

УДК 004.7.052:004.414.2

В. В. ЛУКАШЕНКО

Национальный авиационный университет, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ СЕТЕЙ С НИЗКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ЗАДЕРЖКАМ

В работе рассмотрены протоколы доставки данных в сетях с низкой чувствительностью (толерантностью) к задержкам сигнальной и управляющей информации и к внезапным разрывам соединения (Delay/Disruption-Tolerant Networks – DTN). Проведен сравнительный анализ параметров различных протоколов доставки данных в сетях с толерантностью к задержкам сигнальной и управляющей информации, гарантиями доставки и возможностями минимизации ресурсов, необходимых для доставки данных с вероятностями не ниже минимально допустимых. Сформулирована задача оптимизации процессов доставки данных с использованием стандартных и модифицированных протоколов специализированных DTN-сетей. Предложен функционал целевой функции многокритериальной оптимизации алгоритма доставки данных.

Ключевые слова: сеть, толерантная к задержкам, сетевой протокол, оптимизация, функционал качества, многокритериальная оптимизация, нелинейная свертка критериев, аддитивная свертка.

Введение

Как показано в [1], в информационно-вычислительных сетях с низкой чувствительностью к задержкам сигнальной и управляющей информации и к внезапным разрывам соединения (Delay/Disruption-Tolerant Networks – DTN) имеются принципиальные различия в подходах к передаче, хранению данных, времени жизни пакетов (Time-to-Live – TTL) и гарантиям доставки. Например, если в обычных сетях параметр TTL может составлять десятки, максимум сотни миллисекунд [2], то в специализированных сетях типа межпланетного Интернета время доставки данных – от единиц секунд (от Земли до Луны) до единиц минут (от Земли до Марса). Проблема усугубляется повышением отношения числа искаженных бит к общему числу переданных бит (Bit Error Ratio – BER) из-за ухудшения отношения сигнал – помехи (Signal-to-Noise Ratio – SNR), вызванного внешними факторами, в частности, влиянием солнечной радиации, магнитных бурь и пр.

Исходя из этих соображений, необходимо тщательно рассчитывать технические характеристики специализированных DTN-сетей и правильно организовывать передачу данных.

1. Характеристики основных протоколов

Маршрутизация – это нестандартная задача организации доставки данных в DTN-сетях. Традиционные протоколы маршрутизации, как правило, не

пригодны из-за высоких требований к быстродействию и объемам памяти системы управления доставкой данных для обеспечения гарантированного хранения данных в течение неопределенного времени и полной информации о состоянии системы связи. Существующие сетевые протоколы DTN-сетей могут быть разделены на три крупных категории [2]: одна копия (или направленная пересылка), множество копий (или широковещательная рассылка) и гибридный (ограниченная широковещательная рассылка).

Протоколы первого вида передают только одну копию сообщения по отобранному маршруту к месту назначения. Протоколы широковещательной рассылки передают множество копий сообщения к сенсорным узлам в пределах сети в ожидании, что, как минимум, одна копия достигнет места назначения. Протоколы широковещательной рассылки, например, протоколы, основанные на теории эпидемии или даже пандемии, [3], могут улучшить гарантии доставки. Однако, очевидно, при потерях связности сети и/или случайных разрывах соединений требования к объемам буферной памяти быстро растут при увеличении размера сети.

Выбор направленной или широковещательной рассылки обусловлен следующими соображениями:

- протоколы широковещательной рассылки могут работать при наличии минимальной информации о параметрах и состоянии сети, в то время как при использовании протоколов направленной пересылки нужно для вычисления наилучшего маршрута нужно иметь исчерпывающую информа-

цию о сети;

– протоколы широковещательной рассылки многократной копии, приводят к избыточности, но стоимость повторной пересылки из-за потери пакета может быть достаточно высока.

Сетевые протоколы могут пассивно- или активно-адаптивными, в зависимости от того, когда вычисляется маршрут. В активно-адаптивных сетевых протоколах все маршруты прогнозируются и вычисляются до того, как они будут востребованы. Пассивно-адаптивные сетевые протоколы вычисляют маршруты только в момент возникновения необходимости.

Если в сенсорных узлах информация о связности сети обновляется регулярно, оптимальные маршруты в системах с активно-адаптивными протоколами вычисляются достаточно просто. Но эти сетевые протоколы требуют больше сетевых ресурсов для вычисления и обновления таблиц маршрутизации, особенно, когда топология сети изменяется часто.

С другой стороны, в пассивно-адаптивных протоколах, таблицы маршрутизации имеют меньшие размеры, поэтому их вычисление и обновление проще. Однако из-за необходимости вычисления маршрута вводится добавочная задержка перед пересылкой сообщения.

Гибридные сетевые протоколы объединяют оба подхода. Рассмотрим основные характеристики сетевых протоколов DTN-сетей.

Bundle Protocol [4] – это протокол дополнительного уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (ВОС), который вводится между транспортным уровнем и уровнем приложений и служит для обеспечения гарантий доставки данных. Он работает поверх так называемого протокола LTP – Licklider transmission protocol (иногда называемого longhaul (дальнемагистральный) transmission protocol) – протокола «точка-точка», разработанный для магистральной связи в дальнем космосе. Назван в честь специалиста по компьютерам и компьютерным сетям Дж. Ликлайдера (Joseph Carl Robnett Licklider). Ядром протокола BP/LTP является протокол DTN2 – базовая реализация для встраивания в компоненты архитектуры DTN-сетей.

Для развертывания высокоскоростных DTN-сетей с минимальными изменениями конфигурации при внедрении в такие системы, как роботизированные космические комплексы, применяется ION (Interplanetary Overlay Network) – реализация Bundle Protocol, LTP и др. для более ресурсоемких приложений типа локальных сетей.

IBR-DTN (iterated best response-DTN) – реализация Bundle Protocol, поддерживающая уровни TCP

и UDP, Bundle Security Protocol и Integrated Public Number Database (IPND).

2. Оптимизация протоколов по нескольким критериям

В DTN-сетях имеют место ситуации, когда весь маршрут от источника к месту назначения не существует. В результате, сетевые протоколы, в которых предполагается, что общий маршрут от источника к месту назначения, могут работать ненадежно. Из-за ограничений по энергии и времени хранения в сетевых узлах протоколы, которые не являются энергетически эффективными и не дают гарантий хранения, для DTN-сетей менее предпочтительны.

Для снижения нагрузки на сеть без потерь в скорости доставки и относительном количестве доставленных пакетов рассмотрим алгоритм доставки с распространением диффузионного марковского процесса через $M_c + 1$ транзитных узлов. Для достижения точки равновесия – ограничения размножения числа копий пакета в сети – выберем соответствующий порог перехода. Если число копий пакета малое, количество задействованных узлов растет быстро, с другой стороны, при увеличении число копий пакета число узлов, участвующих в процессе распространения пакета должно уменьшаться.

После того, как число двойных копий пакета достигает точки равновесия, $M_c + 1$ транзитных узлов вступают во второе состояние, в котором узлы, которые получают копию пакета, не продвигают ее к другим узлам, кроме узла назначения. Таким образом, мы стремимся обеспечить простое, но эффективное решение обратиться к проблеме маршрутизации в DTN-сетях с переменной структурой, когда прогноз топологии сети невозможен. Это минимизирует число передаваемых сообщений и обеспечивает доставку срочных сообщений с минимально возможной задержкой.

Будем рассматривать задержку доставки τ_d в качестве основной метрики маршрута. При этом сообщения будут перенаправляться от узлов с большими τ_d к узлам с меньшими τ_d . Тогда задержка доставки к узлу d_k – это минимальная сумма τ_{d_i} и τ_{k_i} среди его соседей:

$$\tau_{dk} = \min_{d_i \in D} (\tau_{d_i} + \tau_{k_i}), \quad (1)$$

где τ_{dk} – задержка доставки на соседний узел d_i , τ_{k_i} – время контакта между d_k и d_i и D – это множество узлов, соседствующих с d_k .

В предлагаемом алгоритме подразумевается наличие априорных данных о ресурсах и объемах буферной памяти. Кроме информации о задержке доставки, необходимо рассчитывать и вводить в таблицу маршрутизации данные об уровне энергетического ресурса, объема свободной буферной памяти и другие параметры, произвольно комбинируемые в функционале качества. Для того, чтобы сохранить энергию и исключить возможность заклинивания маршрута, сообщения направляются к узлам с минимальными задержками доставки и лучшими параметрами таблицы маршрутизации, чем те, которые записаны в передаваемом сообщении.

При передаче высокоприоритетных сообщений задержка доставки является единственной метрикой, используемой для расчета оптимального маршрута для того, чтобы минимизировать время ожидания. Для расчета маршрута при доставке низкоприоритетных сообщений целесообразно использовать как задержку доставки, так и другие метрики, чтобы повысить время обеспечения связности сети.

Алгоритм эффективной доставки, основанный на размножении данных и активно-адаптивный алгоритм доставки с низкой чувствительностью к ошибкам данных обеспечивают доставку данных в DTN-сетях с переменной структурой, обусловленной случайными разрывами соединения или уходом носителей из зоны приема. При этом необходимо обеспечить как гарантированное хранение и передачу данных, так и механизмы управления буферной памятью узлов.

Алгоритм передачи данных основан на оценке узловой вероятности доставки, – вероятности того, что узел может доставить сообщение на пункт приема. Пусть $\pi_k(t)$ означает вероятность доставки сообщения k – м узлом за время t , причем $\pi(0) = 0$. Каждый узел имеет таймер Δ чтобы вычислить свою вероятность $\pi_k(t)$. Если k – й узел в течение времени Δ не передает никаких данных другому узлу, $\pi_k(t)$ убывает. Закон убывания зависит от статистики сетевого трафика. Для рассматриваемых в данной работе специализированных сетей распределение интенсивности трафика может подчиняться разным законам в зависимости от специфики сети. Например, в автономной наземной сети радиодатчиков (сенсорной сети) или в сети открытого космоса может иметь место закон редких событий Пуассоновского или экспоненциального семейства. В сенсорной сети с длительным хранением и управляемой передачей данных, наоборот, логично ожидать самоподобного трафика с коэффициентами Херста, близкими к единице. В любом случае перед выбо-

ром априорных вероятностных распределений необходимо проводить дополнительные аналитические или, если это возможно, экспериментальные исследования.

Если k – й узел передает сообщение другому узлу m , соответственно, π_k обновляется до значения π_m . Сообщения помещаются в очередь с дисциплиной обслуживания FIFO в каждом узле. Когда k – й узел имеет сообщение для отправки и продвижения через последовательность узлов, требуемая вероятность доставки и свободная буферная память каждого узла обеспечивается через простые сообщения типа Hello. Затем k – й узел передает сообщение соседнему узлу m со свободным буферным пространством, причем вероятность доставки из всего множества соседних узлов наиболее высокая, которая также выше, чем вероятность доставки соответственно через k – й узел, $\pi_m > \pi_k$.

Для определения рандомизированного функционала эффективности протокола доставки введем функцию $\psi(k, l)$ – нормированную к единице количественную оценку устойчивости к ошибкам (искажениям) сообщения, передаваемого соседнему узлу. В момент генерации сообщения величина $\psi_g(k, l) = 0$, а в момент доставки $\psi_{dv}(k, l) = 1$.

После передачи k – м узлом сообщения к M_c соседним узлам в сети появляются $M_c + 1$ копий. Тогда, применив теорему умножения вероятностей событий, можно вычислить вероятностную оценку устойчивости к ошибкам передаваемого сообщения на m -й соседний узел по следующей формуле:

$$\psi(k, l) = 1 - [1 - \psi(k, m)] \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^K (1 - \pi_{lm}). \quad (2)$$

Соответственно, оценка устойчивости к ошибкам передаваемого сообщения на k -м узле пересчитывается по формуле (3):

$$\psi(k, k) = 1 - [1 - \psi(k, m)] \prod_{m=1}^K (1 - \pi_{lm}). \quad (3)$$

Таким образом, в каждом узле хранится список сообщений для передачи, список удаленных сообщений и список приоритетов пересылки сообщений. Список для передачи объединяется в кортеж со списком приоритетов сообщений. Когда контакт становится доступным, сообщения доставляются в соответствии с очередью в списке передач и приоритетов.

Когда два узла обнаруживают друг друга, они обмениваются упомянутыми списками сообщений. Если узлы имеют в своих буферах сообщения, которые одновременно находятся и в тех, и в других списках, обмен которыми произошел, сообщения

исключаются. Если узел имеет некоторые сообщения, предназначенные для другому узлу, он передает данные сообщения.

Для сетевых протоколов также важны оценки энергоэффективности, эффективности управления буферным пространством и сложности вычислений. Эти количественные и качественные параметры необходимо учитывать в результирующем функционале качества. Поэтому результирующий функционал должен включать частные (вспомогательные) функционалы, связанные с различными параметрами. Это, во-первых, временные параметры доставки:

- время задержки доставки τ_d ;
- общее время τ_{dk} контакта между узлами d и k ;
- время τ_{π} построения таблицы маршрутизации;
- время τ_{pp} обработки пакета (совокупности пакетов – bundle).

Во-вторых, это функционалы $\psi_1(k, m)$ и $\psi_2[\pi_k(t)]$, связанные с ошибками при доставке и вероятностями доставки сообщений соответственно.

С учетом высказанных соображений запишем окончательное выражение для результирующего функционала качества протоколов для DTN-сетей:

$$\Psi \left\{ \varphi(\tau_d, \tau_{dk}, \tau_{\pi}, \tau_{pp}), \psi_1(k, m), \psi_2[\pi_k(t)] \right\}_{V(\varphi, \psi)} \rightarrow \max, \quad (4)$$

где $\varphi(\tau_d, \tau_{dk}, \tau_{\pi}, \tau_{pp})$ – временной функционал качества доставки сообщений;

$\psi_1(k, m)$ – функционал ошибок доставки;

$\psi_2[\pi_k(t)]$ – функционал вероятностей доставки;

$V(\varphi, \psi)$ – вектор параметров протокола маршрутизации.

Теоретически результирующий функционал (4) представляет собой нелинейную свертку частных функционалов, связанных с временными и вероятностными характеристиками доставки сообщений. Поиск наилучшего значения такого функционала – не только очень сложная, но и малопродуктивная задача. Дело в том, что решение, получаемое в результате оптимизации функционала (4), весьма чувствительно к ошибкам задания исходных данных. Поскольку специфика рассматриваемых DTN-сетей заключается именно в отсутствии достоверной априорной информации о текущих параметрах и состоянии сети – топологии, масштабе сети, количестве сетевых и терминальных узлов и т.д. – устойчивость оптимального решения не гарантируется. По

существо, данную задачу следует отнести к классу некорректных задач математической физики.

На наш взгляд, наиболее реалистичным подходом к решению поставленной задачи является получение некоторых асимптотических решений минимаксного типа, которые можно трактовать как наилучшие оценки для наихудшего случая. Другими словами, целесообразно искать некие оценки максимального правдоподобия. Такие оценки можно отыскивать, заменив нелинейную свертку критериев линейной аддитивной сверткой с заранее выбранными весовыми коэффициентами слагаемых.

Исходя из этих соображений, заменим данный нелинейный функционал линейным параметрическим функционалом вида

$$\begin{aligned} & \Psi \left\{ \varphi(\tau_d, \tau_{dk}, \tau_{\pi}, \tau_{pp}), \psi_1(k, m), \psi_2[\pi_k(t)] \right\} = \\ & = a_1 \varphi(\tau_d) + a_2 \varphi(\tau_{dk}) + a_3 \varphi(\tau_{\pi}) + a_4 \varphi(\tau_{pp}) + \\ & + a_5 \psi_1(k, m) + a_6 \psi_2[\pi_k(t)] \Big|_{V(\varphi, \psi)} \rightarrow \max, \end{aligned} \quad (5)$$

где $a_i, i = \overline{1, 6}$ – весовые коэффициенты важности частных показателей качества. Начальные значения коэффициентов подбираются субъективно, опытным путем и уточняются в процессе текущей эксплуатации сети. Кроме того, некоторые показатели качества (например, энергетические ресурсы, объемы буферной памяти) можно рассматривать как ограничения и решать задачу условной оптимизации. Если ни один из сетевых протоколов не будет соответствовать всем поставленным требованиям к эффективности функционирования сети, надежности доставки сообщений, очевидно, придется использовать своеобразный стек протоколов и менять тот или иной протокол с учетом специфики решаемой в данный момент задачи.

Заключение

В данной работе выполнен сравнительный анализ эффективности сетевых протоколов для применения в специализированных информационно-вычислительных сетях, которые обладают низкой чувствительностью к задержкам доставки данных.

В дальнейшем планируется рассмотреть задачи управлением буферной памятью и оценить вычислительную сложность алгоритмов оптимизации сетевых протоколов.

Литература

1. Лукашенко, В. В. Характеристики системы управления корпоративной сетью при наличии случайных задержек доставки управляющей и сигнальной информации [Текст] / В. В. Лукашенко // Наукові записки УНДІЗ. – 2011- №3(19). - С. 62 - 68.

2. Tanenbaum, A. S. *Computer Networks, 5th Ed.* [Text] / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 p.
3. Mundur, P. *Delay Tolerant Network Routing: Beyond Epidemic Routing* [Text] / P. Mundur., M. Seligman // *Proceedings of third international symposium on Wireless Pervasive Computing, 2008. - ISWPC 2008, 7-9 May 2008. – P. 550 - 553.*
4. *Delay-Tolerant Networking Architecture* [Text] / V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott // *Request for Comments. –2007. – № 4838. –35 p.*

Поступила в редакцію 19.02.2014, рассмотрена на редколлегии 25.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. А. Серков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина.

COMPARATIVE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF PROTOCOLS FOR DELAY-TOLERANT NETWORKS

V. V. Lukashenko

Protocols of information transfer in delay-tolerant networks with a low sensibility to the delays of signal and control data and to the intermittent connection are considered in work (Delay/Disruption-Tolerant Networks – DTN). The comparative analysis of parameters of different protocols of delivery of information in networks with tolerance to the delays of alarm and managing information is conducted, by the guarantees of delivery and possibilities of minimization of resources necessary for delivery of information with probabilities not below minimum possible. The task of optimization of processes of delivery of information with the use of standard and modified protocols of the specialized DTN-networks is formulated. The functional of having a special purpose function of multi-criteria optimization of algorithm of delivery of information is offered.

Keywords: delay-tolerant network, network protocol, optimization, functional of quality, multi-criteria optimization nonlinear convolution of criteria, additive convolutione.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОТОКОЛІВ ДЛЯ МЕРЕЖ З НИЗЬКОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДО ЗАТРИМОК

V. V. Лукашенко

У роботі розглянуті протоколи доставки даних в мережах з низькою чутливістю (толерантністю) до затримок сигнальної і управляючої інформації і до раптових розривів з'єднання (Delay/Disruption-Tolerant Networks – DTN). Проведений порівняльний аналіз параметрів різних протоколів доставки даних в мережах з толерантністю до затримок сигнальної і управляючої інформації, гарантіями доставки і можливостями мінімізації ресурсів, необхідних для доставки даних з імовірністю не нижче мінімально допустимих. Сформульована задача оптимізації процесів доставки даних з використанням стандартних і модифікованих протоколів спеціалізованих DTN-мереж. Запропонований функціонал цільової функції багатокритеріальної оптимізації алгоритму доставки даних.

Ключові слова: мережа, толерантна до затримок, мережний протокол, оптимізація, функціонал якості, багатокритеріальна оптимізація, нелінійна згортка критеріїв, адитивна згортка.

Лукашенко Виктория Викторовна - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем и сетей Национального авиационного университета, Киев, Украина.