

## ПРОБЛЕМЫ ДОСТАВКИ ДАННЫХ В СЕТЯХ С НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К ЗАДЕРЖКАМ

Національний авіаційний університет

Рассмотрена задача организации процессов доставки сообщений в сетях с нечувствительностью к задержкам доставки и разрывам связи между сетевыми узлами (DTN-сетях). Промоделирован процесс доставки сообщений в мобильной DTN-сети. Даны сравнительные количественные оценки параметров надежности доставки в зависимости от числа тиражируемых сообщений.

### Введение

Качество сервиса традиционных компьютерных сетей определяется совокупностью показателей, из которых одними из важнейших являются задержка доставки данных и вариация задержки [1]. Эти показатели особенно критичны для таких приложений, как IP-телефония, потоковое видео, сетевые игры и пр. Кроме того, при использовании большинства транспортных протоколов (TCP, UDP и др.) предполагается, что, как минимум, один маршрут от отправителя к получателю существует постоянно. В противном случае протокол дает сбой, а сетевые коммутационные узлы сигнализируют об отказе сети.

Однако для большого числа задач научного и производственного характера, сбора данных на Земле, в ближнем и дальнем космосе задержки доставки данных по определению могут достигать минут, часов, а иногда и значительно более длительных значений. Кроме того, в компьютерных сетях специального назначения (оборона, чрезвычайные ситуации, природные и техногенные катастрофы) могут иметь место разрывы связи, отказы и/или уничтожение отдельных сетевых и терминальных узлов, автономных сетевых сегментов. В некоторых сетях постоянный маршрут от отправителя к получателю вообще отсутствует. Связь между ними может иметь место или периодически, как например, для космических группировок, или вообще в случайные интервалы времени. В этих ситуациях вероятность доставки сообщений вообще может стать равной нулю, а традиционные протоколы не только транспортного уровня, но и уровня приложений становятся практически неработоспособными.

Для решения проблем передачи данных при наличии экстремальных задержек доставки и непредсказуемых разрывов связи разработана специальная архитектура сетей с нечувствительностью к задержкам и разрывам соединений

[2] – *Delay/Disruption Tolerant Network (DTN)*. Принципиальные отличия DTN-сетей от обычных IP-сетей следующие.

1. Данные, представленные в виде сообщений произвольной длины (ADU, англ. *Application Data Unit*), трансформируются в специальные расщепленные пакеты (*Bundle*), предназначенные для пересылки в гетерогенных сетях. Пакет *Bundle* состоит из блоков (не менее двух), каждый из которых может содержать либо только данные приложений, либо только служебные данные, необходимые для доставки (например, *Endpoint Identifier (EID)* получателя). Причем, если в традиционных архитектурах служебные данные хранятся в заголовке или в блоке полезной нагрузки пакета, то в DTN они могут храниться в произвольных блоках. Сами пакеты допускают фрагментацию/объединение, а каждый полученный фрагмент считается отдельным пакетом.

2. Для организации доставки применяется метод *Store-and-forward* (сохрани и передай), модифицированный с учетом наличия задержек большой длительности. Поскольку канал связи на момент передачи может быть недоступен, а отследить его состояние из-за больших задержек сложно, для ожидающих отправки пакетов рекомендуется использовать постоянные хранилища – жесткие диски, *Flash*-память.

3. Задача маршрутизации пакетов в DTN-сети решается нетривиальными методами. В протоколе маршрутизации предусматривается, что узел передает пакет дальше по сети даже в том случае, если адресат этого пакета не обнаружен. Информация просто передается на другие устройства в зоне доступа, которые или передают ее еще дальше, или хранят до момента обнаружения нового сетевого узла. Теоретически этот подход позволяет свести потери пакетов до нуля.

В данной работе поставлена задача оценивания связи между такими ключевыми показате-

лями DTN-сети, как вероятность доставки сообщений, избыточность и время доставки.

**Постановка задачи**

Эталонные модели взаимодействия OSI, TCP/IP и DTN представлены на рис. 1. Принципы построения, особенности использования и сравнительные характеристики моделей OSI и TCP/IP подробно изложены в [3]. Принципиальным отличием модели DTN от моделей OSI и TCP/IP является наличие буферной памяти с большой (теоретически – неограниченной) длительностью хранения данных. Это необходимо для обеспечения передачи данных при удалении сетевых узлов на большие расстояния, при отказах сетевых узлов и разрывах связи.

Уровень передачи расщепленных пакетов ответственен за долговременное хранение и гарантированную доставку посылок. Для решения этих задач в условиях, когда доставка осуществляется через ненадежные каналы с частыми разрывами соединения, на этом уровне выполняется фрагментация расщепленных пакетов. Каждый фрагмент, как и исходный пакет, содержит два неотъемлемых друг от друга элемента – идентификатор конечного получателя и блок пользовательской информации. При приеме посылки на узле назначения осуществляется дефрагментация пакетов и объединение отдельных блоков пользовательской информации.

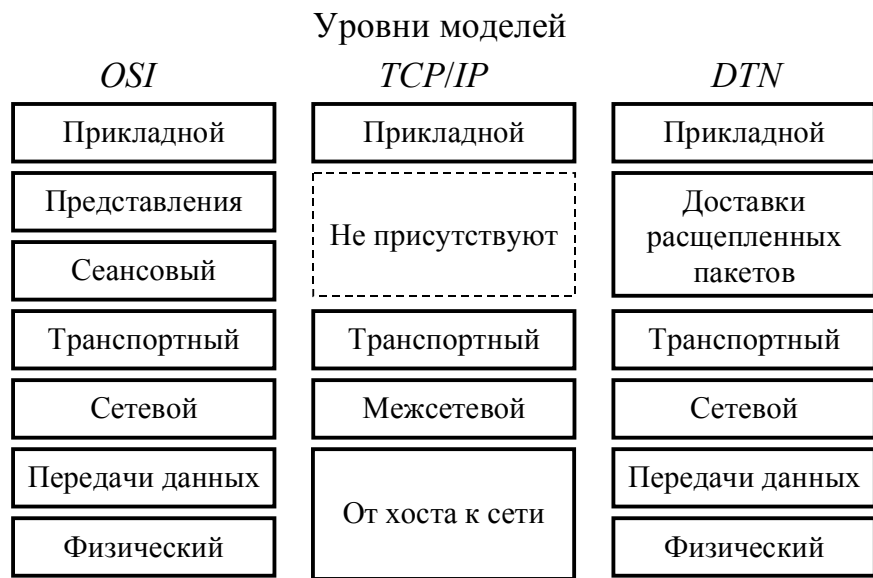


Рис. 1. Сравнение эталонных моделей

Для повышения надежности доставки сообщений в DTN-сетях применяется репликация – размножение или тиражирование сообщений. При этом необходимо решать задачу оптимального выбора числа передаваемых копий как задачу минимизации избыточности при гарантированной вероятности доставки.

Рассмотрим статистические характеристики задержек в DTN-сети с тиражированием сообщений. Пусть имеется два мобильных сетевых узла  $n_i$  и  $n_j$ . Во время сближения узлов может иметь место успешный контакт, т.е.

передача сообщения. Пусть среднее время между успешными контактами равно  $\Delta\tau(n_i, n_j)$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ ,  $i \neq j$ . Если общее число  $N$  узлов в сети достаточно велико ( $N \gg 1$ ), то в соответствии с теорией массового обслуживания [4] вероятность того, что на интервале наблюдения  $T_i$ ,  $T_i \gg \Delta\tau(n_i, n_j)$  будет иметь место ровно  $k$  успешных контактов, подчиняется закону Пуассона:

$$P_k [\Delta\tau(n_i, n_j)] = \frac{\lambda^k \exp(-\lambda)}{k!}, \tag{1}$$

где  $\lambda = q/\Delta\tau(n_i, n_j)$  – интенсивность контактов на интервале наблюдения.

Можно показать, что при выборе оптималь

ного алгоритма маршрутизации для мобильных сетей без инфраструктуры [5,6], среднее ожидаемое время доставки  $t_d$  описывается формулой:

$$t_d = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (1/k)}{N-1} \Delta\tau(n_i, n_j). \quad (2)$$

Для алгоритма маршрутизации с тиражированием сообщения по  $M$  сетевым узлам,

$$t_{dm} = \sum_{k=1}^{M-1} \left[ \frac{\Delta\tau(n_i, n_j)}{M-k} \right] + \left[ \frac{(M-N)\Delta\tau(n_i, n_j)}{(M-1)N} \right]. \quad (3)$$

Для получения сравнительных оценок среднего времени доставки сообщений было проведено моделирование процесса доставки с оптимальной маршрутизацией и маршрутизацией с тиражированием по  $M$  сетевым узлам. Результаты представлены в следующем разделе.

### Результаты моделирования процессов доставки сообщений

На первом этапе моделирования была выполнена оценка распределения задержки доставки сообщений в сети *DTN*. Сеть состояла из 100 мобильных узлов, перемещающихся в пространстве по случайным траекториям, которые описывались стохастическим дифференциальным уравнением второго порядка – диффузионным марковским процессом. Значения задержек вычислялись по выражениям (2) и (3) и затем усреднялись: значение для каждой точки усреднялось по 1200 отсчетам. На рис. 2 показаны гистограммы распределения времени доставки для вариантов тиражирования по  $M=2$  и  $M=12$  сетевым узлам. Сравнение выполнялось по относительному числу

$M < N$ , среднее ожидаемое время доставки  $t_{dm}$  описывается формулой

доставленных сообщений, время доставки которых не превысило время жизни сообщения  $T_{ii} = 10$  мин.

Как видно из рисунка, гистограмма распределения числа доставленных сообщений по времени доставки является достаточно гладкой кривой, и ее можно аппроксимировать простыми математическими функциями – экспоненциальной или рациональной, с соответствующим подбором коэффициентов масштабирования.

В частности, при экспоненциальной аппроксимации вида:

$$\delta_d(t) = \alpha \exp(-\beta t) + \gamma,$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – постоянные коэффициенты, можно рассчитать вероятность доставки  $p_{\tau_d}$  на интервале  $\tau_{d \min} \dots \tau_{d \max}$ . Здесь под  $\tau_{d \min}$  подразумевается момент начала доставки (доставлено 0% объема посылки), а под  $\tau_{d \max}$  – момент завершения доставки (доставлено 100% объема посылки).

Тогда:

$$p_{\tau_d}(t) = 0, \quad t \leq \tau_{d \min};$$

$$p_{\tau_d}(t) = \frac{\ln(t/\tau_{d \min}) - (t - \tau_{d \min})[1 - \ln(\tau_{d \max})]}{\ln(\tau_{d \max}/\tau_{d \min})(\tau_{d \max} - \tau_{d \min})[1 - \ln(\tau_{d \max})]},$$

$$\tau_{d \min} < t < \tau_{d \max};$$

$$p_{\tau_d}(t) = 1, \quad t > \tau_{d \max}.$$

В дальнейшем можно использовать такие аппроксимации для аналитического описания процессов доставки сообщений в сетях с нечув-

ствительностью к задержкам и разрывам соединений в каналах связи.

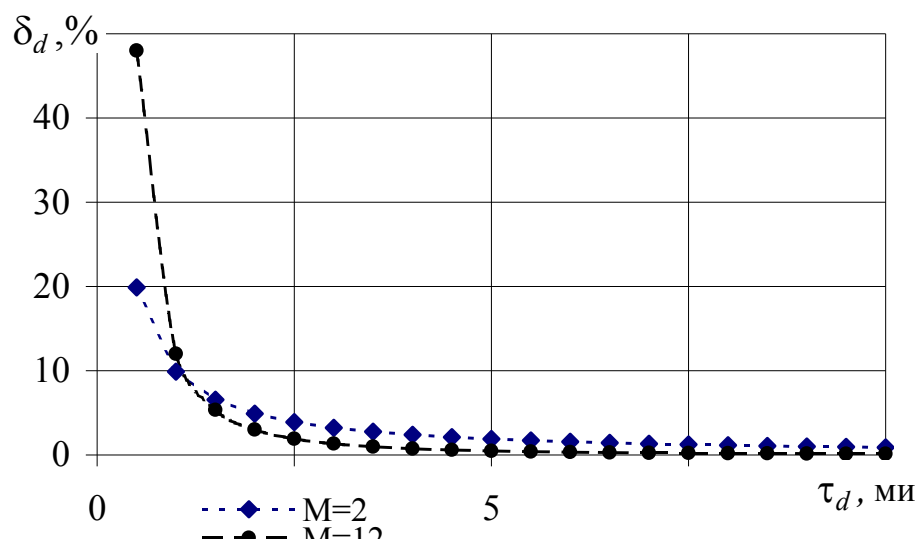


Рис. 2. Розподілення доли доставлених повідомлень  $\delta_d$  по времени доставки  $\tau_d$

### Выводы

Розподілення числа успішно доставлених повідомлень в *DTN*-сетях залежить від виду алгоритма маршрутизації і його параметрів. Якщо на час життя повідомлення обмеження не накладаються, теоретично можна забезпечити 100%-ну доставку повідомлень. Ускорити час доставки можна шляхом тиражування по декільком мережним вузлам, однак при цьому необхідно приймати до уваги додатковий витрат мережних ресурсів.

В подальшому планується розглянути вплив характеристик протоколу доставки розщеплених пакетів (*Bundle*) на надійність і швидкість доставки при лінійних обмеженнях на мережні ресурси.

### Список литературы

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.

2. Cerf V., Burleigh S., Hooke A., Torgerson L., Durst R., Scott K., Fall K., Weiss H. Delay-Tolerant Networking Architecture // Request for Comments: 4838. – April 2007. – 35 p. <http://tools.ietf.org/pdf/rfc4838.pdf>

3. Tanenbaum, A.S. Computer Networks, 5<sup>th</sup> Ed. / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 pp.

4. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.

5. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера. – 2005. – 592 с.

6. Вишневский В.М. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях / В.М. Вишневский, О.В. Семенова. – М.: Техносфера, 2007. – 312 с.