

УДК 004.057.4

Е.В. Щерба, Г.А. Литвинов, М.В. Щерба

Задача обеспечения качества обслуживания на базе протокола маршрутизации OLSR: подходы, алгоритмы, решения

Представлен обзор и выполнен анализ научных работ, направленных на решение задачи обеспечения качества обслуживания в рамках графо-комбинаторного подхода на базе протокола маршрутизации OLSR. Несмотря на значительное количество решений, базирующихся на единственном показателе, особый практический интерес представляют расширения протокола, учитывающие сразу несколько показателей качества маршрутов. Систематизированы существующие постановки задачи с обеспечением качества обслуживания по множеству показателей и проанализированы основные алгоритмические подходы к их решению. На основании проведенного исследования предложены перспективные направления для решения рассматриваемой задачи в новой, обобщенной, постановке.

Ключевые слова: многокритериальная маршрутизация, маршрутизация с ограничениями, самоорганизующиеся сети.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-1-55-65

Полносвязные, мобильные, сенсорные и другие типы динамически организуемых сетей с децентрализованной архитектурой регулярно находят применение в различных сферах гражданской и военной деятельности – технологии «умного дома», сети медицинского назначения, сети транспортной инфраструктуры, сети беспилотных летательных аппаратов и др. При этом распространение данных технологий зависит от эффективности решения некоторых ключевых задач. В частности, решение задачи обеспечения качества обслуживания (Quality of Service, QoS) в динамически организуемых сетях не может быть выполнено на основе моделей и алгоритмов, применяемых в сетях с традиционной архитектурой. Ресурсы узлов и характеристики каналов связи в динамически организуемых сетях, как правило, существенно ограничены, что принципиально усложняет решаемую задачу [1]. В то же время обеспечение QoS является обязательным условием для возможности использования значительного количества сетевых приложений, включая, например, мобильные системы телехирургии и различные службы потоковых видеотрансляций.

Протокол QoS-маршрутизации играет важную роль в схеме обеспечения QoS, поскольку именно он определяет оптимальный маршрут и передающие узлы, отвечающие предъявляемым требованиям. Поддержка качества обслуживания в рамках конкретного протокола производится по одному или одновременно по множеству разнотипных показателей (временных, скоростных и пр.). К традиционным показателям маршрутов и каналов связи можно отнести пропускную способность, задержку, джиттер, вероятность потери пакетов и стоимость передачи. Специфика динамически организуемых сетей определяет ряд новых показателей, включая мобильность, уровень безопасности, уровень остаточной энергии и энергии, затрачиваемой на передачу пакета.

Все маршрутные метрики, построенные на указанных показателях, можно отнести к одной из трех

групп: аддитивные, мультипликативные и вогнутые. Значение аддитивной метрики маршрута (например, возникающая задержка и стоимость) вычисляется посредством сложения значений данной метрики для всех каналов связи, составляющих маршрут. Значение мультипликативной метрики маршрута (например, вероятность потери пакетов) вычисляется как произведение значений данной метрики для всех каналов связи, составляющих маршрут. При этом можно использовать процедуру логарифмирования для преобразования мультипликативных метрик к аддитивным метрикам. Значение вогнутой метрики маршрута (например, уровень безопасности и пропускная способность) задается как наименьшее значение среди значений данной метрики для всех каналов связи, составляющих маршрут.

Протокол маршрутизации OLSR, получивший широкое распространение в динамически организуемых сетях с высокой плотностью и низкой мобильностью узлов, согласно спецификациям не предусматривает механизмов поддержки качества обслуживания [2]. В рамках протокола каждый узел осуществляет среди соседних узлов оптимальный выбор подмножества шлюзов MPR (Multipoint Relay), обеспечивающих возможность взаимодействия со всеми узлами в пределах двух переходов. Каждый MPR-шлюз выполняет широкоэвентальную рассылку сообщений TC (Topology Control), в которых содержатся объявления маршрутов ко всем узлам-селекторам, выбравшим данный узел в качестве шлюза MPR. Все MPR-шлюзы выполняют пересылку сообщений TC своим узлам-селекторам. Каждый узел заполняет базу данных сетевой топологии на основе полученных сообщений HELLO и TC, которую в дальнейшем использует для поиска оптимальных маршрутов до всех получателей по установленной маршрутной метрике.

Архитектура и достоинства базового протокола OLSR способствовали разработке множества различных модификаций этого протокола, обеспечивающих поддержку QoS в том или ином виде. Мно-

гие из предложенных решений обеспечивают поддержку качества обслуживания на базе OLSR только по единственному показателю, в рамках некоторых других работ учитывается сразу несколько показателей качества маршрутов. При этом в существующих исследованиях могут рассматриваться различные постановки проблемы и применяемые алгоритмы для её решения.

Таким образом, основная цель настоящей работы заключается в исследовании и анализе существующих решений задачи обеспечения QoS на базе протокола маршрутизации OLSR в целях определения перспективных подходов и алгоритмов для решения указанной задачи в новой, обобщенной, постановке.

Расширения протокола OLSR с обеспечением QoS по одному показателю

В настоящем разделе статьи проанализированы модификации и расширения протокола маршрутизации OLSR, обеспечивающие поддержку QoS только по одному показателю.

В рамках протокола OLSR энергосберегающие решения либо предлагают минимизировать энергопотребление узлов, либо обеспечить максимальный срок возможности сетевого взаимодействия. Первая категория решений связана с модификацией алгоритма выбора шлюзов MPR, используемого в рамках OLSR. Цель данной модификации состоит в том, чтобы в качестве шлюзов MPR выбирать узлы с высоким уровнем остаточной энергии.

В работе [3] авторы предложили два механизма выбора MPR под названием E-OLSR1 и E-OLSR2. Они используют уровень остаточной энергии соседних узлов и энергетическую стоимость отправки пакетов в качестве показателя для выбора MPR.

EE-OLSR представляет расширение OLSR с модификацией механизма выбора шлюзов MPR [4]. В рамках EE-OLSR предлагается интегрировать стоимость энергии в параметр готовности узла, определенный в RFC3626, чтобы выразить способность узлов стать шлюзом MPR. Оценка потребления энергии и уровня остаточной энергии на каждом узле выполняется локально до ее передачи в остальную сеть посредством распространения значения готовности. Два преимущества этого подхода: использование времени жизни узла, которое дает более точное представление о статусе узла, и распространение информации с помощью параметра готовности, что не требует генерации дополнительного трафика.

Проблема, характерная для всех подобных расширений, заключается в том, что они не учитывают максимальную степень узлов, выбранных шлюзами MPR. Фактически как только узел проявляет высокую остаточную энергию, согласно модифицированному алгоритму MPR, узел будет добавлен в список MPR, что впоследствии может привести к значительному объему широковещательного трафика.

Ещё одна проблема, связанная с указанными расширениями, заключается в том, что они не учитывают количество передаваемых узлом данных, что

может привести к быстрому энергетическому истощению даже при высоком уровне остаточной энергии в момент выбора шлюзов MPR. В работе [5] авторы предложили объединить мобильность и уровень остаточной энергии в параметре готовности. В качестве MPR алгоритм выбирает стабильные узлы с большим оставшимся временем жизни. Сочетание двух указанных показателей позволяет несколько повысить эффективность по сравнению с другими подходами, использующими единственную энергетическую метрику.

Вторая категория решений позволяет учитывать метрику энергии в процессе выбора маршрута доставки пакетов. В рамках OLSRE авторы предложили улучшенную версию энергоэффективной маршрутизации на основе OLSR [6]. В OLSRE потребление энергии учитывается во время маршрутизации пакетов и вычисляется стоимость передачи пакетов по маршруту до получателя. Однако этот протокол имеет высокие накладные расходы и не учитывает уровень остаточной энергии узлов.

OLSR_EA измеряет и прогнозирует потребление энергии на каждый временной интервал на основе модели авторегрессионного скользящего среднего для прогнозирования временных рядов [7]. Авторы разработали композитную энергетическую метрику стоимости, которая учитывает потребление энергии в процессе передачи пакетов и остаточную энергию каждого узла, и используют данную метрику в качестве основной при выборе маршрутов. Но при этом OLSR_EA характеризуется более высокой вероятностью коллизий сигнала, если узел ретрансляции обладает большим радиусом распространения сигнала по сравнению с соседними узлами, поэтому он не является предпочтительным в больших сетях.

В рамках OLSRM авторы предложили новый протокол [8], основанный на исходном стандарте OLSR. Они использовали многопутевую версию протокола OLSR и концепцию маршрутизации источника для выбора маршрута. Протокол должен быть энергоэффективным за счёт выбора маршрутов через соседние узлы на основе уровня остаточной энергии узлов и скорости её потребления. Предлагаемый алгоритм радикально изменяет исходный OLSR, при этом основной недостаток заключается в высоком времени ожидания установления маршрута.

Пропускная способность является критическим показателем производительности сети. Оценка пропускной способности сети в заданный момент времени и в определенной части сети сложна, так как среда совместно используется множеством узлов в беспроводной сети. Доступная пропускная способность между двумя соседними узлами определяется как максимальный объем полезных данных, который может быть передан в единицу времени между этими двумя одноранговыми узлами без нарушения существующих сетевых потоков данных. Как и энергетическая метрика, пропускная способность является вогнутой метрикой. Для заданного маршрута пропускная способность определяется как

минимальное значение пропускной способности для всех каналов связи, образующих маршрут от узла источника до узла назначения.

Схемы OLSR_R1, OLSR_R2 и OLSR_R3 представляют три пересмотренных алгоритма выбора MPR с использованием метрики пропускной способности [9]. Для OLSR_R1 выбор MPR почти такой же, как и для OLSR. Однако в случае, когда имеется более одного соседа, охватывающего одно и то же количество неохваченных соседей, достижимых за 2 перехода, тот, который имеет максимальную пропускную способность до текущего узла, выбирается как MPR. В рамках OLSR_R2 в качестве MPR отбираются соседние узлы с максимальной пропускной способностью до тех пор, пока не будут охвачены все узлы, достижимые за 2 перехода.

Что касается OLSR_R3, то речь идет о выборе MPR таким образом, чтобы все узлы, достижимые за 2 перехода, имели маршрут через MPR к текущему узлу с максимальной пропускной способностью. В целях оптимизации объема широковещательных сообщений OLSR_R3 является предпочтительным, поскольку обеспечивает оптимальное количество MPR. Однако OLSR_R1 и R2 действительно оптимальны в отношении надежности канала. OLSR_R2 имеет меньше накладных расходов, чем OLSR_R3. Кроме того, OLSR_R2 проще в реализации по сравнению с OLSR_R3. Для всех расширений цель состоит в том, чтобы ввести пропускную способность в качестве основной метрики при выборе маршрута.

Предложенная модификация затрагивает проблему асимметричных связей в беспроводных сетях, поскольку узлы, изначально выбранные как шлюзы MPR, в дальнейшем используются для формирования маршрутов, используемых в процессе маршрутизации. Большинство подходов, использующих пропускную способность в качестве основного критерия для QoS, пренебрегают влиянием помех, что не всегда верно. Получаемые результаты могут сильно зависеть от процедуры оценки пропускной способности канала (пассивной, активной или аналитической).

Чтобы разрешить проблему помех при оценке пропускной способности, в [10] предлагаются формула интерференции и новый протокол маршрутизации по множеству непересекающихся путей LIA-MPOLSR. Наибольшее отличие LIA-MPOLSR от других протоколов многопутевой маршрутизации на базе OLSR заключается в том, что LIA-MPOLSR вычисляет интерференцию, принимая во внимание географическое расстояние между узлами, а не число переходов.

С появлением приложений реального времени в беспроводных сетях все чаще требуется гарантированный уровень максимальной задержки. Чтобы обеспечить поддержку чувствительного к задержкам трафика в таких сетях, точная оценка задержки является необходимым шагом. Задержка указывает время отправки пакета от источника к целевому узлу. Задержка является аддитивной метрикой. Таким

образом, задержка для маршрута равна сумме задержек в каналах связи, образующих этот маршрут.

Ограничение задержки в OLSR представлено и смоделировано в [11], авторы аналитически изучают различные методы оценки задержки в беспроводных каналах. Они указывают на проблему синхронизации между отправителем и получателем в архитектуре самоорганизующихся сетей, особенно при использовании широковещательного пакета для оценки среднего времени передачи. В OLSR управляющие пакеты передаются с джиттером во избежание возможных столкновений из-за проблемы синхронизации. Этот джиттер необходимо учитывать при использовании этих пакетов для оценки средней задержки передачи в канале связи.

Авторы [12] предлагают OLSR_ETX, специальное расширение OLSR, которое использует новый аддитивный показатель качества – ожидаемое число отправленных пакетов (Expected Transmission Count, ETX) для корректной передачи заданного числа пакетов. Каждый узел независимо измеряет ETX для локальных каналов. Выбор маршрута производится таким образом, чтобы совокупное значение показателя было минимизировано. В развитие указанного подхода был предложен ещё один сложный показатель качества – ожидаемое время передачи (Estimated Transmission Time, ETT), значение которого зависит от пропускной способности каналов и возникающих задержек одновременно.

В рамках расширения OLSR_NN авторы используют нейронную сеть для прогнозирования задержек [13]. Чтобы обеспечить использование прогнозируемых задержек при расчете таблицы маршрутизации, авторы разработали алгоритм, называемый TierUp, который представляет собой модификацию алгоритма Дейкстры [14]. Чтобы упростить оценку задержки, они рассматривают простейшую модель очереди, предполагая, что все узлы имеют общий всенаправленный радиоканал с фиксированной номинальной пропускной способностью и каждый узел использует простую очередь FIFO для всех исходящих пакетов, что не является точным в реальной беспроводной передаче. На самом деле управляющие пакеты имеют приоритет над пакетами данных, что может снизить показатели OLSR_NN в практической реализации.

В этом же контексте можно сослаться на расширение OLSR-MD [15], который предполагает измерение задержек связи между узлами. Расчёт задержек производится через самоорганизующуюся сеть. Поэтому все вычисления таблиц маршрутизации основаны на информации от соседних узлов. OLSR-MD производит выбор таких маршрутов между текущим узлом и другими узлами в сети, которые имеют минимальную сумму различных задержек передачи для всех составляющих каналов связи.

Поддержка мобильности остается одной из самых сложных проблем в архитектуре самоорганизующихся сетей, особенно для протоколов маршрутизации. Проактивный характер протокола маршру-

тизации OLSR делает его пригодным для плотных и менее мобильных сетей. Быстрое расширение протокола OLSR может быть основано на дифференциации поведения мобильных и стационарных узлов. Мобильный узел может переходить в подвижное состояние, где алгоритм выбора MPR легко определяется для эффективного управления перемещением узлов [16]. Механизм для прогнозирования подвижности узлов может быть построен на специальной математической модели. Её суть заключается в вычислении координат и скоростей узлов для построения глобального представления графика мобильности соседних узлов.

Авторы в [17] вводят идею использования времени жизни канала связи в качестве метрики мобильности для выбора шлюзов MPR. Такой подход достаточно прост в реализации и не требует какого-либо расширения заголовка управляющих пакетов OLSR, в чем состоит его преимущество. Однако оценка остается локальной, если узлы не обмениваются информацией о состоянии мобильности соседних узлов. Авторы изменили процесс выбора MPR, чтобы обеспечить выбор стационарных узлов.

Аналогичным образом можно изменить вспомогательный функционал протокола OLSR, чтобы осуществлять учет мобильности узлов. Задача состоит в том, чтобы обеспечить обмен между соседними узлами показателями мобильности (стабильности), которые используются в эвристическом выборе шлюзов MPR. Основным принципом такого подхода является возможность определения неустойчивости маршрута на основе статуса канала связи. Однако несовместимость подобного подхода со стандартом OLSR является препятствием перед его практическим развертыванием в реальных сетях, где различные узлы могут участвовать в единой схеме связи. Помимо этого, распространение информации QoS внутри сети связано с добавлением дополнительных полей в управляющие пакеты, при этом размер передаваемых данных будет пропорционально расти с увеличением плотности сети.

Важно отметить, что в целом единственный показатель качества обслуживания является существенным ограничением для практического применения рассмотренных выше модификаций протокола маршрутизации OLSR. Таким образом, что задача обеспечения качества обслуживания, как правило, требует рассмотрения совокупности маршрутных метрик.

Подходы к обеспечению QoS с использованием множества маршрутных метрик

В зависимости от конкретной модели обеспечения качества обслуживания на базе множества маршрутных метрик могут рассматриваться различные постановки алгоритмических задач и способы их решения.

Простейший подход, позволяющий учитывать множество показателей качества маршрутов, заключается в разработке и использовании единой комбинированной аддитивной метрики, объединяющей в себе

все возможные или некоторые из рассмотренных выше показателей качества маршрутов. Несмотря на относительную простоту указанного подхода, следует заметить, что он обеспечивает доставку с «максимальными усилиями» (best-effort delivery) и не соответствует концепциям обеспечения QoS, а предлагаемое решение может не отвечать ни единому ограничению по требуемому качеству обслуживания.

Задача поиска подходящих маршрутов с множественными ограничениями

Классическая задача поиска маршрутов, удовлетворяющих множеству требований к качеству обслуживания, формулируется следующим образом. Пусть задано множество вершин графа V , соответствующее множеству взаимодействующих узлов сети, множество дуг графа E , соответствующее множеству каналов связи, в множестве V заданы специальные вершины s и t (узел источника и узел назначения соответственно). Для каждой дуги e назначено значение аддитивной метрики стоимости $c(e)$ и значения k специальных метрик, характеризующих канал связи. Для каждой i -й метрики w_i задана функция f_i , предназначенная для вычисления значения метрики пути на основе значений метрики для дуг, составляющих этот путь:

$$f_i(p) = f_i(w_i(e_0), w_i(e_1), \dots, w_i(e_{h-1})). \quad (1)$$

Также задан кортеж ограничений $L = (l_1, \dots, l_k)$ по соответствующим маршрутным метрикам, отражающий требования к маршруту, который необходимо найти. Путь между узлом источника s и узлом назначения t называется подходящим (другими словами, маршрут удовлетворяет предъявляемым требованиям), только если значения всех рассматриваемых метрик данного пути не выходят за пределы соответствующих метрикам ограничений, раскрывающих требования к качеству обслуживания:

$$f_i(p) \leq l_i, \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

Задача MCP (Multi-Constrained Path) заключается в том, чтобы для заданной пары вершин найти хотя бы один подходящий путь, а для решения задачи MCOP (Multi-Constrained Optimal Path) требуется для заданной пары вершин найти подходящий путь с наименьшей стоимостью [18]. Рассматриваемые задачи могут иметь только одно решение, могут иметь несколько различных решений, а также могут не иметь решений, если не существует маршрута, удовлетворяющего сразу всем ограничениям.

В общем случае поиск маршрута с учетом ограничений по двум или большему числу различных аддитивных метрик является NP-полной задачей. Тем не менее для решения указанных задач был предложен ряд эвристических алгоритмов, позволяющих оптимизировать поиск подходящего решения, и несколько приближенных алгоритмов, позволяющих осуществлять поиск решений, подходящих с некоторой погрешностью. Указанные алгоритмы рассмотрены в следующем разделе настоящей статьи.

В связи с тем, что в динамически организуемых сетях общее количество различных показателей ка-

чества маршрутов и соответствующих им ограничений возрастает, задачи поиска подходящих маршрутов МСР и МСОР значительно усложняются. Кроме того, если количество ограничений слишком велико, задача может не иметь решений, поскольку становится переограниченной (over-constrained). В результате в каждом случае требуется вначале выяснить, имеются ли решения задачи вообще (что представляет отдельную задачу), а затем нужно решить, какие из ограничений ослабить, чтобы задача стала разрешимой [19]. Исходя из этого, описанный подход к поиску маршрутов редко используется напрямую в протоколах маршрутизации более чем с двумя ограничениями.

В работе [20] рассматриваются два показателя качества маршрутов и предлагается расширение протокола OLSR, основанное на приближенном поиске маршрута с минимальной задержкой в условиях заданного ограничения на потери пакетов (что соответствует задаче Restricted Shortest Path, RSP).

Задача поиска оптимального маршрута по множеству критериев

Приемлемой на практике альтернативой поиску маршрутов с множественными ограничениями является многокритериальная маршрутизация без заданных ограничений [21]. В рамках указанной задачи требуется найти решение (маршрут), позволяющее минимизировать значения рассматриваемых целевых функций (маршрутных метрик).

Поскольку минимизировать значения всех целевых функций одновременно, как правило, невозможно, часто многокритериальные задачи решаются посредством принятия схемы компромисса между критериями, что предполагает решение вместо многокритериальной задачи одной или нескольких однокритериальных задач в результате свертки критериев. Результат решения напрямую зависит от выбранного способа свертки, поэтому его выбор имеет определяющее значение. Такой подход используется, например, в рамках протокола маршрутизации OLSR_MO (Multi-Objective OLSR) [22]. Авторы прогнозируют значения трех показателей каналов (задержка, потребление энергии, время жизни), производят аддитивную свертку критериев и вычисляют оптимальные маршруты по полученному критерию, используя модифицированный алгоритм Дейкстры.

Аналогичный подход применяется для построения многопутевой версии протокола FQ-MP-OLSR в [23], где в качестве маршрутных метрик применяются задержка, полезная пропускная способность и уровень помех.

В работе [24] авторы использовали пропускную способность, задержку и коэффициент потерь пакетов для создания композитной маршрутной метрики, применяемой для поиска оптимальных маршрутов. В то же время выбор шлюзов MPR производится на основе показателей мобильности и относительного уровня остаточной энергии узлов.

Помимо свертки критериев, может рассматриваться поиск всех эффективных решений (опти-

мальных по Парето) [21]. Решение p является оптимальным по Парето, если не существует другого решения p^* , которое превосходит p хотя бы по одному критерию, а по остальным критериям не хуже

$$\begin{aligned} f_i(p^*) &\geq f_i(p), \quad \forall i \in [1, k], \\ \exists j \in [1, k] : f_j(p^*) &> f_j(p). \end{aligned} \quad (3)$$

В противном случае говорят, что решение p^* доминирует решение p . Как правило, существует несколько недоминируемых решений, образующих множество оптимальных по Парето решений, которые формируют Парето-фронт в области значений целевых функций. Для выбора оптимального маршрута требуется найти максимально возможное количество Парето-оптимальных решений и на основе анализа значений целевых функций выбрать одно из них, используя определенный процесс принятия решений (рис. 1).

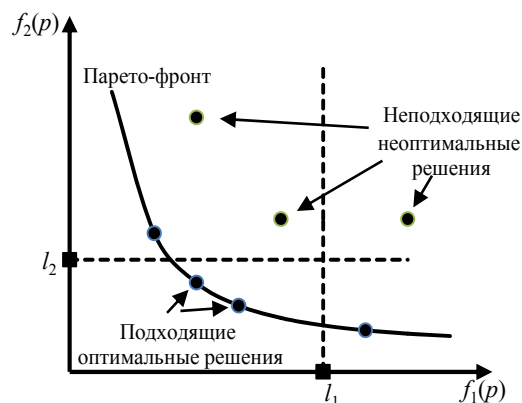


Рис. 1. Пример наличия двух подходящих недоминируемых решений в задаче с двумя маршрутными метриками

Подобный подход, реализован, например, в [25], где рассматривается три показателя качества маршрутов (ETX, задержка, потери пакетов), а для выбора оптимального маршрута среди множества альтернатив используется метод анализа иерархий.

Если маршрутные метрики можно ранжировать, исходя из их важности, в этом случае оптимизация проводится по лексикографическому порядку. Каждой маршрутной метрике назначается приоритет, который определяет порядок, в котором соответствующие функции будут оптимизированы. Благодаря иерархии среди критериев появляется возможность решать лексикографические задачи последовательно, минимизируя на каждой итерации по одному критерию и используя оптимальные значения критериев, полученные в ходе предыдущих итераций, как ограничения. Для получения набора эффективных решений процедура поиска решений может производиться многократно, используя различный лексикографический порядок.

Задача поиска подходящих маршрутов с множественными мягкими ограничениями

Вместе с тем следует учитывать, что полный отказ от задаваемых ограничений не всегда является возможным. Решение рассматриваемой проблемы обеспечения качества обслуживания в динамически

организуемых сетях возможно на основе протоколов «мягкой» QoS-маршрутизации, которые способны за приемлемое время предоставлять один или несколько маршрутов, «наилучшим» образом отвечающих предъявляемым требованиям, даже если маршрута, отвечающего сразу всем требованиям, не существует. Для создания таких протоколов может рассматриваться специальная обобщенная постановка проблемы поиска оптимального пути с множественными ограничениями для переограниченных случаев.

Суть предлагаемого подхода заключается в том, чтобы признать часть ограничений «мягкими» и обобщить МСР и МСОР как задачи поиска маршрутов, удовлетворяющих максимальному количеству «мягких» ограничений и всем «жестким» ограничениям одновременно [26]. Даже в тех случаях, когда решения исходной задачи МСОР по всем ограничениям не существует, в рамках решения задачи в новой обобщенной постановке можно найти «наиболее подходящее» решение. В частном случае, когда все ограничения являются «мягкими», задача именуется как MAX-МСОР, в частном случае, когда все ограничения будут «жесткими», задача представляет классическую задачу МСОР. Поскольку сформулированная задача является обобщением задачи МСОР, она также является NP-полной.

Учитывая количество оптимизируемых показателей качества маршрутов и количество рассматриваемых ограничений, можно привести следующую классификацию алгоритмических задач, рассматриваемых в рамках обеспечения маршрутизации с поддержкой QoS (таблица).

Различные постановки задач QoS-маршрутизации

Задача	Количество оптимизируемых показателей	Количество ограничений
SP (Shortest Path)	1	0
RSP (Restricted Shortest Path)	1	1
MCP (Multi-Constrained Path)	0	k
MCOP (Multi-Constrained Optimal Path)	1	k
MOOP (Multi-Objective Optimal Path)	k	0^*
MAX-MCOP (Maximum Multi-Constrained Optimal Path)	1	$0...k^{**}$

* Возможно введение дополнительных ограничений по некоторым показателям.

** Требуется найти решение, удовлетворяющее максимально возможному количеству ограничений.

Алгоритмы решения задач поиска подходящих маршрутов

Несмотря на то, что классические алгоритмы Дейкстры [14] и Беллмана–Форда [27] обеспечивают поиск оптимального решения только по одному по-

казателю, они широко используются при построении других алгоритмов решения всех вышеуказанных задач. Подробное описание возможностей применения этих алгоритмов можно найти в [21].

Один из первых алгоритмов для решения проблемы МСОР был предложен в [28]. Автор предложил использовать композитную метрику стоимости маршрута, определяемую на основе заданных показателей и ограничений:

$$f(p) = \sum_{i=1}^k \frac{f_i(p)}{l_i}. \quad (4)$$

Наличие единственной метрики позволяет применить известные алгоритмы поиска кратчайшего пути и их всевозможные расширения. Проблема заключается в том, что найденный путь с минимальным значением стоимости не всегда является решением рассматриваемой задачи, поскольку значения некоторых из его маршрутных метрик могут лежать за пределами заданных ограничений (рис. 2).

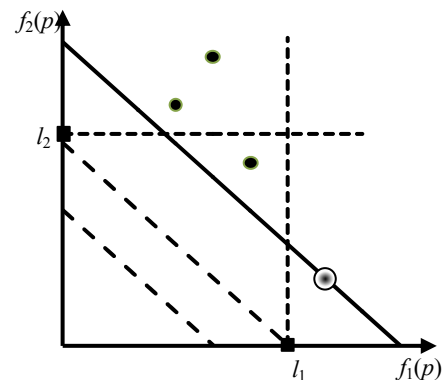


Рис. 2. Пример нахождения неподходящего пути (при наличии подходящего) в задаче с двумя ограничениями

Развитие указанного подхода было предложено в рамках точного алгоритма SAMCRA [29]. Авторы работы предложили использовать нелинейную композитную метрику стоимости:

$$f(p) = \max_{1 \leq i \leq k} \left(\frac{f_i(p)}{l_i} \right). \quad (5)$$

Идея применения нелинейной метрики стоимости представлена на рис. 3. В идеальном случае поиск должен производиться таким образом, чтобы исключить выбор решений за пределами ограниченной области и тем самым избегать случаев, представленных на рис. 2.

Проблема заключается в том, что при использовании нелинейной метрики стоимости каждый подпуть кратчайшего пути не обязательно является кратчайшим путём, что не позволяет использовать алгоритм Дейкстры для поиска кратчайшего пути по данной метрике. Для решения указанной проблемы авторы алгоритма предлагают сохранять в очереди для каждой вершины все недоминируемые и отбрасывать все доминируемые пути, что позволит в конечном итоге получить решение, если оно существует.

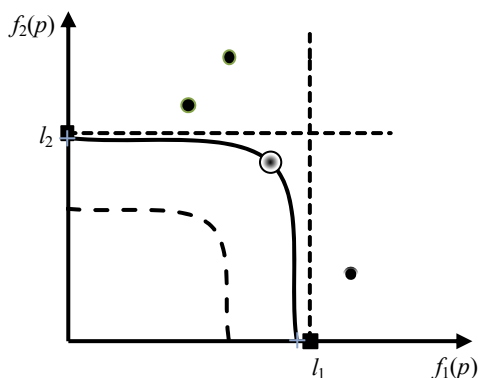


Рис. 3. Пример нахождения подходящего кратчайшего пути по нелинейной метрике с двумя ограничениями

Ещё одна техника, помимо исключения доминируемых путей, которая позволит сократить пространство поиска, заключается в прогнозировании значения стоимости пути на основе значения стоимости оставшегося подпути до узла назначения (Look-Ahead Concept). Данная техника предполагает предварительное построение дерева кратчайших путей от вершины узла назначения до всех остальных вершин в сети независимо по каждой рассматриваемой метрике. В результате, имея для некоторой вершины u точную нижнюю оценку пути до узла назначения t отдельно по каждой метрике $f_i(p_{i;u \rightarrow t})$, можно оценить минимально возможное итоговое значение всех метрик для полного маршрута от отправителя до получателя и исключить из рассмотрения пути, для которых значение хотя бы одной метрики выходит за пределы ограничений, т.е. не выполняется условие

$$f_i(p_{s \rightarrow u}) + f_i(p_{i;u \rightarrow t}) \leq l_i, \quad i=1,2,\dots,k. \quad (6)$$

Кроме того, для каждого сохраняемого в очереди узла маршрута можно оценить минимально возможное итоговое значение метрики стоимости и использовать это значение для сортировки маршрутов в очереди узла.

Поскольку алгоритм SAMCRA является точным, в очереди каждой вершины сохраняются все недоминируемые пути, которые в дальнейшем используются для поиска решения. В процессе поиска количество недоминируемых путей в очередях вершин быстро возрастает, поэтому в сетях с большим количеством узлов время работы алгоритма становится неприемлемым. Ускорить решение задачи позволяют эвристические подходы и алгоритмы. Примером такого подхода является алгоритм TAMCRA, отличие которого от SAMCRA заключается в том, чтобы хранить в очередях узлов не все, а только заданное число m недоминируемых путей. Уменьшая указанный параметр алгоритма, можно сократить время его выполнения. Алгоритм имеет временную сложность $O(m \cdot n \cdot \log(m \cdot n) + m^2 \cdot k \cdot r)$, где r – общее количество каналов связи. Нахождение решения в этом случае не гарантируется, тем не менее такой подход может являться практически применимым [30].

Развитие указанного подхода было предложено в рамках эвристического алгоритма H_MCOP [31]. Указанный алгоритм также использует предварительное построение дерева кратчайших путей от вершины узла назначения t до всех остальных вершин в сети на основе алгоритма Дейкстры по комбинированной линейной метрике (4). Поскольку метрика является линейной, в ходе дальнейшего поиска можно гарантировать оптимальность маршрута по указанной метрике (поскольку каждый подпуть кратчайшего пути по данной метрике обязательно является кратчайшим путём по данной метрике).

После завершения построения указанного дерева производится поиск кратчайшего пути от узла источника s до узла назначения t на основе модифицированного алгоритма Дейкстры.

Рассматривая на каждом шаге алгоритма некоторую вершину u , эвристически определяется возможный путь p из s в t через данную вершину и оценивается значение метрики для предварительно определенного значения λ :

$$f^{(\lambda)}(p) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(p)}{l_i} \right)^\lambda, \quad \lambda \geq 1. \quad (7)$$

Сам возможный путь p через вершину u определяется в результате слияния пройденного подпути из вершины s до вершины u и предварительного определенного кратчайшего подпути из вершины u в вершину t с минимальным значением метрики (4). Таким образом, до того момента, как будет достигнута вершина t , может быть определено несколько возможных путей до данной вершины. Если сразу несколько из них являются подходящими, в качестве решения выбирается путь с минимальным значением метрики (4).

Выбор значения λ может влиять на результативность алгоритма. Несмотря на то, что в целом результативность алгоритма при увеличении λ возрастает, возможны ситуации, когда подходящие решения не могут быть найдены при более высоких значениях λ . Алгоритм имеет временную сложность $O(n \cdot \log(n) + k \cdot r)$.

Указанный алгоритм с композитной нелинейной метрикой стоимости был реализован в рамках расширения протокола OLSR в [32]. Авторы работы акцентировали внимание на то, что расширение поддерживает произвольное количество показателей качества маршрутов, но в рамках симуляции использовали только два ограничения (задержка, потери пакетов).

Учитывая высокую сложность поиска полного набора эффективных решений для задачи многокритериальной маршрутизации, можно увеличить скорость поиска решений, понизив его точность. Это приводит к разработке алгоритмов, которые дают грубое представление множества Парето, но выполняются за полиномиальное время.

Пусть $\varepsilon > 0$ будет константой, представляющей желаемую точность. Тогда можно ослабить свойство

доминирования (3) и определить, что некоторый путь p' ε -доминирует другой путь p^* , если:

$$\begin{aligned} (1+\varepsilon) \cdot f_i(p^*) &\geq f_i(p'), \quad \forall i \in [1, k], \\ \exists j \in [1, k] : (1+\varepsilon) \cdot f_j(p^*) &> f_j(p'). \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда некоторый алгоритм является схемой ε -аппроксимации тогда, и только тогда, когда он позволяет найти путь p' , для которого

$$\frac{|f(p') - f(p)|}{|f(p)|} \leq \varepsilon, \quad (9)$$

где p – это оптимальный путь, а f – целевая функция.

Альтернативная формулировка, которая часто используется для аппроксимации проблемы МСР, заключается в следующем. Для заданной константы $\varepsilon \in (0, 1)$ некоторый алгоритм является схемой $(1-\varepsilon)$ -аппроксимации, если он позволяет найти решение p' , удовлетворяющее (2), в то время как существует путь p такой, что

$$f_i(p) \leq (1-\varepsilon) \cdot l_i, \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (10)$$

В этом случае путь p можно называть сверхподходящим. Однако разработка алгоритма в соответствии с указанным определением имеет существенный недостаток. Если условие (10) выполнено, то подходящий путь будет гарантированно найден. Но если (10) не выполняется, то алгоритм может не найти подходящий путь, даже если он существует.

Возможное решение заключается в увеличении (ослаблении) ограничений l_i в $1/(1-\varepsilon)$ раз так, чтобы путь p был сверхподходящим для кортежа ограничений L' , где

$$l'_i = \frac{l_i}{(1-\varepsilon)}, \quad i=1, 2, \dots, k. \quad (11)$$

Алгоритм, разработанный исходя из данного допущения, позволит гарантированно найти подходящий путь для кортежа ограничений L' , если только он существует [33]. Другими словами, предлагаемое решение является схемой $1/(1-\varepsilon)$ -аппроксимации.

Сахни в [34] описал три техники приближенного решения рассматриваемых задач, известных как масштабирование и округление, разбиение на интервалы и разделение. Техника масштабирования и округления (SR) наиболее часто используется при построении приближенных алгоритмов для обеспечения QoS-маршрутизации. Суть процесса состоит в том, чтобы масштабировать каждое значение показателей качества для всех каналов связи и округлить его до целочисленного значения, а затем использовать точный алгоритм для решения проблемы с масштабированными (целочисленными) значениями, которая больше не является NP-полной. Сахни доказал, что если коэффициент масштабирования выбран надлежащим образом, можно получить приближенную схему полиномиального времени (PTAS).

Интервальное разделение (IP) заключается в том, чтобы разделить целевое пространство на серию интервалов, а затем сохранить не более одной метки на каждом узле для каждого интервала. Это

уменьшает количество меток, которые должны храниться на каждом узле, и, следовательно, время выполнения.

Подобный подход также лежит в основе техники разделения. В этом случае две разные метки используются только в том случае, если разность значений хотя бы для одной из рассматриваемых целевых функций превышает предварительно определенный порог. То есть если два пути до некоторого узла имеют очень близкие целевые векторы, сохраняется только один.

Простая схема аппроксимации на основе техники масштабирования и округления для решения задачи МСОР была предложена в [35]. В рамках первого этапа исходная проблема МСОР с вещественными значениями показателей качества трансформируется в более простую проблему, для которой все значения показателей качества каналов связи, кроме основного, заменяются целыми числами, используя предварительно определенные целочисленные значения x_i :

$$w'_i(u, v) = \left\lceil \frac{w_i(u, v) \cdot x_i}{l_i} \right\rceil. \quad (12)$$

Далее, используя расширенные алгоритмы Дейкстры и Беллмана-Форда, становится возможным найти решение с минимальным значением основной маршрутной метрики, в то время как значения остальных целочисленных маршрутных метрик находятся в пределах ограничений x_i . Авторы доказывают, что решение упрощенной проблемы всегда является решением исходной проблемы (обратное неверно), в то время как эффективность поиска решений зависит от выбора x_i . Более высокие значения x_i повышают возможность нахождения решений, но увеличивают сложность алгоритма. Для задачи с двумя ограничениями алгоритм имеет временную сложность $O(x^2 \cdot n^2)$. Позднее другие схемы приближенного решения задачи МСОР были предложены в работах [36, 37].

Заключение

В целом, анализируя научные работы, направленные на решение задачи обеспечения качества обслуживания в динамически организуемых сетях на базе протокола OLSR, можно отметить, что наблюдается тенденция к увеличению разнообразия рассматриваемых показателей качества маршрутов. Вместе с тем общее число показателей, рассматриваемых в рамках конкретных решений, как правило, не велико. С одной стороны, это связано со сложностью решения соответствующих алгоритмических задач, рассмотренных в настоящей работе, с другой стороны, в условиях большого числа ограничений задачи часто становятся переограниченными.

Ранее авторами работы была предложена обобщенная формулировка задачи поиска оптимального маршрута с ограничениями MAX-МСОР, применимая для переограниченных случаев. Несмотря на то, что указанная задача является NP-полной, её практическое решение возможно на основе приближен-

ных и эвристических алгоритмов. Построение указанных алгоритмов может быть произведено на основе концепций, предложенных в алгоритмах для решения исходной задачи MCOP. В частности, основу алгоритма может представлять модифицированный алгоритм поиска заданного числа маршрутов с композитной нелинейной метрикой стоимости. Таким образом, в процессе поиска в очереди каждой вершины будет храниться некоторое заданное число недоминируемых путей. При этом применение техники прогнозирования значения стоимости оставшегося подпути до узла назначения не выглядит обоснованным, поскольку в случае решения задачи MAX-MCOP она не позволит априори исключить неподходящие пути из рассмотрения. Кроме того, для приближенного решения задачи MAX-MCOP может быть предложена схема аппроксимации на основе техники масштабирования и округления.

Исходя из результатов проведенного анализа, практически применимые алгоритмы для решения задачи MAX-MCOP будут востребованы в рамках возможного расширения протокола маршрутизации OLSR в целях поддержки «мягкого» обеспечения качества обслуживания по произвольному количеству показателей качества маршрутов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00160.

Литература

1. Hanzo L. A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks / L. Hanzo, R. Tafazolli // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2007. – Vol. 9, No. 2. – P. 50–70.
2. RFC7181: The Optimized Link State Routing Protocol Version 2 / T. Clausen, C. Dearlove, P. Jacquet, U. Herberg. – 2014. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181> (дата обращения: 20.12.2018).
3. Ghanem N. Energy Consumption Balancing in OLSR Ad Hoc Wireless Routing Protocol / N. Ghanem, H. Belleili // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2016. – Vol. 10, No. 5. – P. 1991–1998.
4. Rango F.D. EE-OLSR: Energy Efficient OLSR Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks / F.D. Rango, M. Fotino, S. Marano // Proc. of Military Communication Conference (MILCOM). – 2008. – P. 1–7.
5. Lakrami F. Energy and mobility in OLSR routing protocol / F. Lakrami, N.El. Kamoun // Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications. – 2014. – No. 3. – P. 1–6.
6. Mahfoudh S. An energy efficient routing based on OLSR in wireless ad hoc and sensor networks / S. Mahfoudh, P. Minet // Proc. of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops (AINA '08). – 2008. – P. 1253–1259.
7. Guo Z. Energy aware proactive optimized link state routing in mobile ad-hoc networks / Z. Guo, S. Malakooti, S. Sheikh et al. // Applied Mathematical Modelling. – 2011. – Vol. 35, No. 10. – P. 4715–4729.
8. Joshi R.D. Implementation and analytical modelling of modified optimised link state routing protocol for network lifetime improvement / R.D. Joshi, P.P. Rege // IET Communications. – 2012. – Vol. 6, No. 10. – P. 1270–1277.
9. Ge Y. Quality of service routing in ad-hoc networks using OLSR / Y. Ge, T. Kunz, L. Lamont // Proc. of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. – 2003. – P. 1–9.
10. Le P.H. Evaluation of the Impact of Interference on Mobile Ad Hoc Network Performance // International Journal of Advanced Research in Computer Science. – 2016. – Vol. 7, No. 3. – P. 20–24.
11. Sinky H. Implementation and performance measurement and analysis of OLSR protocol / H. Sinky, B. Hamdaoui // Proc. of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. – 2010. – P. 286–290.
12. Laven A. Multimetric OLSR and ETT / A. Laven, P. Hjartquist // Proc. of the 5th OLSR Interop & Workshop. – 2009. – P. 1–5.
13. Guo Z. Predictive Delay Metric for OLSR Using Neural Networks / Z. Guo, B. Malakooti // Proc. of the 3rd International ICST Conference on Wireless Internet. – 2007. – P. 1–9.
14. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. – 1959. – Vol. 1. – P. 269–271.
15. Providing Quality of Service for Mesh Networks Using Link Delay Measurements / W. Cordeiro et al. // Proc. of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks. – 2007. – P. 991–996.
16. Benzaid M. Integrating fast mobility in the OLSR routing protocol / M. Benzaid, P. Minet, K. Al Agha // Proc. of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. – 2002. – P. 217–221.
17. Lakrami F. Mobility support in OLSR routing protocol / F. Lakrami, N. El Kamoun // Proc. of the International Conference on Network Computing and Information Security. – 2012. – P. 804–812.
18. Kuipers F. An overview of constraint-based path selection algorithms for QoS routing / F. Kuipers, P.V. Mieghem, T. Korkmaz et al. // IEEE Communications Magazine. – 2002. – Vol. 40, No. 12. – P. 50–55.
19. Щербина О.А. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях // Интеллектуальные системы. – 2011. – Т. 15, № 1-4. – С. 53–170.
20. Araujo J.N.R. Multicriteria QoS-aware Solution in Wireless Multi-hop Networks / J.N.R. Araujo, C.C. Monteiro, L.S. Batista // Proc. of the Thirteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications. – 2017. – P. 17–23.
21. Garroppo R.G. A survey on multi-constrained optimal path computation: Exact and approximate algorithms / R.G. Garroppo, S. Giordano, L. Tavanti // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, No. 17. – P. 3081–3107.
22. Guo Z. Multi-objective OLSR for proactive routing in MANET with delay, energy, and link lifetime predictions / Z. Guo, S. Malakooti, S. Sheikh et al. // Applied Mathematical Modelling. – 2011. – Vol. 35, No. 3. – P. 1413–1426.
23. Boushaba A. An intelligent multipath optimized link state routing protocol for QoS and QoE enhancement of video transmission in MANETs / A. Boushaba, A. Benabbou, R. Benabbou et al. // Computing. – 2016. – Vol. 98, No. 8. – P. 803–825.
24. Sondi P. A multiple-metric QoS-aware implementation of the optimised link state routing protocol / P. Sondi, D. Gantsou, S. Lecomte // International Journal of Communication Networks and Distributed Systems. – 2014. – Vol. 12, No. 4. – P. 381–400.
25. Multiple Metrics-OLSR in NAN for Advanced Metering Infrastructures / Y. Tsado et al. // Proc. of the IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). – 2016. – P. 1–6.
26. Щерба Е.В. Проблема обеспечения качества обслуживания при маршрутизации пакетов в динамически организуемых телекоммуникационных сетях для переог-

раниченных случаев / Е.В. Щерба, Г.А. Литвинов, М.В. Щерба // Электронные средства и системы управления: матер. XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТУСУР, 2018. – Т. I. – С. 28–31.

27. Bellman R. On a routing problem // *Quarterly of Applied Mathematics*. – 1958. – Vol. 16, No. 1. – P. 87–90.

28. Jaffe J.M. Algorithms for finding paths with multiple constraints // *Networks*. – 1984. – Vol. 14, No. 1. – P. 95–116.

29. Van Mieghem P. Concepts of exact QoS routing algorithms / P. Van Mieghem, F.A. Kuipers // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2004. – Vol. 12, No. 5. – P. 851–864.

30. De Neve H. TAMCRA: a tunable accuracy multiple constraints routing algorithm / H. De Neve, P. Van Mieghem // *Computer Communications*. – 2000. – Vol. 23, No. 7. – P. 667–679.

31. Korkmaz T. Multi-constrained optimal path selection / T. Korkmaz, M. Krunz // *Proc. of the Conference on Computer Communications, 2001, IEEE Infocom*. – 2001. – Vol. 2. – P. 834–843.

32. Kunavut K. Multi-Constrained Path (MCP) QoS Routing in OLSR based on Multiple Additive QoS Metrics / K. Kunavut, T. Sanguankotchakorn // *Proc. of the 10th International Symposium on Communications and Information Technologies*. – 2010. – P. 226–231.

33. Xue G. Finding a path subject to many additive QoS constraints / G. Xue, A. Sen, W. Zhang et al. // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2007. – Vol. 15, No. 1. – P. 201–211.

34. Sahni S. General Techniques for Combinatorial Approximation // *Operations Research*. – 1977. – Vol. 25, No. 6. – P. 920–936.

35. Chen S. On finding multi-constrained paths / S. Chen, K. Nahrstedt // *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*. – 1998. – Vol. 2. – P. 874–879.

36. Tsaggouris G. Multiobjective optimization: improved FPTAS for shortest paths and non-linear objectives with applications / G. Tsaggouris, C. Zaroliagis // *Theory of Computing Systems*. – 2009. – Vol. 45, No. 1. – P. 162–186.

37. Xue G. Polynomial time approximation algorithms for multi-constrained QoS routing / G. Xue, W. Zhang, J. Tang et al. // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 2008. – Vol. 16, No. 3. – P. 656–669.

Щерба Евгений Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф.
комплексной защиты информации (КЗИ)
Омского государственного технического ун-та (ОмГТУ)
Мира пр-т, 11, г. Омск, Россия, 644050
ORCID 0000-0003-4401-4343
Тел.: +7 (381-2) 21-77-02
Эл. почта: evscherba@gmail.com

Литвинов Георгий Александрович

Аспирант каф. КЗИ ОмГТУ
Мира пр-т, 11, г. Омск, Россия, 644050
Тел.: +7 (381-2) 65-85-60
Эл. почта: georgyfunds@gmail.com

Щерба Мария Витальевна

Канд. техн. наук, доцент каф. КЗИ ОмГТУ
Мира пр-т, 11, г. Омск, Россия, 644050
Тел.: +7 (381-2) 21-77-02
Эл. почта: mariz3@mail.ru

Shcherba E.V., Litvinov G.A., Shcherba M.V.

Providing QoS based on the OLSR routing protocol: problems, algorithms and solutions

The paper presents an overview the issues related to ensuring quality of service based on the OLSR routing protocol within the framework of the graph-combinatorial approach. Despite a significant number of solutions based on a single routing metric, the extensions of the protocol, which take into account multiple metrics, are of particular practical interest. The authors classified existing problem statements and analyzed the main algorithmic approaches and solutions. Based on the research, promising directions for solving the generalized problem of finding the multi-constrained optimal path relevant in dynamically organized networks are proposed.

Keywords: multi-objective routing, multi-constrained routing, quality of service, MANET.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-1-55-65

References

1. Hanzo L., Tafazolli R. A survey of QoS routing solutions for mobile ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2007, vol. 9, no. 2, pp. 50–70.
2. Clausen T., Dearlove C., Jacquet P., Herberg U. RFC7181: The Optimized Link State Routing Protocol Version 2. 2014. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc7181> (accessed: December 20, 2018).
3. Ghanem N., Belleili H. Energy Consumption Balancing in OLSR Ad Hoc Wireless Routing Protocol. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2016, vol. 10, no. 5, pp. 1991–1998.
4. Rango F.D., Fotino M., Marano S. EE-OLSR: Energy Efficient OLSR Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *Proc. of Military Communication Conference (MILCOM)*, 2008, pp. 1–7.
5. Lakrami F., Kamoun N.E. Energy and mobility in OLSR routing protocol. *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications*, 2014, no. 3, pp. 1–6.
6. Mahfoudh S., Minet P. An energy efficient routing based on OLSR in wireless ad hoc and sensor networks. *Proc. of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops (AINA '08)*, 2008, pp. 1253–1259.
7. Guo Z., Malakooti S., Sheikh S., Al-Najjar C., Lehman M., Malakooti B. Energy aware proactive optimized link state routing in mobile ad-hoc networks. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, vol. 35, no. 10, pp. 4715–4729.
8. Joshi R.D., Rege P.P. Implementation and analytical modelling of modified optimised link state routing protocol for network lifetime improvement. *IET Communications*, 2012, vol. 6, no. 10, pp. 1270–1277.
9. Ge Y., Kunz T., Lamont L. Quality of service routing in ad-hoc networks using OLSR. *Proc. of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2003, pp. 1–9.
10. Le P.H. Evaluation of the Impact of Interference on Mobile Ad Hoc Network Performance. *International Journal*

of *Advanced Research in Computer Science*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 20–24.

11. Sinky H., Hamdaoui B. Implementation and performance measurement and analysis of OLSR protocol. *Proc. of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2010, pp. 286–290.

12. Laven A., Hjartquist P. Multimetric OLSR and ETT. *Proc. of the 5th OLSR Interop & Workshop*, 2009, pp. 1–5.

13. Guo Z., Malakooti B. Predictive Delay Metric for OLSR Using Neural Networks. *Proc. of the 3rd International ICST Conference on Wireless Internet*, 2007, pp. 1–9.

14. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, pp. 269–271.

15. Cordeiro W., Aguiar E., Junior W.M., Abelem A., Stanton M. Providing Quality of Service for Mesh Networks Using Link Delay Measurements. *Proc. of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks*, 2007, pp. 991–996.

16. Benzaid M., Minet P., Al Agha K. Integrating fast mobility in the OLSR routing protocol. *Proc. of the 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, 2002, pp. 217–221.

17. Lakrami F., El Kamoun N. Mobility support in OLSR routing protocol. *Proc. of the International Conference on Network Computing and Information Security*, 2012, pp. 804–812.

18. Kuipers F., Miegheem P.V., Korkmaz T., Krunz M. An overview of constraint-based path selection algorithms for QoS routing. *IEEE Communications Magazine*, 2002, vol. 40, no. 12, pp. 50–55.

19. Shcherbina O.A. Constraint satisfaction and constraint programming. *Intelligent Systems*, 2011, vol. 15, no. 1-4, pp. 53–170 (in Russ.).

20. Araujo J.N.R., Monteiro C.C., Batista L.S. Multicriteria QoS-aware Solution in Wireless Multi-hop Networks. *Proc. of the Thirteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, 2017, pp. 17–23.

21. Garroppo R.G., Giordano S., Tavanti L. A survey on multi-constrained optimal path computation: Exact and approximate algorithms. *Computer Networks*, 2010, vol. 54, no. 17, pp. 3081–3107.

22. Guo Z., Malakooti S., Sheikh S., Al-Najjar C., Lehman M., Malakooti B. Multi-objective OLSR for proactive routing in MANET with delay, energy, and link lifetime predictions. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, vol. 35, no. 3, pp. 1413–1426.

23. Boushaba A., Benabbou A., Benabbou R., Zahi A., Oumsis M. An intelligent multipath optimized link state routing protocol for QoS and QoE enhancement of video transmission in MANETs. *Computing*, 2016, vol. 98, no. 8, pp. 803–825.

24. Sondi P., Gantsou D., Lecomte S. A multiple-metric QoS-aware implementation of the optimised link state routing protocol. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 381–400.

25. Tsado Y., Gamage K.A.A., Lund D., Adebisi B. Multiple Metrics-OLSR in NAN for Advanced Metering Infrastructures. *Proc. of the IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2016, pp. 1–6.

26. Shcherba E.V., Litvinov G.A., Shcherba M.V. Problema obespecheniya kachestva obsluzhivaniya pri marshrutizatsii paketov v dinamicheski organizuemykh telekommunikatsionnykh setyah dlya pereogranichennykh sluchaev [The problem of QoS-based routing in dynamically organized telecommunication networks in overconstrained cases]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy chetyrnadcatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Elec-*

tronic Devices and Control Systems. Proc. of the fourteenth International scientific conference]. Tomsk, TUSUR Publ., 2018, vol. I, pp. 28–31.

27. Bellman R. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, vol. 16, no. 1, pp. 87–90.

28. Jaffe J.M. Algorithms for finding paths with multiple constraints. *Networks*, 1984, vol. 14, no. 1, pp. 95–116.

29. Miegheem P. V., Kuipers F.A. Concepts of exact QoS routing algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 851–864.

30. De Neve H., Miegheem P. V. TAMCRA: a tunable accuracy multiple constraints routing algorithm. *Computer Communications*, 2000, vol. 23, no. 7, pp. 667–679.

31. Korkmaz T., Krunz M. Multi-constrained optimal path selection. *Proc. of the Conference on Computer Communications*, IEEE Infocom, 2001, vol. 2, pp. 834–843.

32. Kunavut K., Sanguankotchakorn T. Multi-Constrained Path (MCP) QoS Routing in OLSR based on Multiple Additive QoS Metrics. *Proc. of the 10th International Symposium on Communications and Information Technologies*, 2010, pp. 226–231.

33. Xue G., Sen A., Zhang W., Tang J., Thulasiraman K. Finding a path subject to many additive QoS constraints. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, vol. 15, no. 1, pp. 201–211.

34. Sahni S. General Techniques for Combinatorial Approximation. *Operations Research*, 1977, vol. 25, no. 6, pp. 920–936.

35. Chen S., Nahrstedt K. On finding multi-constrained paths. *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1998, vol. 2, pp. 874–879.

36. Tsaggouris G., Zaroliagis C. Multiobjective optimization: improved FPTAS for shortest paths and non-linear objectives with applications. *Theory of Computing Systems*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 162–186.

37. Xue G., Zhang W., Tang J., Thulasiraman K. Polynomial time approximation algorithms for multi-constrained QoS routing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, vol. 16, no. 3, pp. 656–669.

Evgeny V. Shcherba

Candidate of Engineering, Associate Professor of Department of Complex Information Protection, Omsk State Technical University (OmSTU)
11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
ORCID 0000-0003-4401-4343
Phone: +7 (381-2) 21-77-02
Email: evscherba@gmail.com

George A. Litvinov

Graduate student, Department of Complex Information Protection, OmSTU
11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
Phone: +7 (381-2) 65-85-60
Email: georgyfunds@gmail.com

Maria V. Shcherba

Candidate of Engineering, Senior Lecturer of Department of Complex Information Protection, OmSTU
11, Mira pr., Omsk, Russia, 644050
Phone: +7 (381-2) 21-77-02
Email: mariz3@mail.ru