // Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communication, Stockholm, 2000, August 28 - September 1. – P. 151-160.
9. Королькова А.В., Кулябов Д.С. Математическая модель динамики поведения параметров систем типа RED // Вестник РУДН. Серия: Математика, Информатика, Физика. 2010. №2-1. – С. 54-64.
10. Гребенкин М.К., Поршнева С.В. Гибридная жидкостная модель магистрального Интернет-канала. Имитационное моделирование информационных потоков в высокоскоростных сетях передачи данных. L.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 172 с.
11. Велиева Т.Р., Королькова А.В., Кулябов Д.С., Сантуш Б.А. Модель управления очередями на маршрутизаторах // Вестник РУДН. Серия: Математика, Информатика, Физика. 2014. №2. – С. 81-92.