

# 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](mailto:mkavalerov@gmail.com)

**С.Н. Рыбникова**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29  
E-mail: [svetich02@gmail.com](mailto:svetich02@gmail.com)

**Ю.А. Шилова**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*  
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29  
E-mail: [marissaspiritte@mail.ru](mailto: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  $\eta$  – 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 (эхo), 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

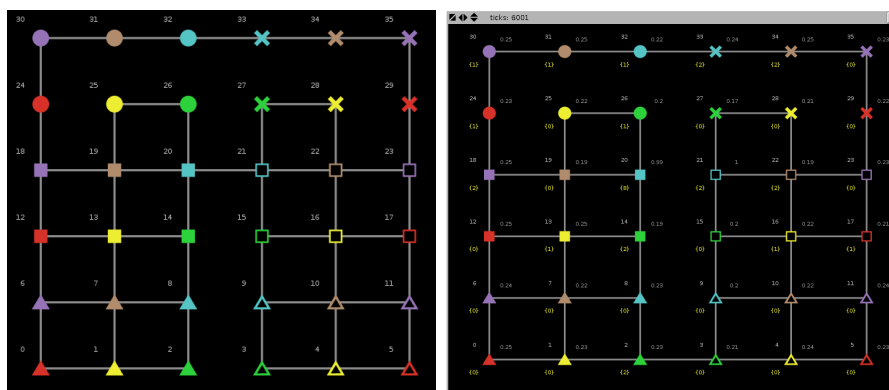
$$q_{y,i} = s_{y,i} / r_y(s_{y,i}),$$

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.

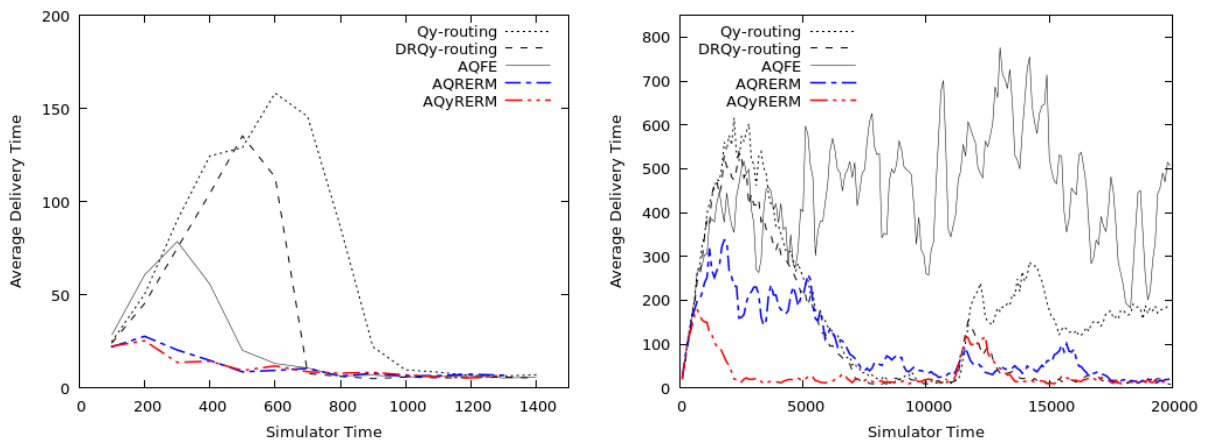
Здесь приводятся результаты моделирования для типового примера сети, представленного в работе [6] и в левой части рис. 1. При этом используется значение  $\eta = 0.9$ . Это значение, как и  $\eta = 1.0$ , в большинстве случаев обеспечивает наилучшую эффективность алгоритма Q-routing для многих вариантов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



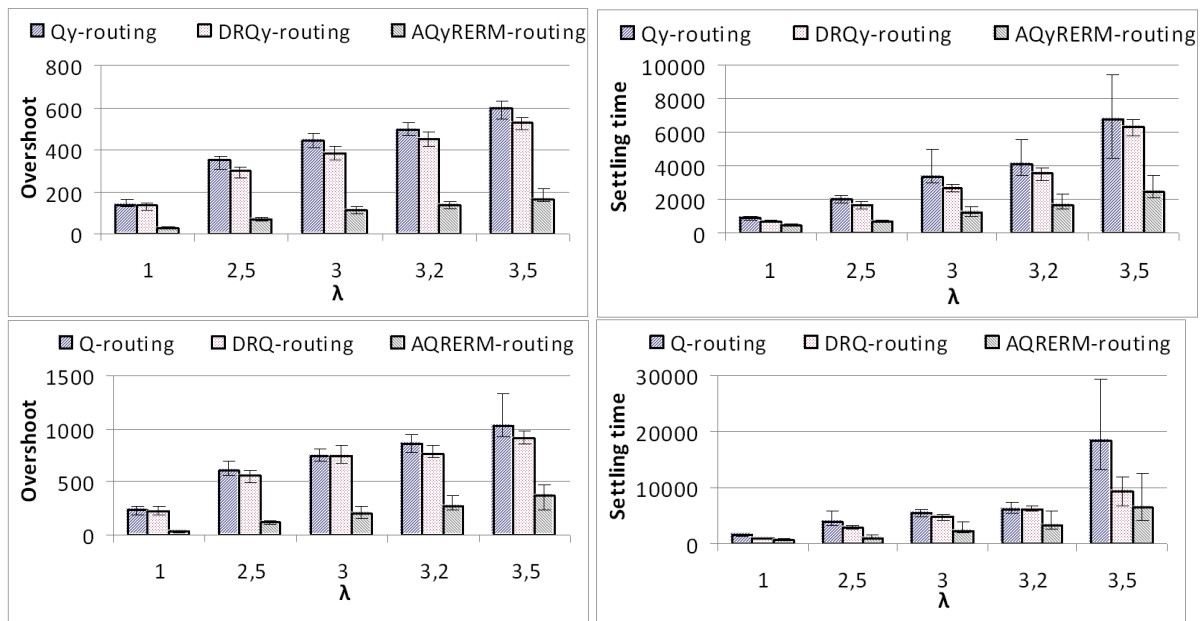
**Рис. 1.** Варианты топологий сети, используемой при моделировании. Слева показан основной вариант. Вариант, расположенный справа, используется в экспериментах, ре-

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  $\lambda$ . 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  $\lambda$ . 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  $\lambda$ . 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.