

УДК 044.77

БИЛЫК И. И.

## ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЕТЕВОГО АДРЕСА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ P2P СИСТЕМ

На сегодняшний день BitTorrent является одним из наиболее популярных peer-to-peer приложений, трафик которого составляет значительную часть всего Internet-трафика. С другой стороны, при построении сети в большинстве случаев используются устройства преобразования сетевого адреса (NAT). Не смотря на существование множества средств для прохождения NAT, вполне вероятно, что приложения, особенно P2P, не могут принимать запросы на входящее подключение, если они находятся за NAT. Хотя это явление широко наблюдалось в измерительных работах, до сих пор в литературе отсутствуют количественные исследования влияния NAT на приложения P2P. В этой статье рассмотрена аналитическая модель для измерения производительности P2P систем, подобных BitTorrent, при наличии однородных и неоднородных NAT-пиров.

BitTorrent nowadays is one of the most popular peer-to-peer applications on the Internet, contributing to a significant portion of the total Internet traffic. On the other hand, NAT devices have become widespread in almost all networking scenarios. Despite of the effort of NAT traversal, it is still quite possible that applications, especially P2P ones, cannot receive incoming connection requests, if they are behind NAT. Though this effect has been widely observed in measurement work, so far there is no quantitative study examining the impact of NAT on P2P applications. This article describes analytical model to capture the performance of BitTorrent-like P2P systems in the presence of NAT peers.

### Введение

В этой статье рассмотрено аналитическое моделирование для оценки воздействия закрытых NAT-пиров на показатели torrent-систем. С помощью модели было установлено негативное влияние присутствия NAT-пиров на производительность системы во время загрузки файла. Также в конце предложены некоторые незначительные изменения протокола, которые позволят существенно улучшить эффективность системы.

### P2P и BitTorrent

Парадигма peer-to-peer (P2P) является многообещающей архитектурой для передачи данных большого объема. Согласно парадигме, в P2P используются каналы участвующих в раздаче пользователей, благодаря чему рабочая нагрузка переносится с серверов на пользователей. Применение внеположного механизма для распространения метаданных файлов и одного или нескольких трекеров (tracker server) для слежения за пирми-участниками позволяет пирам обмениваться блоками файлов напрямую, что значительно снижает нагрузку, связанную с одноточечной моделью распространения данных в клиент-серверной парадигме. Пирсы получают недостающие блоки файлов от соседних пиров и одновременно отдают им ра-

нее загруженные. В зависимости от завершения загрузки пиры делятся на два типа: сидеры – пиры, которые уже имеют полный файл, и личеры – имеют только часть файла, либо файл отсутствует. Для поощрения пользователей за содействие в BitTorrent-подобных системах реализована стратегия tit-for-tat («расплата», «услуга за услугу»). При отсутствии NAT-пиров такая стратегия вполне подходит для построения системы с соблюдением показателей справедливости. Совместно с ней используется стратегия optimistic unchoke. Использование этих стратегий дает пирам возможность находить соседей с большей скоростью отдачи (для личеров) либо загрузки (для сидеров).

### Негативное влияние NAT

В torrent-сообществах очень часто возникают жалобы по поводу NAT. Это ключевая технология в случае недостатка IP-адресов, поскольку NAT позволяет нескольким компьютерам подключаться к интернету используя один внешний IP. С другой стороны, NAT ограничивает направление подключения, так как входящие запросы на подключение отбрасываются, если в таблице преобразования отсутствует информация о инициаторе. Таким образом, во-первых, P2P-приложение, запущенное за NAT, не может при-

нимать входящие подключения от других пиров, из-за чего NAT-пиры будут иметь меньше соседей по сравнению с открытыми. Во-вторых, у пользователей NAT (как правило, за домашними роутерами, подключенные к Internet через DSL или кабельные модемы) скорость отдачи ниже, чем у открытых пиров (с высокоскоростными выделенными каналами). Согласно стратегии «tit-for-tat» в BitTorrent, более вероятно, что NAT-пиры будут подавлены открытыми пирами, поскольку они не могут отдавать с такой же скоростью. В результате, открытые пиры в основном работают между собой, объединяясь в кластеры [1].

### Модель

Взаимодействия в системе показаны на Рисунке 1. Как уже было отмечено ранее, в ней присутствуют два типа пиров: закрытые NAT-пиры, могут подключаться только к открытым соседним пирам; открытые пиры, могут иметь закрытых и открытых соседей.

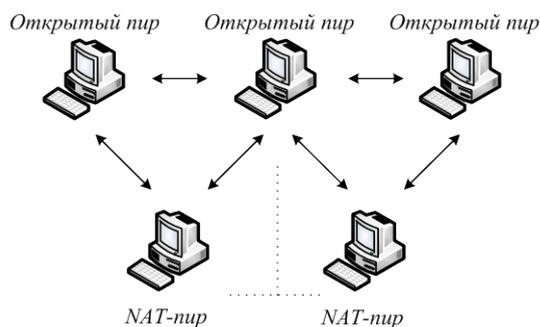


Рис. 1. Общий вид P2P системы с NAT-пирами.

В данном случае рассматривается производительность системы в устойчивом состоянии, то есть количество активных пиров постоянно. Модель построена на основе исходного протокола BitTorrent с акцентированием на среднем времени загрузки открытых и закрытых пиров. Также рассмотрены случаи для однородных (открытые и закрытые пиры имеют одинаковую скорость отдачи) и неоднородных систем (скорость отдачи открытых пиров больше, распространенный случай в реальных системах). Используемые обозначения приведены ниже.

$X, Y$  – тип пиров:  $S$ (сид),  $P$ (открытый),

$N$ (NAT-личер).

$F$  – размер файла для загрузки.

$K$  – количество пиров в списке, который возвращается трекером.

$K_X$  – количество  $X$ ов в списке, который возвращается трекером.

$M$  – максимальное число одновременных отдач для пира.

$N$  – количество пиров в системе.

$N_X$  – количество  $X$ ов в системе.

$\alpha$  – процент NAT-пиров из общего числа личеров.

$C_X$  – производительность канала отдачи  $X$ .

$U_X$  – скорость отдачи данных  $X$ .

$U_{XY}$  – скорость отдачи данных на соединении  $X-Y$ .

$D_X$  – скорость приема данных  $X$ .

$n_{XY}^t$  – количество  $Y$ ов, которым отдает  $X$ .

$n_{XY}^d$  – количество  $Y$ ов, у которых загружает  $X$ .

$L_X$  – среднее количество соседних пиров для  $X$ .

$L_{XY}$  – среднее количество соседних пиров  $Y$  для  $X$ .

$T_X$  – среднее время загрузки для  $X$ .

Охватить все функции BitTorrent-системы в математической модели практически невозможно, поэтому в данной модели выделены основные принципы работы и приняты следующие допущения:

- Отсутствие узкого места в канале загрузки пира. Как показали результаты измерений в [3], скорость загрузки 90% пиров в torrent-системах не превышает 520 Кб/с. Это медленнее большинства интернет-подключений.
- Производительность канала отдачи равномерно разделяется между соединениями.
- Отсутствие ограничения на максимальное и минимальное количество соседних пиров.
- Участвующие пиры полностью используют производительность их канала отдачи, что было теоретически доказано в [4].
- Личеры покидают раздачу после полной загрузки файла.
- Количество сидеров в системе значительно меньше количества личеров.

Исходя из этих допущений и Рисунка 2 ниже описываются основные идеи моделирования.

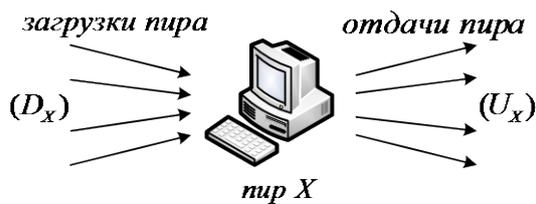


Рис. 2. Простая аналитическая модель.

На первом месте стоит задача измерения среднего времени загрузки файла  $T_X$  открытым и закрытым пиром в устойчивом состоянии. Для этого необходимо получить среднюю скорость загрузки  $D_X$  пира  $X$ . Очевидно, что  $D_X$  определяется средним числом соседних пиров, которые отдают пиру  $X$  ( $n_{XY}^d$ ) и скоростью загрузки каждого соединения. С точки зрения всей системы,  $n_{XY}^d$  зависит от количества пиров  $n_{XY}^u$ , которые загружают у пира  $X$ . В то время как  $n_{XY}^u$  зависит от числа соседних пиров  $L_X$ , числа соседних  $Y$  пиров  $L_{XY}$ , а также стратегий tit-for-tat и optimistic unchoke. Таким образом, начинать следует с выражений для  $L_X$  и  $L_{XY}$ .

Когда новый пир, присоединяясь к раздаче, связывается с трекером, трекер случайно выбирает  $K$  пиров и возвращает информацию о них. Чтобы уменьшить нагрузку на трекер, в нем не используются технологии прохождения NAT для определения доступности пиров. Из-за этого список может содержать сидеров, открытых личеров и NAT-личеров. Если учесть, что  $N_S \ll (N_P + N_N)$ , количество открытых и закрытых пиров в списке будет  $K_P \approx (1-\alpha)K$  и  $K_N \approx \alpha K$  соответственно.

Сидеры в torrent-раздаче работают как серверы, поэтому любые соединения между сидерами и личерами иницируются личерами. Таким образом, среднее количество открытых и закрытых соседей для сидера равно:

$$L_{SP} = \frac{N_P}{N} K \approx (1-\alpha)K,$$

$$L_{SN} = \frac{N_N}{N} K \approx \alpha K,$$

откуда среднее количество соседних пиров для сидера равно:

$$L_S = L_{SP} + L_{SN} = K.$$

Связь между открытым и закрытым пиром может устанавливать только закрытый пир. Следовательно,  $L_{TN}$  определяется как:

$$L_{TN} = K_P N_N / N_P \approx (1-\alpha)K N_N / N_P = \alpha K.$$

Общее количество запросов соединения среди открытых пиров -  $K_P N_P$ . Тем не менее, запрос от  $A$  к  $B$  или от  $B$  к  $A$  устанавливает одно соединение между  $A$  и  $B$ . По этой причине, количество соединений между открытыми пиром имеет следующий вид:

$$Z = N_P K_P - \frac{N_P}{2} \left( \frac{K_P}{N_P - 1} \right)^2 = N_P K_P - \frac{N_P K_P^2}{2(N_P - 1)}$$

Так как в соединении участвуют два пира,  $L_{PP}$  записывается как:

$$L_{PP} = \frac{2Z}{N_P} \approx \left( 2 - \frac{K}{N_P + N_N} \right) K_P.$$

В широкомасштабной torrent-системе, особенно в период пиковой нагрузки, обычно  $K \ll (N_P + N_N)$ . Тогда можно выполнить приближение:

$$L_{PP} \approx 2K_P \approx 2(1-\alpha)K.$$

Исходя из описанного выше, общее количество соседей для открытых пиров:

$$L_P = L_{PP} + L_{TN} = (2-\alpha)K.$$

Для закрытых NAT-пиров соседними могут быть только открытые пиры. Тогда  $L_N$  получим как:

$$L_N = K_P \approx (1-\alpha)K.$$

Поскольку  $n_{XY}^d$  связано с количеством отдач пира, сначала необходимо получить  $n_{XY}^u$ . В период пиковой нагрузки у пира, как правило, более  $M$  соседей. Поэтому будет справедливым утверждение, что пир может принимать запросы на загрузку как минимум от  $M$  соседних пиров. Закрытые пиры имеют возможность отдавать открытым пиром, тогда:

$$n_{XY}^u = M.$$

Выражения для  $n_{SN}^u$ ,  $n_{SP}^u$  и  $n_{PP}^u$  имеют следующий вид:

$$n_{SN}^u = \frac{L_{SN}}{L_S} M = \alpha M,$$

$$n_{SP}^u = \frac{L_{SP}}{L_S} M = (1-\alpha)M,$$

$$n_{PP}^u = M - n_{TN}^u.$$

В устойчивом состоянии открытый пир отдает  $G$  закрытым пирам и  $H$  открытым пирам по стратегии tit-for-tat и  $g$  закрытым и  $h$  открытым пирам по стратегии optimistic unchoke. Поэтому, выражение для  $n_{PN}^u$ :

$$n_{PN}^u = G + g,$$

а  $G$  и  $g$  находятся из следующих равенств:

$$G + H = M - 1, \quad (1)$$

$$g + h = 1, \quad (2)$$

$$\frac{H + h}{M\alpha/(1-\alpha)} = \frac{H}{G}, \quad (3)$$

$$\frac{L_{PP} - H}{L_{PN} - G} = \frac{h}{g}, \quad (4)$$

Равенства (1) и (2) получены исходя из соответствующих стратегий. В однородном системе количество соседей, подключенных открытым пиром по стратегии tit-for-tat, должно быть пропорционально количеству соседей, подключаемых этот пир. Исходя из этого записано равенство (3). Числитель в левой части – среднее число открытых пиров, отдающих открытому пиру, а знаменатель – среднее число закрытых NAT-пиров, отдающих открытому пиру. Уравнение (4) записано, поскольку количество соседей, подключенных открытым пиром по стратегии optimistic unchoke пропорционально количеству оставшихся соседей, которые не были подключены этим открытым пиром по стратегии tit-for-tat.

В неоднородной системе открытый пир будет обслуживать  $(M - 1)$  открытых пиров по стратегии tit-for-tat и, возможно, один закрытый пир по стратегии optimistic unchoke. В результате,  $n_{PN}^u$  вычисляется как:

$$n_{PN}^u = \frac{L_{PN}}{L_P - M + 1}.$$

После получения  $n_{XY}^u$  необходимо определить  $n_{XY}^d$ :

$$n_{PP}^d = n_{PP}^u = M - n_{PN}^u.$$

$$n_{PN}^d = \alpha n_{PN}^u / (1 - \alpha).$$

$$n_{PS}^d = n_{SP}^u N_S / N_P.$$

$$n_{NP}^d = (1 - \alpha) n_{PN}^u / \alpha.$$

$$n_{NS}^d = n_{SN}^u N_S / N_N.$$

Так как пиры могут полностью использовать свой канал отдачи и, как правило, имеют более  $M$  соседей, средняя скорость отда-

чи для каждого соединения определяются следующим образом:

$$U_{SP} = U_{SN} = \frac{U_S}{M}, U_{PP} = U_{PN} = \frac{U_P}{M},$$

$$U_{NP} = \frac{U_N}{M}.$$

Тогда средняя скорость загрузки открытых и закрытых пиров примет такой вид:

$$D_P = n_{PP}^d U_{PP} + n_{PN}^d U_{NP} + n_{PS}^d U_{SP},$$

$$D_N = n_{NP}^d U_{PN} + n_{NS}^d U_{SN}.$$

Среднее время загрузки для открытого пира:

$$T_P = F / D_P.$$

После загрузки файла открытые пиры покидают раздачу, а закрытые пиры скачали только  $F_d = T_P D_N$ . С этого момента каждый сидер обслуживает  $M$  NAT-пиров, пока они не загрузят файл полностью, после чего к сидеру подключаются другие  $M$  пиров. Среднее время загрузки для каждой такой группы:

$$T_R = (N_N + M)(F - F_d) / (2N_S U_S). \quad (5)$$

Из равенства (5) следует, что для минимизации времени каждому сидеру нужно отдавать только одному NAT-пиру с полной скоростью, пока он не загрузит файл. Тогда закрытым пиры будут ждать в среднем  $T_N' = (N_N + 1)(F - F_d) / (2N_S U_S)$ , то есть  $T_N$  выражается как:

$$T_N = T_P + T_N'.$$

Среднее время загрузки для всех пиров:

$$T = (1 - \alpha)T_P + \alpha T_N.$$

### Оценка модели

Для подтверждения правильности модели используется симулятор, созданный в [2]. В нем реализованы основные технологии BitTorrent, включая стратегии tit-for-tat и optimistic unchoke. При проведении моделирования рассматривался случай пиковой нагрузки, за 5 секунд к раздаче подключаются 500 пиров. Личер находится за NAT, то есть закрытый, с вероятностью  $\alpha$ . Раздача файла размером 100Мб производится одним сидером. Канал отдачи сидера составляет 1024Кб/с. Личеры покидают раздачу после загрузки всех блоков файла (64Кб). Каждый пир может отдавать  $M = 5$  личерам, трекер возвращает информацию о  $K = 50$  пирах. Скорость канала отдачи пиров в однородной

системе составляет 384Кб/с, в неоднородной системе открытые пиры имеют 1024Кб/с, закрытые – 384Кб/с. Скорость канала загрузки для всех пиров – 3000Кб/с.

Рисунок 3 отображает среднее количество соседних пиров для сидеров и личеров полученное на симуляторе (С) и с помощью аналитической модели (А). По графику видно, что открытые личеры имеют намного больше соседей, чем NAT-личеры, это является причиной огромной разницы в качестве обслуживания открытых и закрытых пиров. Также с помощью модели можно точно рассчитывать  $L_{PP}$ ,  $L_{PN}$ ,  $L_{SN}$  и  $L_{SP}$ .

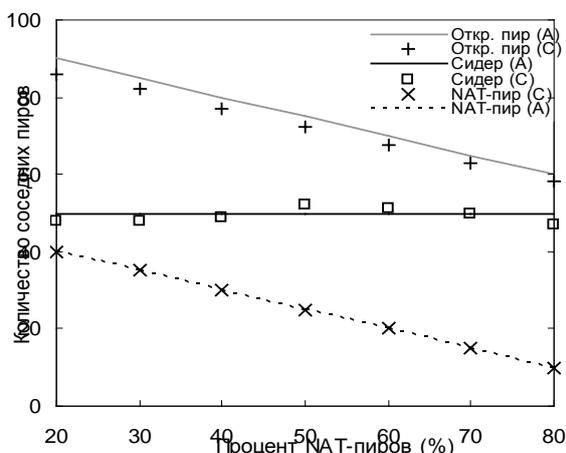


Рис. 3. Среднее количество соседей для пира.

На Рисунке 4 отображена производительность torrent-системы, пиры которой имеют одинаковую скорость канала отдачи. На Рис. 4 (также на Рис. 5) ось ординат имеет логарифмическую шкалу и отвечает за время загрузки. Чтобы лучше продемонстрировать влияние NAT-пиров, был добавлен вариант, когда в системе отсутствуют закрытые пиры. Это частный случай при  $\alpha = 0$ , при этом сидер отдаёт только открытым пирам, а также открытые пиры раздают между собой. Рис. 4 четко показывает, что средняя производительность всех пиров ухудшается с увеличением процента NAT-пиров.

Также следует отметить парадоксальный факт: чем больше в системе закрытых пиров, тем меньше времени на загрузку файла тратят открытые пиры, даже по сравнению с вариантом, когда в системе присутствуют только открытые пиры. Это объясняется тем, что закрытые пиры могут отдавать только открытым, в то время как канал открытых

пиров распределяется между открытыми и закрытыми личерами. Поэтому, с увеличением количества закрытых пиров, суммарный объем канала отдачи, предоставляемого открытым пирам, значительно увеличивается.

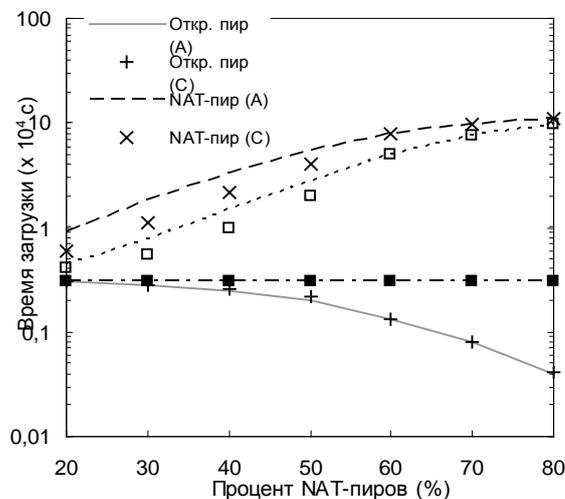
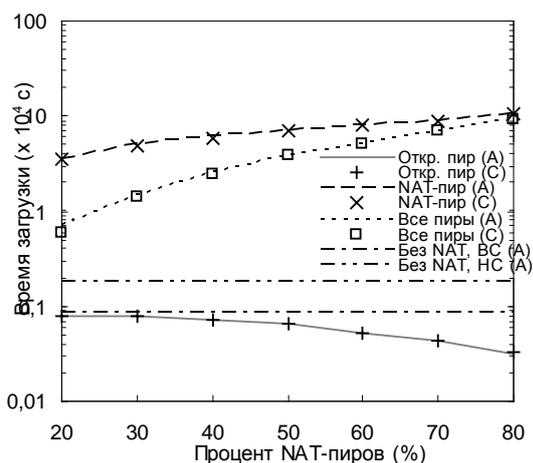


Рис. 4. Среднее время загрузки для пиров в однородной системе.

На Рисунке 5 рассмотрен случай неоднородной системы, более приближенный к реальности. Для полноты картины был добавлен дополнительный случай, когда все пиры открытые и разделены на категории: высокоскоростные (ВС) и низкоскоростные (НС). Рис. 5 повторяет результат на Рис. 4. А именно, производительность всей системы и NAT-пиров ухудшается с увеличением процента закрытых пиров. С другой стороны, открытые пиры получают преимущество, когда большинство пиров находятся за NAT. Судя по Рисунку 5, если принимать во внимание присутствие закрытых пиров, общая производительность системы, а также производительность НС-пилов (обычно NAT-пиры) будет значительно хуже, нежели в случае игнорирования присутствия NAT-пилов.

Таким образом, исходя из Рисунков 4, 5 можно сделать вывод, что присутствие NAT-пилов приводит к деградации производительности системы, в особенности – закрытых пилов. Тем не менее, увеличение количества закрытых пилов позволяет улучшить производительность открытых пилов в однородных и неоднородных системах.



**Рис. 5.** *Среднее время загрузки для пиров в неоднородной системе.*

### Возможность улучшения эффективности

Для повышения производительности и справедливости torrent-системы можно ввести динамически регулируемый параметр, благодаря которому появится возможность управлять вероятностью выбора NAT-пира по стратегии optimistic unchoke. Необходимо дать системе способность динамически регулировать параметр в зависимости от текущего состояния. Это позволит значительно улучшить качество обслуживания NAT-піров и справедливость всей системы в це-

лом, в то время как производительность открытых піров будет несколько занижена в допустимых пределах.

### Заклучение

В этой статье было рассмотрено влияние NAT-устройств на P2P BitTorrent-системы. Для этого использовалась аналитическая модель, которая позволяет измерять производительность загрузки системы при наличии однородных и неоднородных NAT-піров. Путем моделирования было определено, что присутствие в системе закрытых піров существенно снижает эффективность загрузки NAT-піров и производительность всей системы. С другой стороны, наличие закрытых піров дает возможность открытым пірам загружать быстрее, нежели в системе, состоящей только из открытых піров. Это нелогичный, но вполне объяснимый факт, связанный с недоступностью NAT-піров и высокой эффективностью распространения данных в BitTorrent-системах. Для повышения производительности системы был предложен метод, суть которого в параметризации вероятности «оптимистичного выбора» открытым піром закрытого.

### Список литературы

1. Legout, N. Liogkas, E. Kohler, and L. Zhang, "Clustering and sharing incentives in BitTorrent systems," in Proc. of ACM SIGMETRICS, 2007.
2. Bharambe, C. Herley, and V. Padmanabhan, "Analyzing and improving Bit-Torrent performance," in Proc. of IEEE INFOCOM, 2006.
3. J. Pouwelse, P. Garbacki, D. Epema, and H. Sips, "The BitTorrent P2P filesharing system: Measurement and analysis," In Proc. of 4th International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS), 2005.
4. D. Qiu and R. Srikant, "Modeling and performance analysis of BitTorrent-like peer-to-peer networks," in Proc. ACM SIGCOMM, 2004.

Поступила в редакцию 13.02.2009