

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТЕЙ WiFi С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА СЕТЕЙ ПЕТРИ

Введение

На современном этапе развития телекоммуникационных систем технология беспроводных сетей является наиболее удобной в условиях, требующих мобильности, простоты установки и использования. Наибольшую популярность среди стандартов беспроводной связи получил стандарт IEEE 802.11 [1]. В связи с этим актуальной задачей является разработка адекватной модели сети WiFi, позволяющей более детально исследовать ее характеристики с учетом особенностей организации доступа к среде в сетях данного стандарта. Существующие на сегодняшний день методики [2, 3] позволяют оценить пропускную способность сетей WiFi, но не дают возможности проводить анализ временных показателей, таких, как время ожидания получения доступа к среде. Кроме того, в существующих моделях входные потоки являются детерминированными, что значительно ограничивает область применения данных моделей. Таким образом, возникает необходимость разработки новой модели, в которой были бы учтены вероятностно-временные параметры входного трафика. В качестве математического аппарата для разработки данной модели был выбран аппарат временных раскрашенных сетей Петри [4], который является мощным средством моделирования сложных стохастических систем и позволяет учитывать не только функциональные, но и структурные свойства моделируемой системы.

Механизм доступа к среде стандарта 802.11

Для беспроводных сетей при организации доступа к среде ключевым моментом является предотвращение коллизий, поскольку данные сети не имеют явного механизма для их обнаружения. Основывающиеся на стандарте 802.11 беспроводные сети используют механизм, который называется "множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий" (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA). CSMA/CA представляет собой механизм "прослушивание перед передачей" (listen before talk, LBT) [1]. Передающая станция проверяет, присутствует ли в среде сигнал несущей и, прежде чем начать передачу, ожидает ее освобождения. Состояние среды определяет с помощью двух методов:

1. Проверка физического уровня PSY (уровня 1) на предмет наличия несущей.
2. Использование виртуальной функции контроля несущей, вектора распределения сети (network allocation vector, NAV). Это таймер, значение которого обновляется данными фреймов, передаваемых через среду. Станция обновляет значение вектора распределения сети только тогда, когда полученное значение поля продолжительности превышает таковое, хранимое в ее векторе распределения сети.

Реализация технологии CSMA/CA стандартом 802.11 осуществляется при помощи распределенной функции координации (distributed coordination function, DCF). Станция, которая намеревается осуществить передачу в беспроводной среде, должна вначале проверить, используется ли несущая. Если это так, станция должна отложить передачу до момента освобождения среды. Базовый алгоритм соединения для передачи данных содержит два действия: передачу фрейма данных от источника и передачу подтверждения приема (ACKnowledge, ACK) от получателя источнику сообщения. Для повышения надежности передачи данных имеется алгоритм с обменом четырьмя фреймами: AC-источник передает фрейм запроса передачи (Request to Send, RTS) и тем самым оповещает все AC в зоне радиовидимости о том, что происходит обмен информацией. Все станции, принявшие фрейм RTS, воздерживаются от передачи для исключения конфликтов. AC-получатель отвечает AC-источнику фреймом готовности к приему (Clear to Send, CTS). После приема фрейма CTS AC-источник передает фрейм данных, а AC-получатель после приема фрейма данных передает фрейм подтверждения приема (рис. 1).

Временная диаграмма передачи фреймов при реализации доступа к среде с использованием DCF представлена на рис. 2.

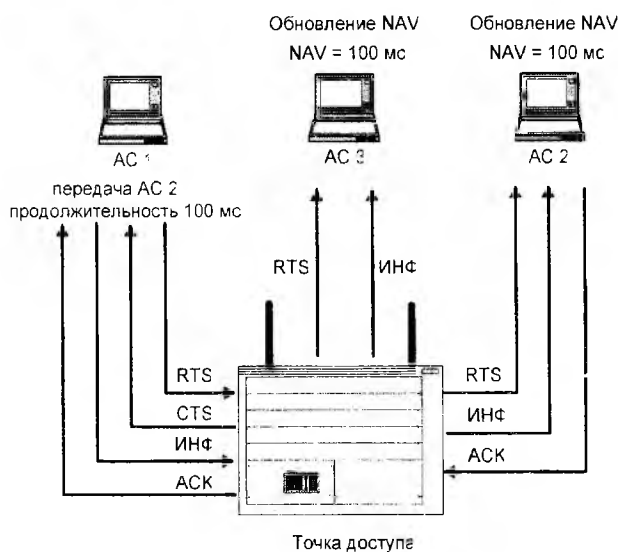


Рис. 1

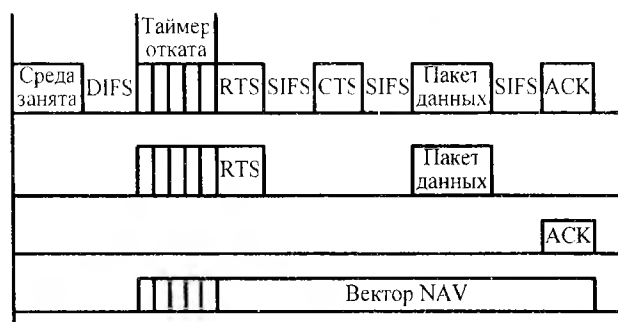


Рис. 2

Приняв CTS, станция STA1 также ждет интервал SIFS и начинает передачу информации, а STA2 подтверждает прием фрейма данных фреймом ACK. Фреймы подтверждения не принимают участия в процессе конкуренции станций за среду. Получив фрейм данных от STA1, станция STA2 ожидает интервал SIFS, который короче, чем интервал DIFS, что гарантирует принимающей станции наибольший шанс получения доступа к среде для передачи по сравнению с другими станциями.

CPN-модель сети Wi-Fi

С целью исследования пропускной способности беспроводной сети стандарта 802.11 была разработана ее модель, в которой реализован метод доступа CSMA/CA со всеми свойственными ему временными параметрами. Данная модель представляет собой иерархическую временную раскрашенную сеть Петри (CPN), состоящую из модели AC и модели точки доступа. Количество AC в разрабатываемой модели увеличивается путем клонирования необходимого количества подсетей, моделирующих AC.

Модель AC состоит из двух частей, которые представляют собой входной и выходной буферы абонентской станции. Графическое представление модели приведено на рис. 3.

Генерация фреймов осуществляется с помощью позиции Sender и перехода Generate. Сгенерированный фрейм представляет собой совокупность параметров (f, n, s, r, t, t_0, t_1), где f – тип фрейма (информационный – раск, подтверждение – ack), n – порядковый номер фрейма (нумерация сквозная для источника), s – номер AC-источника, r – номер AC-получателя, t – размер фрейма, t_0 – момент времени генерации фрейма, t_1 – момент времени

После того, как среда освободилась, станция STA1 ждет интервал DIFS (DCF inter-frame space) и включает таймер отката. Таймер отсчитывает случайное число, которое представляет собой количество канальных интервалов по стандарту 802.11, в течение которых станция, уже после освобождения среды должна воздерживаться от передачи. Данное случайное значение выбирается в пределах окна конкуренции CW (contention window), которое по умолчанию устанавливается производителем и хранится в памяти сетевой карты станции. Диапазон значений случайной задержки начинается с 0 и заканчивается максимальным значением $CW_{max}=7$. При каждой неудачной попытке доступа к среде станция, работающая по стандарту 802.11, увеличивает значение счетчика числа попыток и удваивает ширину окна конкуренции, пока она не достигнет значения $CW_{max}=255$.

После того, как значение таймера стало равным нулю, станция STA1 посылает фрейм RTS. Станция STA2, получив фрейм RTS от STA1, ждет интервал SIFS (short interframe space) и посылает фрейм готовности CTS.

WLAN от независимой международной организации IEEE являлся стандарт IEEE 802.11, в котором скорости устанавливались на уровне 1 и 2 Мбум/с. Данный стандарт определял архитектуру сети и вытекающие из этого требования к функциям устройств, принципы доступа устройств к каналам связи, формат пакетов передачи, способы аутентификации и защиты данных. В дальнейшем все новые стандарты обязательно были и будут совместимы с этим стандартом, поэтому данные физического уровня в них передаются со скоростью 1 или 2 Мбум/с.

С учетом особенностей процедур доступа к среде пропускная способность сети WiFi будет определяться следующим соотношением (см. рис. 2):

$$B = \frac{L_{\Sigma}}{T_{\Sigma}} = \frac{L_{RTS} + L_{CTS} + L_{И} + L_{ACK}}{T_{DIFS} + T_{CW} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{И} + T_{ACK} + 3T_{SIFS}}, \quad (1)$$

где L_{Σ} – объем передаваемых данных; T_{Σ} – время передачи данных; L_{RTS} – объем данных фрейма готовности передачи RTS, $L_{RTS} = 20$ байт; L_{CTS} – объем данных фрейма готовности приема CTS, $L_{CTS} = 14$ байт; $L_{И}$ – объем данных информационного фрейма, $L_{И} = 1024$ байт (в случае передачи данных) или $L_{И} = 1536$ байт (в случае передачи видео); L_{ACK} – объем данных фрейма подтверждения ACK, $L_{ACK} = 14$ байт; T_{DIFS} – длительность интервала DIFS, $T_{DIFS} = 50$ мкс; T_{CW} – длительность случайной задержки, устанавливаемой таймером отката, $T_{CW} = (0..CW_{max})T_{SIFS}$; T_{RTS} , T_{CTS} , $T_{И}$, T_{ACK} – длительности соответствующих фреймов с учетом физического уровня; T_{SIFS} – длительность интервала SIFS, $T_{SIFS} = 10$ мкс.

Длительность фреймов T_{RTS} , T_{CTS} , T_{ACK} с учетом физического уровня можно рассчитать по формуле

$$T = (L \cdot 8 + 192) / B_{PHY} \text{ [мкс]}, \quad (2)$$

где B_{PHY} – скорость передачи данных физического уровня, Мбум/с.

Длительность информационного фрейма $T_{И}$ с учетом физического уровня рассчитывается по формуле

$$T = 192 / B_{PHY} + L_{И} \cdot 8 / B_0 \text{ [мкс]}, \quad (3)$$

где B_0 – скорость передачи данных в сети WiFi, Мбум/с.

Поскольку T_{CW} является случайной величиной, аналитические расчеты позволяют только оценить максимальное значение пропускной способности сети WiFi B_{max} , при этом значение случайной задержки, устанавливаемой таймером отката, принималось равным минимальному, т.е. $T_{CW} = 0$. Анализ реальной пропускной способности сети B при различных значениях скорости передачи данных B_0 проводился путем имитационного моделирования с использованием разработанной модели и программного пакета CPN Tools. Результаты расчетов и проведенного моделирования в случае передачи данных и видео представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Скорость передачи данных физического уровня B_{PHY} принималась равной 1 Мбум/с.

Таблица 1

		Информационный фрейм	RTS	CTS	ACK	DIFS	SIFS	Всего	B_{max} , Мбум/с	B , Мбум/с
Время передачи, мкс	$B_0 = 1$ Мбум/с	8384	352	304	304	50	10	9424	0,91	0,9
	$B_0 = 2$ Мбум/с	4288	176	152	152	50	10	4848	1,77	1,75
	$B_0 = 5,5$ Мбум/с	1681	176	152	152	50	10	2241	3,83	3,74
	$B_0 = 11$ Мбум/с	937	176	152	152	50	10	1497	5,73	5,54
Объем данных, байт		1024	20	14	14	0	0	1072	-	-

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что реальная пропускная способность сети стандарта 802.11b B незначительно отличается от рассчитанного

теоретического максимального значения V_{\max} . Полученные значения пропускной способности ниже, чем заявленные стандартом скорости передачи данных в сетях WiFi.

Таблица 2

		Информационный фрейм	RTS	CTS	ACK	DIFS	SIFS	Всего	V_{\max} , Мбум/с	V , Мбум/с
Время передачи, мкс	$B_0 = 1$ Мбум/с	12480	352	304	304	50	10	13520	0,94	0,93
	$B_0 = 2$ Мбум/с	6336	176	152	152	50	10	6896	1,84	1,82
	$B_0 = 5,5$ Мбум/с	2426	176	152	152	50	10	2986	4,24	4,17
	$B_0 = 11$ Мбум/с	1309	176	152	152	50	10	1869	6,78	6,6
Объем данных, байт		1536	20	14	14	0	0	1584	-	-

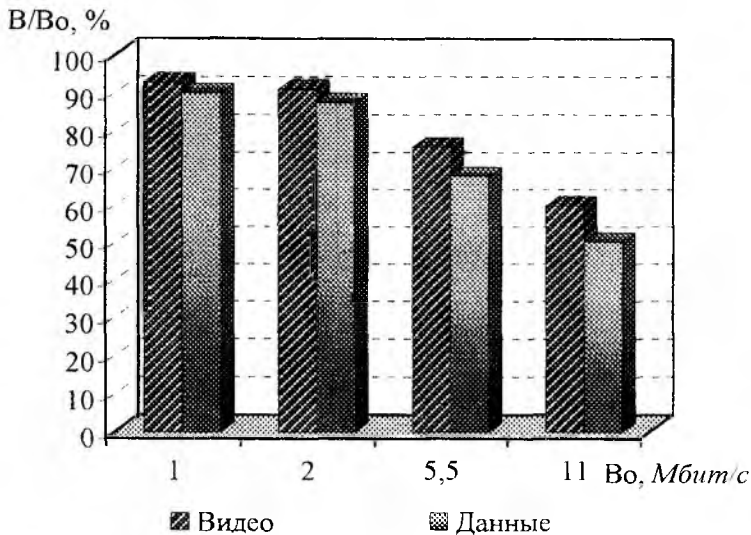


Рис. 5

Как показано на гистограмме, представленной на рис. 5, при скорости передачи данных $V_0 = 1$ Мбум/с реальная пропускная способность сети составляет не более 90 % от этого значения. Причем при увеличении скорости передачи до 11 Мбум/с реальная пропускная способность сети WiFi становится около 60 % от заявленной скорости при передаче видео и около 50 % при передаче данных. Разница в полученных значениях объясняется различной длиной фреймов, используемых для передачи видео и данных.

Полученные результаты показывают, что размер фрейма имеет тем большее значение, чем выше скорость передачи в сети. На рис. 6 представлены графики зависимости пропускной способности сети WiFi от размера передаваемых фреймов при различных значениях скорости передачи. Из полученных графиков можно сделать вывод о том, что для увеличения пропускной способности необходимо передавать фреймы большего размера.

Пропускная способность $V = 11$ Мбум/с, предусмотренная стандартом 802.11b, недостижима при сколь угодно большом значении размера фрейма. Результаты проведенного имитационного моделирования показали, что при скорости передачи $V_0 = 11$ Мбум/с с увеличении размера фрейма пропускная способность асимптотически приближается к значению 8 Мбум/с. Как было показано в проведенных ранее исследованиях, эта пропускная способность делится между всеми АС, одновременно работающими в зоне одной точки доступа.

Таким образом, при одновременной работе восьми АС допустимая скорость передачи данных станцией составляет 1 Мбум/с, в противном случае в сети наступает перегрузка.

Одним из важных временных показателей работы сети является также время ожидания получения доступа (интервал времени между моментом генерации пакета абонентской станцией и моментом начала его передачи). Поскольку для увеличения пропускной способности сети WiFi необходимо увеличивать размер передаваемых фреймов, в работе также было исследовано влияние размера фрейма на время ожидания получения доступа к среде.

Результаты проведенного исследования представлены на рис. 7.

В работе [5] уже было показано, что при отсутствии перегрузки в сети время ожидания доступа к среде не зависит от скорости передачи данных абонентской станцией, но растет с увеличением количества одновременно работающих станций.

Из графиков, приведенных на рис. 7 можно сделать вывод о том, что время ожидания доступа к среде также зависит от размера передаваемых фреймов, причем при условии отсутствия перегрузки в сети эта зависимость является линейной. Из данных графиков также

видно, что время ожидания доступа к среде возрастает тем резче, чем больше количество одновременно работающих абонентских станций.

Таким образом, результаты аналитических расчетов и имитационного моделирования показали, что с целью повышения пропускной способности беспроводных сетей стандарта 802.11 можно увеличивать размер информационных фреймов. При этом чрезмерное увеличение размера фрейма является нецелесообразным, так как выигрыш в пропускной способности при этом становится незначительным, время ожидания доступа к среде при этом возрастает пропорционально размеру информационного фрейма. Кроме того, потеря фрейма большего размера потребует повторной передачи большего объема данных. Из графиков, представленных на рис. 6 и 7 видно, что для каждого значения скорости передачи V_0 существует свое оптимальное значение размера фрейма. Так, при $V_0 = 1 \text{ Мбит/с}$ и $V_0 = 2 \text{ Мбит/с}$ оно составляет около 700...900 байт, при $V_0 = 5,5 \text{ Мбит/с}$ – около 1300 байт, а при $V_0 = 11 \text{ Мбит/с}$ – около 1700 байт.

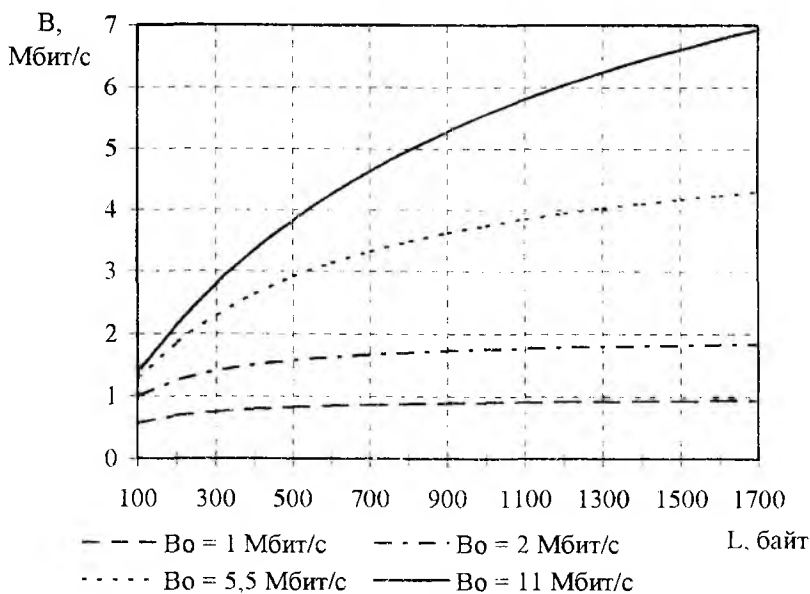


Рис. 6

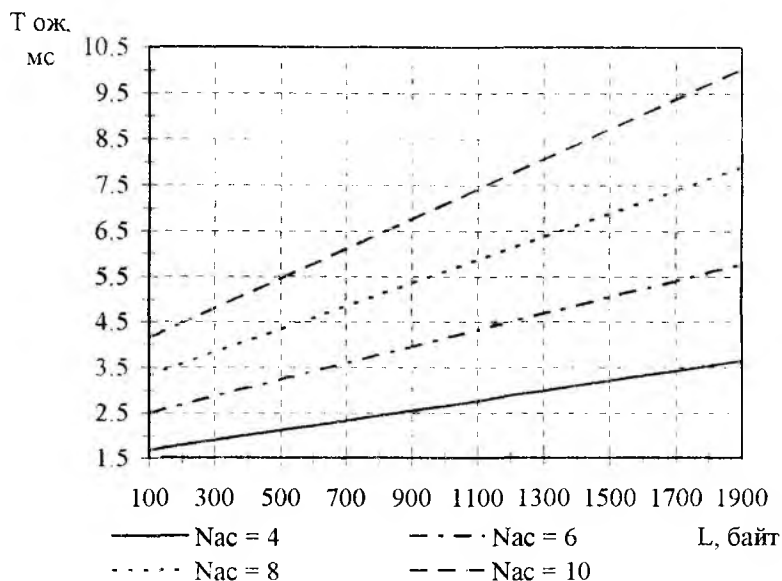


Рис. 7

Выводы

Предложена методика анализа пропускной способности беспроводных сетей стандарта 802.11, в основу которой положена модель сети, разработанная с использованием математического аппарата раскрашенных сетей Петри. В отличие от существующих моделей и методов в данной методике особое внимание уделено детальной проработке алгоритма доступа к среде CSMA/CA, применяемого в сетях WiFi. Разработанная модель позволяет исследовать не только пропускную способность сетей стандарта 802.11b, но и время ожидания получения доступа к среде при различном количестве одновременно работающих абонентских станций и различных характеристиках генерируемого ими трафика. Аналитические расчеты, имитационное моделирование и экспериментальные исследования на реальной WiFi-сети, состоящей из точки доступа и четырех абонентских станций, показали высокую сходимость полученных результатов, что подтверждает адекватность разработанной модели и методики.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Реальная пропускная способность беспроводных сетей стандарта 802.11 ниже теоретической, причем чем выше скорость передачи данных в сети, тем больше разница между теоретическим и реальным значением пропускной способности. Связано это в первую очередь с особенностями организации доступа к среде, а также с необходимостью передачи данных физического уровня с невысокой скоростью 1 или 2 Мбит/с, что обеспечивает совместимость различных стандартов серии 802.11. Так, реальная пропускная способность сети стандарта 802.11b составляет 5,54 Мбит/с при передаче данных и 6,6 Мбит/с при передаче видео, что составляет 50 и 60 % соответственно от теоретического значения 11 Мбит/с

2. Пропускная способность сетей WiFi зависит от размера передаваемых в ней информационных фреймов: чем больше размер фрейма, тем выше пропускная способность сети. При этом чем выше скорость передачи данных в беспроводной сети стандарта 802.11, тем большее значение имеет размер информационного фрейма. Так, увеличение фрейма с 500 байт до 1000 байт позволяет повысить пропускную способность сети WiFi с 2,9 Мбит/с до 3,75 Мбит/с при скорости передачи данных 5,5 Мбит/с, и с 3,83 Мбит/с до 5,55 Мбит/с при скорости передачи данных 11 Мбит/с. Однако при сколь угодно большом размере информационного фрейма реальное значение пропускной способности сети со скоростью передачи 11 Мбит/с не превышает 8 Мбит/с.

3. Время ожидания доступа к среде в беспроводных сетях стандарта 802.11 также зависит от размера информационных фреймов. При отсутствии перегрузки в сети с увеличением размера фрейма время ожидания доступа возрастает линейно, причем тем резче, чем больше количество одновременно работающих абонентских станций.

4. Чрезмерное увеличение размера информационных фреймов является нецелесообразным, так как выигрыш в пропускной способности при этом становится незначительным, а время ожидания доступа к среде при этом возрастает пропорционально размеру информационного фрейма. Кроме того, потеря фрейма большего размера потребует повторной передачи большего объема данных. Выбор размера информационного фрейма зависит от скорости передачи V_0 . Так, при $V_0 = 1$ Мбит/с и $V_0 = 2$ Мбит/с рекомендуется передавать фреймы длиной около 700...900 байт, при $V_0 = 5,5$ Мбит/с – около 1300 байт, а при $V_0 = 11$ Мбит/с – около 1700 байт.

Дальнейшим применением предложенной модели и методики может стать исследование характеристик сетей с методом доступа CSMA/CA при различных вероятностно-временных параметрах входных потоков, моделирование сетей с несколькими точками доступа, а также анализ пропускной способности и времени доступа к среде в условиях неидеального канала – при наличии помех и искажений.

Список литературы: 1. Рошан П., Лиэри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 304 с. 2. Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с. 3. Bononi L., Conti M., Donatello L. Design and Performance Evaluation of Distributed Contention Control (DCC) Mechanism of IEEE 802.11 Wireless Local Area Network // J. Parallel Distrib. Comput. 2000. №4. 4. Jensen K. Colored Petri Nets: basic concepts, analysis methods and practical use. Berlin: Springer, 1996. 234 с. 5. Коваленко Т.Н., Коваленко А.А. Исследование временных характеристик сетей с методом доступа CSMA/CA // 2-я Международная научная конференция «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», 27 сентября – 1 октября 2007 г.: Сб. материалов конференции. Харьков: ХНУРЭ, 2007. С.131–132.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.09.2007