

УДК 004.724.4

АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ AQRM С ОЦЕНКОЙ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ В ОЧЕРЕДИ СОСЕДНЕГО УЗЛА

М.В. Кавалеров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: mkavalerov@gmail.com

С.Н. Рыбникова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: svetich02@gmail.com

Ю.А. Шилова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: marissaspiritte@mail.ru

Ключевые слова: ad hoc сеть, маршрутизация, пакеты, алгоритм, обучение, время доставки.

Аннотация: Мобильные ad hoc сети могут динамически изменять свою топологию и системные параметры. Для них требуются эффективные способы маршрутизации, которые обеспечивают быструю доставку пакетов даже в случае высокой загруженности. Предложен алгоритм маршрутизации, который основан на схеме адаптивного Q-routing с расширением Full Echo. Этот алгоритм использует адаптивные коэффициенты обучения, схему случайного опроса (эхо), память маршрута и оценки времени ожидания в очереди соседнего узла. Предложенный подход позволяет уменьшить нестабильность времени доставки при высокой загруженности, а также повысить эффективность по критериям времени установления и максимального среднего времени доставки даже при изменениях топологии сети.

1. Введение

Мобильные ad hoc сети [1] являются сложными децентрализованными системами. Алгоритмы маршрутизации реализуют управление процессами передачи пакетов в такой сети за счет перенаправления пакетов (при необходимости) через промежуточные узлы на пути от источника к получателю. Эти алгоритмы должны обеспечивать высокую эффективность работы сети, в частности, время доставки пакетов при динамически изменяющейся топологии сети в условиях меняющейся загруженности. Обзор алгоритмов маршрутизации для ad hoc сетей можно найти в работах [2, 3]. Способы маршрутизации на основе обучения с подкреплением [4] могут эффективно работать в динамически изменяющихся условиях, и поэтому они эффективны для мобильных ad hoc сетей, например, как показано в обзоре [5]. Алгоритм Q-routing [6] – это метод маршрутизации, основанный на Q-learning [7], безмодельном методе обучения с подкреплением.

Алгоритмы семейства Q-routing используют методы обучения с подкреплением, которые позволяют улучшать производительность маршрутизации на основе только локальной информации, а также проходящих по сети пакетов, которые содержат косвенную информацию о глобальном состоянии сети. Также, эти методы позволяют обеспечивать баланс между изучением (exploration) и использованием (exploitation) во время процесса обучения с помощью изменения лишь нескольких параметров алгоритма маршрутизации. Вышеперечисленные особенности алгоритмов на основе Q-routing могут быть ключевыми для обеспечения максимально возможной эффективности маршрутизации для быстро меняющихся ad hoc сетей со сложной топологией. Такие сети, вероятно, будут иметь большой спрос в ближайшем будущем.

В работе [8] предложен алгоритм AQRERM, который на типовом примере сети превосходит другие известные алгоритмы, основанные на Q-routing. Предлагается модифицированный вариант этого алгоритма, названный AQyRERM. Отличительная особенность этого алгоритма в том, что для обновления Q-значения используется оценка времени ожидания пакета в очереди соседнего узла, обозначаемого y . В AQRERM вместо этого используется время, фактически затраченное пакетом при ожидании в очереди данного узла, обозначаемого x . Далее приводится краткое описание предлагаемого алгоритма, а также результаты сравнения его с другими алгоритмами на основе моделирования.

2. Предлагаемый алгоритм маршрутизации AQyRERM

Сеть состоит из узлов, которые могут рассматриваться как агенты, передающие пакеты своим соседям. В случае алгоритмов, основанных на Q-routing, решение о направлении передачи пакета основывается лишь на конечном адресате пакета и Q-значениях, хранящихся в так называемой Q-таблице, обычно используемой в Q-learning. Q-значения оценивают времена доставки до заданных конечных адресатов. Пусть Q-значение $Q_x(d,y)$ обозначает элемент Q-таблицы узла x на пересечении строки d и столбца y , где d соответствует конечному адресату пакета, а y обозначает соседа узла x . При этом $Q_x(d,y)$ рассматривается как оценка времени доставки пакета, предназначенного узлу d , с использованием соседнего узла y как прокси. Пакет, предназначенный для узла d и сформированный в узле s будет обозначаться $P(s,d)$. Стратегия Q-routing предполагает, что $P(s,d)$ отправляется соседу с наименьшим $Q_x(d,y)$ в строке d Q-таблицы. При передаче $P(s,d)$ узлу y , узел x получает обратно от y его оценку t для времени, которое будет затрачено для доставки пакета до узла d :

$$(1) \quad t = \min_{z \in N(y)} Q_y(d, z),$$

где $N(y)$ – это множество всех соседей узла y . Значение t определяется по правилу (1) на основе Q-значений узла y , обозначаемых $Q_y(d,z)$.

Затем $Q_x(d,y)$ обновляется согласно следующему правилу:

$$(2) \quad Q_x(d, y) = Q_x(d, y) + \eta \cdot (q + s + t - Q_x(d, y)),$$

где η – это коэффициент (скорости) обучения; q – это время, которое потрачено на нахождение в очереди узла x , s – это время, затраченное на передачу пакета от узла x узлу y .

В работе [8] приведены подробности дополнения алгоритма Q-routing до алгоритма AQRERM. Основными дополнениями являются: адаптивные коэффициенты обучения, схема случайного опроса (эхо), запоминание пакетом уже пройденных узлов (память маршрута). Эти дополнения существенно повышают эффективность маршрутизации [8].

В свою очередь, AQRERM предлагается дополнить тем, что в правиле обновления (2) выполняется замена q на q_y , где q_y – это оценка времени ожидания в очереди соседнего узла y . Такое правило обновления будет отличаться от (2) только параметром q_y . В дальнейшем, Q-routing с правилом обновления, где используется q_y вместо q , будет обозначаться Qy-routing. Замена q на q_y имеет большой эффект на среднее время доставки не только для Q-routing, но и для алгоритмов, порожденных от него, например, Dual Reinforcement Q-routing (DRQ-routing) [9], в случае применения q_y ему будет даваться название DRQy-routing. Однако, надо учитывать, что q_y – это оценка предполагаемого времени ожидания, а не время, уже затраченное в очереди, как в случае q . Поэтому q_y может быть оценено только приближенно, в общем случае. Это представляется основным недостатком использования q_y вместо q . В частности, изменения в скорости передачи по беспроводному каналу могут вносить непредсказуемые задержки в доставке пакетов, предшествующих данному, что может существенно повышать уровень неопределенности при оценивании q_y .

При этом значение q_y возвращается соседним узлом y вместе со значением t . Пусть $r_y(s)$ обозначает среднюю скорость передачи узлом y предшествующих данных с общим объемом s . Значение $q_{y,i}$, вычисляемое в ответ на получение i -го пакета узлом y , обозначается $q_{y,i}$ и рассчитывается следующим образом

$$q_{y,i} = s_{y,i} / r_y(s_{y,i}),$$

где $s_{y,i}$ – это суммарный объем пакетов в очереди узла y перед добавлением в эту очередь i -го пакета. Полученный алгоритм обозначается AQyRERM.

3. Результаты моделирования

Для экспериментальной оценки алгоритмов маршрутизации было использовано имитационное моделирование с помощью среды мультиагентного имитационного моделирования NetLogo. Разработка аналитических мер производительности алгоритмов на основе Q-routing является сложной задачей и может быть проведена в будущих исследованиях.

Здесь приводятся результаты моделирования для типового примера сети, представленного в работе [6] и в левой части рис. 1. При этом используется значение $\eta = 0.9$. Это значение, как и $\eta = 1.0$, в большинстве случаев обеспечивает наилучшую эффективность алгоритма Q-routing для многих вариантов загрузки по критериям времени установления и максимального среднего времени доставки [10].

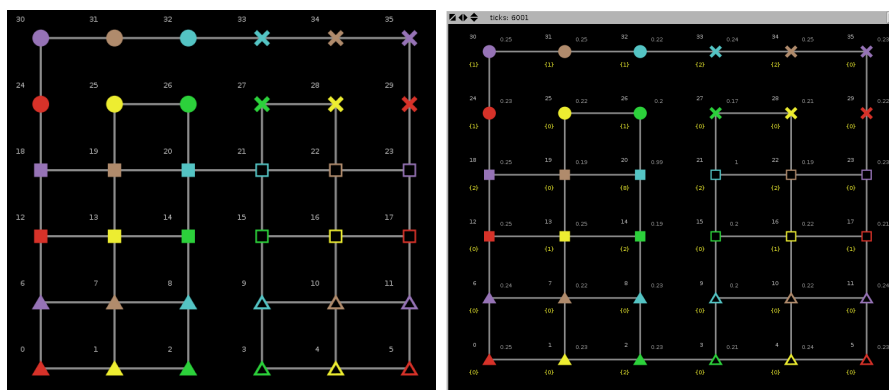


Рис. 1. Варианты топологий сети, используемой при моделировании. Слева показан основной вариант. Вариант, расположенный справа, используется в экспериментах, ре-

зультаты которых приведены на рис. 3 и 4 (выполняется динамическое переключение на этот вариант топологии).

Среднее время доставки усредняется по всем пакетам и обновляется с частотой равной 100 элементарным временным отрезкам («тикам»). Изначально все Q-значения устанавливаются в 0. Пакеты предназначены случайным узлам и генерируются в случайных узлах сети. Генерация пакетов происходит по Пуассоновскому распределению с параметром λ . Этот параметр также определяет загрузку сети. Например, $\lambda = 1$ соответствует низкой загрузке, а $\lambda \geq 3$ соответствует высокой загрузке, т.к., как показывают наши эксперименты, при $\lambda \approx 3.7$ сеть в большинстве случаев становится перегружена и алгоритмы маршрутизации уже не в состоянии найти эффективный маршрут.

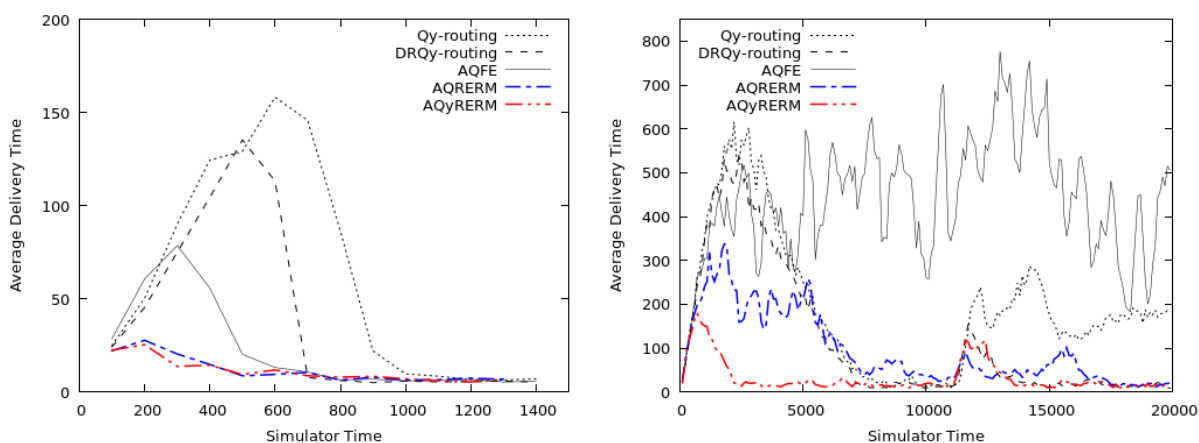


Рис. 2. Пример выполнения алгоритмов маршрутизации при низкой загруженности сети (слева) и при высокой загруженности (справа). По горизонтали – модельное время, по вертикали – среднее время доставки пакета. На правом графике в момент времени 11000 происходит переключение топологии сети на вариант, представленный справа на рис. 1.

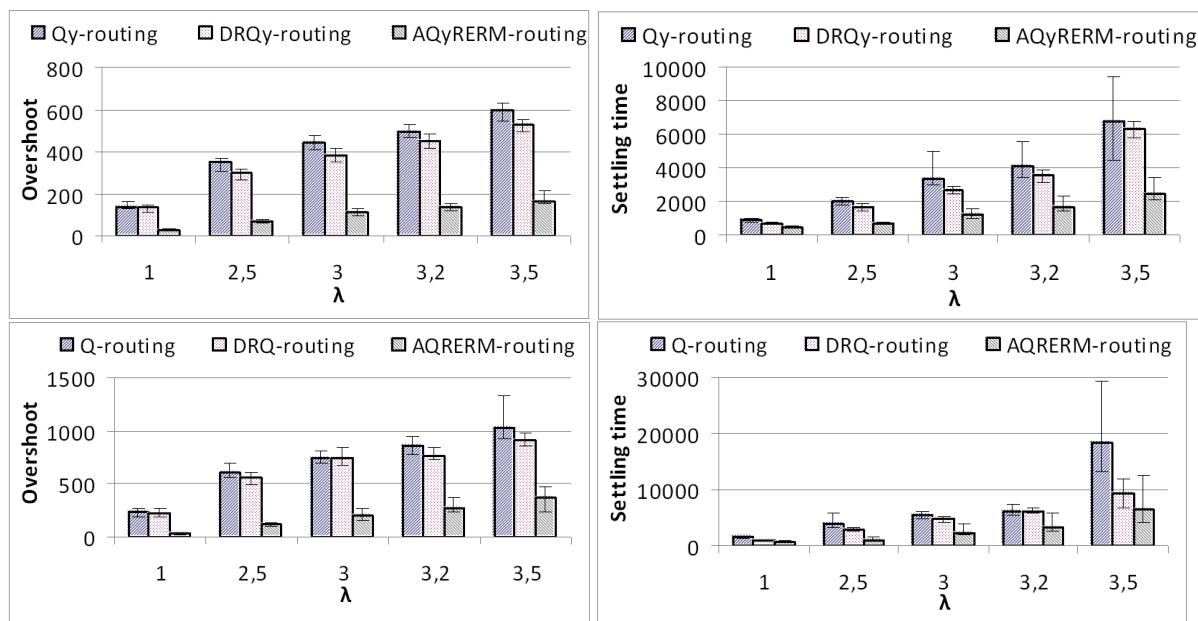


Рис. 3. Обобщенные показатели алгоритмов маршрутизации при разных загруженностях в виде медианы, а также минимального и максимального значения по 10 экспериментам для каждого значения λ . Слева – значение максимального среднего времени доставки (overshoot), справа – время установления (settling time).

На рис. 2 слева представлено сравнение алгоритмов маршрутизации при низкой загрузке. К ранее указанным алгоритмам также для сравнения добавляется алгоритм AQFE [11]. Для этого эксперименты были установлены следующие параметры $\lambda = 1$, $\eta = 0.9$, $\eta \cdot k = 0.5$, $L = 3$. В дальнейшем, используется значение $L = 3$, потому что оно дает наилучшие результаты в большинстве случаев, но очень близкие к результатам для $L = 5$. Смысл параметров k и L объясняется в работе [8]. Справа на рис. 2 представлены результаты моделирования при тех же параметрах и $\lambda = 3.5$. При этом в момент времени 11000 происходит переключение топологии сети на вариант, представленный справа на рис. 1.

На рис. 3 приведены обобщенные показатели алгоритмов маршрутизации. Столбиком показана медиана по результатам 10 экспериментов для каждого значения λ . При этом концы вертикальных отрезков обозначают минимальное и максимальное значение. Эти результаты получены в предположении, что скорость передачи между каждой парой узлов остается постоянной.

Также проведены экспериментальные исследования более сложных ситуаций для оценивания q_y , когда скорость передачи пакетов варьируется случайным образом. И в этих случаях предложенный алгоритм AQyRERM показал свое преимущество перед другими алгоритмами семейства Q-routing.

4. Заключение

Предложена модификация алгоритма маршрутизации AQRERM [8] под названием AQyRERM. Предложенный алгоритм показывает более высокую производительность, чем AQRERM, AQFE, Q-routing и DRQ-routing в условиях различной загрузки для примера сети, широко используемого в качестве типового теста. По результатам имитационного моделирования алгоритм AQyRERM значительно повышает стабильность времени доставки при высокой загрузке и повышает эффективность маршрутизации по критериям времени установления и максимального среднего времени доставки для различных вариантов загрузки, а также при изменениях топологии сети.

Список литературы

1. Haraty R.A., Traboulsi B. MANET with the Q-Routing Protocol // ICN The Eleventh International Conference on Networks. 2012.
2. Russell B. Learning-based route management in wireless ad hoc networks. PhD Thesis, New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey, 2008.
3. Hinds A., Ngulube M., Zhu S., Al-Aqrabi H. A review of routing protocols for mobile ad-hoc networks (MANET) // International Journal of Information and Education Technology. 2013. Vol. 3, No. 1.
4. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement learning: An introduction. Cambridge: MIT Press, 1998.
5. Chettibi S., Chikhi S. A Survey of Reinforcement Learning Based Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks // Recent Trends in Wireless and Mobile Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2011. P 1-13.
6. Boyan J.A., Littman M.L. Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement learning approach // Advances in Neural Information Processing Systems. 1994. P. 671-671.
7. Watkins C.J., Dayan P. Q-learning // Machine Learning. 1992. Vol. 8, No. 3-4. P. 279-292.
8. Kavalero M., Shilova Y., Likhacheva Y. Adaptive Q-Routing with random echo and route memory // 20th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). 2017. P. 138-145. URL: <https://fruct.org/publications/fruct20/files/Kav.pdf>
9. Kumar S., Miikkulainen R. Dual Reinforcement Q-Routing: An On-Line Adaptive Routing Algorithm. Artificial neural networks in engineering, 1997.

10. Шилова Ю.А., Кавалеров М.В. Исследование влияния параметра скорости обучения на результаты работы алгоритма маршрутизации Q-Routing // Инновационные технологии теория, инструменты, практика. Сб. трудов международной конференции. Пермь: ПНИПУ, 2015. С. 172-179.
11. Shilova Y., Kavalero M., Bezukladnikov I. Full Echo Q-routing with adaptive learning rates: a reinforcement learning approach to network routing // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). 2016. P. 341-344.