В работе рассматриваются теоретические и практические особенности применения методов многокритериальной оптимизации для решения проблем маршрутизации в мобильных ситуационных сетях (ad hoc сетях) с учетом совокупности показателей качества. Излагается методология многокритериального выбора оптимальных систем из множества допустимых, которая включает методы выделения подмножества Парето-оптимальных вариантов, а также последующего выбора из них единственного предпочтительного варианта системы. Приводятся примеры использования данной методологии при решении проблем выбора оптимальных маршрутов с учетом совокупности показателей качества, а также проблем многокритериального выбора предпочтительного протокола маршрутизации в мобильных ситуационных сетях. Книга представляет интерес для специалистов в области построения мобильных ситуационных сетей, оптимальных с учетом совокупности показателей качества, которые характеризуют противоречивые технико-экономические требования к сетям.

Заведующий кафедрой «Информационно-сетевая инженерия» Харьковского национального университета радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор, академик Академии связи Украины, академик международной Академии наук прикладной радиоэлектроники.

978-613-9-81987-4

Валерий Безрук

Многокритериальная оптимизация маршрутизации в ad hoc сетях

LAP LAMBERT Academic Publishing

Валерий Безрук

Многокритериальная оптимизация маршрутизации в ad hoc сетях

Валерий Безрук

Многокритериальная оптимизация маршрутизации в ad hoc сетях

LAP LAMBERT Academic Publishing

Imprint
Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher:
LAP LAMBERT Academic Publishing
is a trademark of
International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group
17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius

Printed at: see last page
ISBN: 978-613-9-81987-4

Copyright © Валерий Безрук
Copyright © 2019 International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group

БЕЗРУК В.М.

Многокритериальная оптимизация маршрутизации в ad hoc сетях

Аннотация

В работе рассматриваются теоретические и практические особенности применения методов многокритериальной оптимизации для решения проблем маршрутизации в мобильных ситуационных сетях (ad hoc сетях) с учетом совокупности показателей качества. Излагается методология многокритериального выбора оптимальных систем из множества допустимых, которая включает методы выделения подмножества Парето-оптимальных вариантов, а также последующего выбора из них единственного предпочтительного варианта системы. Приводятся примеры использования данной методологии при решении проблем выбора оптимальных маршрутов с учетом совокупности показателей качества, а также проблем многокритериального выбора предпочтительного протокола маршрутизации в мобильных ситуационных сетях.

Книга представляет интерес для специалистов в области построения мобильных ситуационных сетей, оптимальных с учетом совокупности показателей качества, которые характеризуют противоречивые технико-экономические требования к сетям.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1. МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ 9
1.1. Формулирование задачи принятия оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества 9
1.2. Нахождения Парето-оптимальных проектных решений 15
1.3. Сужение подмножества Парето до единственного проектного решения 19
1.4. Выводы 21
2. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ 23
2.1. Основные принципы управления сетью связи 23
2.2. Многокритериальный подход при выборе оптимальных маршрутов в мультисервисных сетях 25
2.3. Практические особенности многокритериального выбора оптимальных маршрутов на примере фрагмента сети связи 27
2.4. Выводы 37
3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В МОБИЛЬНЫХ AD HOC СЕТЯХ 38
3.1. Классификация протоколов маршрутизации 38
3.2. Особенности проактивной, реактивной и гибридной маршрутизации 39
3.3. Структурирование и делегирование задач маршрутизации 40
3.4. Маршрутизация с использованием сетевых метрик 41
3.5. Оценка топологии, назначения и положения при маршрутизации 42
3.6. Многопутевая маршрутизация 43
3.7. Протокол маршрутизации Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) 43
3.8. Протокол маршрутизации Cluster-Head Gateway Switch Routing (CGSR) 44
3.9. Протокол маршрутизации Wireless Routing Protocol (WRP) 45
3.10. Сравнение табличных протоколов маршрутизации 45
3.11. Протокол маршрутизации Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) 46
3.12. Протокол маршрутизации Dynamic Source Routing (DSR) 48
3.13. Протокол маршрутизации Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA) 49
3.14. Протокол маршрутизации ABR 49
3.15. Протокол маршрутизации SSBR 50
3.16. Сравнение реактивных протоколов маршрутизации 51
3.17. Выводы 52
4. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ В AD HOC СЕТЯХ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ 53
4.1. Анализ исходного множества протоколов маршрутизации 53
4.2. Математические особенности метода анализа иерархий 54
4.3. Результаты многокритериального выбора предпочтительного протокола маршрутизации методом МАИ 57
4.5. Выводы 61

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 61
ЛИТЕРАТУРА 64

ВВЕДЕНИЕ

С прогрессом технологий беспроводной связи в мобильных приложениях получили широкое распространение недорогие и мощные беспроводные приемопередатчики. Это раскрывает возможности создания беспроводных децентрализованных самоорганизующихся сетей (mobile ad hoc network (MANET), состоящие из мобильных устройств [1]. Каждое такое устройство может независимо передвигаться в любых направлениях и, как следствие, часто разрывать и устанавливать соединения.

Самоорганизующиеся сети MANET обладают следующими преимуществами над беспроводными сетями традиционной архитектуры:

- возможность передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика;

- устойчивость к изменениям в инфраструктуре сети;

- возможность быстрой реконфигурации в условиях неблагоприятной помеховой обстановки;

- простота и высокая скорость развертывания;

Беспроводные сети, построенные на базе мобильных устройств, обладают рядом особенностей:

мобильность узлов ведёт к дополнительному повышению динамичности топологии сети, так как к возможности обрыва связи из-за помех или включения/выключения узла добавляется вероятность его перемещения;

запас источников питания мобильных узлов может быть ограничен, в связи с чем при проектировании аппаратных средств и протоколов необходимо учитывать ещё и энергопотребление (особенно это касается сенсорных сетей).

По сравнению с проводными сетями, сети мобильной связи обладают рядом уникальных особенностей. В мобильных сетях мобильность узла может вызывать частые изменения топологии, которые являются редкими в проводных сетях. В отличие от стабильной пропускной способности линии проводной сети, возможности беспроводного соединения варьируются из-за постоянного изменения мощности передачи,

чувствительности приемника, шума, затуханий и интерференции. Кроме того, беспроводные мобильные сети имеют высокий коэффициент ошибок, ограничены в мощности и полосе пропускания.

Мобильные сети можно классифицировать на инфраструктурные сети и мобильные ситуационные сети (ad hoc сети, MANET) в соответствии с их зависимостью от фиксированной инфраструктуры. В инфраструктурных беспроводных сетях в пределах дальности передачи мобильных узлов должны находиться точки доступа (базовые станции), имеющие проводное соединение. Точки доступа составляют магистраль сетевой инфраструктуры. С другой стороны, мобильные ad-hoc сети являются автономно самоорганизующимися, без поддержки фиксированной инфраструктуры. В MANET узлы могут двигаться произвольно и независимо, поэтому сеть может существовать в условиях быстрых и непредсказуемых изменений топологии. Кроме того, поскольку узлы в мобильных ad hoc сетях обычно имеют ограниченный радиус передачи, некоторые узлы не могут непосредственно взаимодействовать друг с другом. Таким образом, маршруты в таких сетях потенциально могут состоять из несколько хопов, и каждый узел несет ответственность как маршрутизатор.

Будучи независимыми от фиксированной инфраструктуры, MANET имеют такие преимущества, как быстрота и простота развертывания, повышенная гибкость и сокращение издержек. MANET являются подходящими для мобильных приложений в любой агрессивной среде, где отсутствует фиксированная инфраструктура, или временных мобильных приложениях, требовательных к стоимости развертывания и поддержки сети. В последние годы область применения MANET значительно расширилась в гражданских общественных организациях, коммерческих, промышленных областях.

Каждый узел в мобильных ситуационных сетях может свободно перемещаться в любое время и в любом направлении, причем вследствие этого некоторые старые связи могут быть утеряны, а также могут быть установлены новые связи уже с другими узлами сети. Такая технология построения беспроводной сети показывает себя актуальной в ситуациях, когда необходимо быстро развернуть сеть на территории с подвижными узлами. Примерами таких ситуаций могут служить: спасательные операции, операции правоохранительных органов, взаимодействующие промышленные роботы, управление движением, а также различные

стихийные бедствия, военные действия и другие экстренные ситуации. За счет постоянного изменения структуры сети могут возникнуть проблемы с маршрутизацией, так как изменяются возможные пути доставки информации между узлами.

В настоящее время можно выделить несколько проблем при создании мобильных ситуационных сетей:

- проблема обеспечения помехоустойчивости;

- проблема обеспечения безопасности передаваемых данных;

-проблема общей пропускной способности сетей;

- проблема эффективности применяемых методов маршрутизации.

Проблемы, затрудняющие решение задачи маршрутизации в мобильных ситуационных сетях, определяется, во-первых, мобильностью узлов, что вызывает частые изменения топологии, а во-вторых, непредсказуемыми изменениями пропускной способности беспроводных соединений, из-за чего могут происходить частые потери пакетов. Также, широковещательная природа беспроводных сетей определяет задачу скрытого и открытого терминала. Кроме того, мобильные узлы имеют ограниченную мощность, производительность, ресурсы пропускной способности и требуют эффективные способы маршрутизации. Для обеспечения высокого качества обслуживания различных типов трафика в мобильных ситуационных сетях необходимо решение задачи маршрутизации с учетом совокупности показателей, которые характеризуют противоречивые требования к выбираемым маршрутам. Это определяет необходимость применения методов многокритериальной оптимизации для решения задачи маршрутизации в таких сетях. Многокритериальный подход при решении задачи выбора маршрутов включает определение некоторых характерных свойств маршрутов и соответствующих им показателей качества, оценку их значений и принятие оптимальных решений по результатам сравнения вариантов маршрутизации с учетом совокупности показателей качества.

Необходимость многокритериального выбора проектных вариантов технических систем, в частности, в области телекоммуникаций уже рассматривались в ряде работ [1-7]. В работах [8-14] приведены теоретические основы многокритериальной оптимизации, на основе

которых сформирована методология многокритериального выбора проектных решений и решен ряд задач многокритериальной оптимизации в различных областях телекоммуникаций [15-21]. В частности, в работах [22-26] решались задачи многокритериальной оптимизации маршрутизации в сетях связи.

В настоящее время существует много разных типов проактивных, реактивных и гибридных протоколов маршрутизации, которые могут быть использованы в мобильных ситуационных сетях [27-41]. Следует отметить, что каждый протокол маршрутизации характеризуется совокупностью показателей качества, определяющих основные свойства выбранного способа маршрутизации. Показатели качества протоколов маршрутизации, как правило, связаны между собой и являются антагонистическими, когда при улучшении одного показателя качества ухудшаются другие показатели качества. При построении мобильных ситуационных сетей возникает необходимость выбора предпочтительного протокола маршрутизации из некоторого множества существующих с учетом совокупности противоречивых показателей качества. Для сравнительного анализа и выбора предпочтительного протокола маршрутизации также следует применять методы многокритериальной оптимизации [25].

В данной работе рассматриваются особенности применения методов многокритериальной оптимизации для решения проблемы выбора предпочтительного варианта маршрутизации в мобильных ситуационных сетях с учетом совокупности противоречивых показателей качества. Кроме того, рассматриваются особенности решения и другой проблемы - многокритериального выбора предпочтительного протокола маршрутизации их некоторого множества существующих протоколов с учетом совокупности показателей качества. Приводится методология многокритериальной оптимизации систем, которая используется при решении указанных проблем маршрутизации в сетях связи. Кроме того, проводится сравнительный анализ характеристик и показателей качества существующих протоколов маршрутизации, которые применяются в мобильных ситуационных сетях. Приводится примеры решения указанных проблем маршрутизации с применением методологии многокритериальной оптимизации в мобильных ситуационных сетях с учетом совокупности противоречивых показателей качества.

1. МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ

В данном разделе рассматриваются особенности методологии многокритериальной оптимизации систем, представляющей собой совокупность взаимосвязанных методов, которые могут быть использованы для принятия оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества [9 - 20].

1.1. Формулирование задачи принятия оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества

Задача принятия оптимальных проектных решений состоит в выборе среди исходного множества решений таких, которые являются в заранее определенном смысле лучшими, т.е. оптимальными.

Удобно считать, что выбор решений производит некоторое лицо, принимающее решение (ЛПР), которое преследует вполне определенные цели. В зависимости от конкретной ситуации в роли ЛПР может выступать как отдельный человек, так и целый коллектив - группа специалистов, занятая решением одной задачи. Каждое возможное решение характеризуется определенной степенью достижения цели. В соответствии с этим у ЛПР имеется свое представление о достоинствах и недостатках решений, на основании которого одно решение предпочитается другому.

Таким образом, оптимальное решение – это решение, которое с точки зрения ЛПР предпочтительнее других альтернативных решений. Это предпочтение на практике может выражаться в различной форме и его математическая формализация может составить непростую задачу. Сложность заключается в том, что на начальных этапах ЛПР, как правило, не может сформулировать свои предпочтения (оптимальность решений) ясно и четко с точки зрения математической формализации. Задание критерия оптимальности для нахождения лучшего решения на множестве допустимых решений связано с формализацией представления ЛПР про оптимальность решений. При этом существуют два подхода к определению понятия оптимальности решений: ординалистический и кардиналистический.

Ординалистический подход к определению понятия оптимальности решений аппелирует к порядку (лучше-хуже) и основан на введении понятия бинарных отношений, что позволяет формализовать операции попарного сравнения альтернатив и выбора оптимальных решений.

Бинарным отношением называют множество упорядоченных пар альтернатив, которые находятся в некотором отношении R, что записывается в виде $(x', x'') \in R$ или $x' R x''$. Понятие бинарного отношения позволяет формализовать операции попарного сравнения альтернатив и выбора лучших решений на множестве допустимых X. Элемент $x' \in X$ называется лучшим в модели выбора (X, R), если он не менее предпочтителен, чем любой другой элемент x'', т.е. если бинарное отношение $x' R x''$ справедливо для любого $x'' \in X$.

Существуют разные классы бинарных отношений: порядка, квазипорядка, эквивалентности, неразличимости. Рассмотрим более подробно отношение строгого предпочтения, которое часто используется на практике при выборе оптимальных решений. Если из двух решений x' и x'' множества X ЛПР выбирает решение x', то говорят, что решение x' более предпочтительно, чем решение x''. Такие пары (x', x'') образуют множество, которое называется отношением строго предпочтения, что обозначается как $x' \succ x''$.

При сравнении решений возможен и такой случай, когда не будет отдано предпочтение ни одному из решений. В этом случае вводится отношение неразличимости (отношение безразличия), которое обозначается символом ~. Оно означает, что не выполняется ни отношение $x' \succ x''$, ни отношение $x'' \succ x'$. Другими словами, решения x' и x'' неразличимы, если они несравнимы по заданному бинарному отношению $\succ$. Это отношение может иметь место и тогда, когда для ЛПР в смысле предпочтения нет разницы между решениями x' и x''. Кроме того, отношение неразличимости может иметь место и в случае, когда эти решения ЛПР вообще никак не может сравнить друг с другом.

Для произвольно выбранной пары решений $x', x'' \in X$ может выполняться одно из заданных бинарных отношений: $x' \succ x''$, $x'' \succ x'$, $x' \sim x''$. Иногда удобно рассматривать еще одно отношение «не менее предпочтительно чем», являющееся объединением отношений $\succ$ и ~. Это бинарное отношение называется отношением нестрогого предпочтения.

Рассмотрим особенности выбора множества оптимальных решений для частного случая, когда при выборе «лучших» (оптимальных решений) из множества X ЛПР руководствуется отношением строгого предпочтения $\succ$.

При этом с использованием отношения $\succ$ выделяются оптимальные (предпочтительные) решения. Худшие решения, для которых имеются более предпочтительные альтернативы, удаляются из множества X, поскольку их заведомо нельзя считать оптимальными. В результате исключения во множестве X худших решений по бинарному отношению $\succ$ останутся только оптимальные решения, для которых выполняется отношение неразличимости.

Таким образом, *множество оптимальных решений* по отношению строгого предпочтения $\succ$ включает такие решения $x^{(o)} \in X$, для которых не существует других решений $x \in X$, что было справедливо отношение $x \succ x^{(o)}$. Это множество оптимальных решений обозначается через $opt_{\succ} X$. В зависимости от структуры множества X и свойств отношения $\succ$ множество оптимальных решений $opt_{\succ} X$ может содержать единственный элемент, конечное или бесконечное множество элементов. Если множество X не пусто и содержит конечное число элементов, а бинарное отношение $\succ$ асимметрично и транзитивно, то это множество непустое $opt_{\succ} X \neq \emptyset$.

Кардиналистический подход к определению понятия оптимальности решений основан на введении некоторой целевой функции $U(\bullet)$, значение которой интерпретируется как полезность (ценность) решения x и определяет предпочтение ЛПР. Выбранная целевая функция задает соответствующее отношение порядка R на множестве X. Значение целевой функции $U(\bullet)$ является индикатором предпочтения R. В частности, при задании скалярной целевой функции считается, что решение x' предпочтительнее альтернативного решения x'' тогда и только тогда, когда выполняется условие $U(x') \geq U(x'')$. При таком подходе может быть задана формализованная процедура выбора оптимальных решений (критерий оптимальности) из условия экстремума (минимума или максимума) целевой функции на множестве допустимых решений

$$X^{(o)} = \arg \underset{x \in X}{extrem}[U(x)]. \qquad (1.1)$$

В этом случае для выбора оптимальных решений используются методы скалярной оптимизации, которые, как правило, приводят к выбору единственного решения.

Однако из-за недостаточной определенности представления ЛПР про оптимальность с учетом совокупности противоречивых требований к

решениям часто не удается в формализованном виде задать скалярную целевую функцию и соответствующий скалярный критерий оптимальности. Поэтому на начальных этапах решения характеризуют векторной целевой функцией, включающей совокупностью частных целевых функций

$$\vec{f}(x) = \left(f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x)\right), \tag{1.2}$$

которые определяют полезность (ценность) проектного решения x с точки зрения разных требований. При этом возникают более сложные задачи оптимизации решений по совокупности показателей качества, которые также называются задачами многокритериальной либо векторной оптимизации

$$X^{(o)} = \underset{x \in X}{\arg}\ extrem[\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x))]. \tag{1.3}$$

В многокритериальной оптимизационной задаче (1.3) возможны следующие варианты: частные целевые функции независимы между собой; функции связаны между собой и являются согласованными; функции связаны между собой и являются антагонистическими. В первых двух случаях оптимизационная задача (1.3) сводится к совокупности независимых скалярных оптимизационных задач для частных целевых функций. В последнем случае, который встречается часто в практических приложениях, оптимизационная задача (1.3) сводится к нахождению согласованного экстремума частных целевых функций. Этот экстремум означает, что дальнейшее улучшения значения каждой целевой функции может быть достигнуто лишь за счет ухудшения значений других целевых функций. В результате этого находится подмножество решений, оптимальных по совокупности показателей качества.

При введении векторной целевой функции, наряду с множеством допустимых альтернативных решений X можно рассматривать множество соответствующих им значений этой функции

$$Y = \vec{f}(X) = \{\vec{y} \in Y \mid \vec{y} = \vec{f}(x),\ x \in X\},\ Y \subset R^m, \tag{1.4}$$

которое называют множеством векторных оценок или критериальным пространством.

Каждому решению $x \in X$ соответствует одна оценка $\vec{y} = \vec{f}(x) \in Y$. С другой стороны, каждой оценке отвечают альтернативные решения $x \in X$ (их может быть и более одного), для которых $\vec{f}(x) = \vec{y}$. Таким образом, между множествами X и Y имеется тесная связь и поэтому выбор решения из множества X в указанном смысле равносилен выбору соответствующей оценки в критериальном пространстве Y.

Для векторных оценок $\vec{y}'$ и $\vec{y}''$ пространства Y можно рассматривать разные типы бинарных отношений между оценками, в частности широко используется:

- отношение нестрогого предпочтения (называемое также отношением Парето)

$$\vec{y}' \Phi_1 \vec{y}'' \quad \leftrightarrow \quad \vec{f}(x') \geq \vec{f}(x''),\ f_i(x') \geq f_i(x''),\ i = \overline{1,m},\ f_i(x') \neq f_i(x''); \qquad (1.5а)$$

- отношение строгого предпочтения (называемое также отношением Слейтера)

$$\vec{y}' \Phi_1 \vec{y}'' \leftrightarrow \vec{f}(x') > \vec{f}(x''),\ f_i(x') \geq f_i(x''),\ i = \overline{1,m}. \qquad (1.5б)$$

Также существуют и другие типы бинарных отношений: $\overset{=}{>}$, $>_{=}$. Для указанных бинарных отношений выполняются включения $> \subset \geq \subset >_{=} \subset \overset{=}{>}$. Следует заметить, что $>_{=}$ это объединение $\geq$ и $=$, а отношение $\overset{=}{>}$ верно тогда и только тогда, когда отношение $\geq$ неверно.

Согласованность отношений предпочтения на множестве решений и на множестве векторных оценок. Пусть определена векторная целевая функция $\vec{f}(x) = (f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x))$ на множестве допустимых решений X. При отображении с помощью векторной целевой функции $\vec{f}(x), x \in X$ ему соответствует множество оценок Y (1.4). Будем полагать, что на множествах X и Y заданы отношения строгого предпочтения $\underset{X}{\succ}$ и $\underset{Y}{\succ}$ соответственно. Каждому решению $x \in X$ соответствует определенная векторная оценка $\vec{y} = \vec{f}(x) \in Y$ и, наоборот, каждой оценке $\vec{y}$ соответствуют такие решения x, для которых $\vec{f}(x) = \vec{y}$. Поэтому указанные бинарные

отношения согласованы друг с другом: $\vec{y}' \underset{Y}{\succ} \vec{y}''$ имеет место тогда и только тогда, когда $x' \underset{X}{\succ} x''$, где $\vec{y}' = \vec{f}(x')$ и $\vec{y}'' = \vec{f}(x'')$. Следовательно, результаты, сформулированные в терминах оценок $\vec{y}$, могут быть переформулированы применительно к решениям x, и наоборот.

Для определенности ограничимся рассмотрением задач максимизации. Полученные результаты и выводы легко переформулируются применительно к задачам минимизации. В частности, многокритериальная задача максимизации характеризуется тем, что оценка $\vec{y}'$ всегда предпочтительнее оценки $\vec{y}''$, если выполняется неравенство $\vec{y}' \geq \vec{y}''$.

Для лица, принимающего решение, желательно по каждому из частных целевых функций $f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x)$ получить по возможности большее значение, т.е. максимизировать каждую из функций. Точка максимума на множестве X одновременно для всех целевых функций заведомо является оптимальным решением многокритериальной задачи максимизации. Однако на практике этот случай имеет место крайне редко, так как такой точки максимума, как правило, не существует. Поэтому при отсутствии дополнительной информации о предпочтениях $\underset{X}{\succ}$ и $\underset{Y}{\succ}$ в многокритериальной задаче удается найти лишь согласованный экстремум частных целевых функций, которому соответствует некоторое множество оптимальных решений. Согласованный экстремум совокупности целевых функций означает, что дальнейшее улучшение значений каждой из них может быть достигнут лишь за счет ухудшения других целевых функций.

Парето-оптимальность. В многокритериальных задачах оптимизации бинарное отношение $\geq$ играет важную роль. Поэтому множество оптимальных оценок по отношению $\geq$ на множестве Y имеет специальное название: *множество Парето-оптимальных (оптимальных по Парето)* или *эффективных оценок.* Это множество обозначают через $P(Y) = opt_{\geq} Y$. Включение $\vec{y}^{(o)} \in P(Y)$ имеет место тогда и только тогда, когда не существует другой оценки $\vec{y} \in Y$, для которой было бы выполнено векторное неравенство $\vec{y} \geq \vec{y}^{(o)}$.

Соответствующее решение $x^{(o)} \in X$, для которого справедливо включение $\vec{y}^{(o)} = \vec{f}(x^{(o)}) \in P(Y)$, называют *Парето-оптимальным (оптимальным по Парето)* или *эффективным решением* относительно векторной функции

$\vec{f}(\bullet)$ на множестве X. Множество всех таких решений обозначают через $P_f(X)$. Таким образом, включение $x^{(o)} \in P_f(X)$ имеет место тогда и только тогда, когда не существует других $x \in X$ таких, что выполняется неравенство $\vec{f}(x) \geq \vec{f}(x^{(o)})$.

При $m = 1$ бинарное отношение $\geq$ превращается в отношение $>$ для чисел и Парето-оптимальная оценка совпадает с максимальным элементом числового множества. При этом сформулированное определение Парето-оптимального решения превращается в определение точки максимума скалярной функции $f^{(i)}(\tilde{o})$. Таким образом, понятие Парето-оптимальной точки можно рассматривать как обобщение понятия точки максимума функции на случай нескольких функций.

Аналогично предыдущим определениям оценки, максимальные по отношению $>$, называются слабоэффективными (слабо оптимальными по Парето) или оптимальными по Слейтеру. Множество таких оценок из Y обозначается через $S(Y)$ и называется слабоэффективным. Для указанных множеств выполняется включение $P(Y) \subseteq S(Y)$.

1.2. Нахождения Парето-оптимальных проектных решений

Парето-оптимальные проектные решения могут быть найдены как непосредственно на множестве Φ_∂ с применением введенных бинарных отношений предпочтения, так и в пространстве введенных показателей качества – в критериальном пространстве оценок. При этом каждый вариант системы ϕ отображается из множества допустимых вариантов Φ_∂ в критериальное пространство $Y \subset R^m$

$$Y = \vec{K}(\Phi_\partial) = \left\{ \vec{y} \in Y \middle| \vec{y} = (\vec{k}(\phi), \quad \phi \in \Phi_\partial \right\}. \tag{1.6}$$

Отношению предпочтения $\succ$ на множестве Φ_∂ соответствует отношение $\geq$ в критериальном пространстве оценок Y. Для любых двух проектных решений $\phi', \phi'' \in \Phi_\partial$, для которых верно векторное неравенство $\vec{k}(\phi') \geq \vec{k}(\phi'')$, всегда имеет место отношение $\phi' \succ \phi''$.

Как правило, показатели качества и целевые функции (2) являются связанными и конкурирующими между собой. В этом случае достигнуть потенциального значения каждого из показателей в отдельности не представляется возможным. При этом может быть достигнут лишь их

согласованный оптимум – оптимум по критерию Парето. Это означает, что дальнейшее улучшение каждого из показателей может быть достигнуто лишь за счет ухудшения остальных показателей качества системы.

Оптимуму по критерию Парето в критериальном пространстве соответствует подмножество Парето-оптимальных оценок, которые соответствуют недоминируемым вариантам системы

$$P(Y) = opt_{\geq} Y = \left\{ \vec{k}(\phi^o) \in Y : \exists \vec{k}(\phi) \in Y : \vec{k}(\phi) \geq \vec{k}(\phi^o) \right\} \qquad (1.7)$$

При нахождении подмножества Парето-оптимальных оценок согласно (1.7) исключаются безусловно худшие оценки, а следовательно, и соответствующие им безусловно худшие варианты системы.

Таким образом, при конечной мощности множества допустимых вариантов системы Φ_∂ нахождение Парето-оптимальных оценок и соответствующих им решений может производится согласно (1.7). На этом основан *метод дискретного выбора* Парето-оптимальных решений.

Кроме этого, для нахождения Парето-оптимальных решений могут быть использованы специальные методы, например, весовой метод, метод рабочих характеристик, метод последовательных уступок и другие методы.

В случае применения *весового метода* Парето-оптимальные проектные решения находятся путем оптимизации взвешенной суммы частных целевых функций

$$P_{\vec{k}}(\Phi_\partial) = \left\{ \phi^{(o)} \in \Phi_\partial : \arg \underset{\phi \in \Phi_\partial}{extr} \left[k_p(\phi) = \lambda_1 k_1(\phi) + \lambda_2 k_2(\phi) + ... + \lambda_m k_m(\phi) \right] \right\}, \qquad (1.8)$$

в которой весовые коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_m$ выбираются из условия $\lambda_i > 0, \ \sum_{i=1}^{m} \lambda_i = 1.$ Множество Парето-оптимальных решений содержит те варианты системы, которые удовлетворяют условию (1.8) при разных допустимых комбинациях весовых коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_m$.

Метод рабочих характеристик состоит в том, что все целевые функции, кроме одной, например, первой, переводятся в разряд ограничений типа равенства, и ищется её экстремум на множестве допустимых альтернатив Φ_∂

$$P_{\bar{k}}(\Phi_{\partial}) = \left\{ \phi^{(o)} \in \Phi_{\partial} : \arg \underset{\phi \in \Phi_{\partial}}{extr} \left[k_1(\phi) \right], \quad k_2(\phi) = K_{2\phi};\ k_3(\phi) = K_{3\phi}, ..., k_m(\phi) = K_{m\phi} \right\}.$$

(1.9)

Здесь $K_{2\phi}, K_{3\phi}, ..., K_{m\phi}$ – некоторые фиксированные, но произвольные значения показателей качества.

Оптимизационная задача (1.9) решается последовательно для всех допустимых комбинаций значений $K_{2\phi}, K_{3\phi}, ..., K_{m\phi}$. При этом определяется некоторое подмножество Парето-оптимальных вариантов системы и соответствующая им многомерная рабочая поверхность в критериальном пространстве, которая при определенных условиях совпадает с Парето-оптимальной поверхностью. Следует отметить, что каждая точка Парето-оптимальной поверхности обладает свойством m-кратного согласованного по Парето оптимуму. Каждой точке этой поверхности соответствует потенциально достижимое значение одного из показателей k_{opt} при фиксированных (соответствующих этой точке) значениях остальных $(m-1)$ показателей качества. Парето-оптимальная поверхность может быть описана любым из следующих соотношений

$$k_{1opt} = f_{no}^{1}(k_2, k_3, ..., k_m), ..., k_{mopt} = f_{no}^{m}(k_1, k_2, ..., k_{m-1}), \qquad (1.10)$$

которые представляют собой многомерные диаграммы обмена между показателями качества, показывающими, как потенциально достижимое значение соответствующего показателя зависит от потенциально достижимых значений других показателей качества.

Близким к методу рабочих характеристик при нахождении Парето-оптимальных вариантов систем является *метод главного критерия*. В этом методе исходная многокритериальная задача оптимизации сводиться к задаче оптимизации одного из показателей (целевой функции), который объявляется главным. Остальные показатели качества (частные целевые функции) вводятся в раздел ограничений типа неравенства (их значения не должны превышать некоторых «пороговых значений»). Формализованная процедура поиска Парето-оптимальных вариантов систем аналогична (1.9) с той разницей, что ограничения на значения частных целевых функций имеют характер неравенств.

Аналогичный подход к нахождению Парето-оптимальных вариантов систем используется в известном *методе последовательных уступок*, в

котором также выбирается один из показателей качества (целевая функция), а на значения остальных частных целевых функций вместо ограничений задаются некоторые фиксированные уступки.

Следует отметить, что в указанных специальных методах нахождения Парето-оптимальных вариантов систем исходная многокритериальная задача оптимизации сводится к решению некоторого множества однокритериальных (скалярных) задач оптимизации при разных типах ограничений. Полученное при этом множество оптимальных решений используется при формировании подмножества Парето-оптимальных вариантов систем, оптимальных по совокупности показателей качества.

Многомерные потенциальными характеристиками системы. Понятие Парето-оптимальности является фундаментальным для теории и практики многокритериальной оптимизации систем. Полученная с использованием одного из методов Парето-оптимальная поверхность связывает потенциально достижимые значения показателей и представляет собой согласованный оптимум по Парето значений в общем случае зависимых и конкурирующих между собой показателей качества систем. Поэтому, определяя Парето-оптимальную поверхность в критериальном пространстве, тем самым находят многомерные потенциальные характеристики (МПХ) системы и связанные с ними многомерные диаграммы обмена (МДО).

По сравнению с широко используемыми одномерными потенциальными характеристиками системы МПХ дают качественно новую информацию для анализа проектных решений, поскольку дают представления о потенциально возможных значениях совокупности показателей и потенциальных возможностях системы. Анализируя МДО можно выяснить, как необходимо изменить значения одних показателей качества системы ради улучшения других показателей, а также как при этом следует изменить структуру и параметры соответствующих систем.

Если найденное подмножество Парето-оптимальных вариантов системы оказалось узким, то в качестве оптимального варианта можно использовать любой из них. В таком случае можно считать, что отношение строгого предпочтения в пространстве допустимых вариантов системы $\succ$ совпадает с отношением предпочтения в критериальном пространстве оценок $\geq$ и поэтому $opt_{\succ}Y = P(Y)$. Однако часто на практике подмножество Парето-оптимальных оценок $P(Y)$ оказывается достаточно широким. Это означает,

что отношения предпочтения $\succ$ и $\geq$ хотя и связаны аксиомой Парето, однако не совпадают. При этом справедливы включения $opt_{\succ} Y \subset P(Y)$, а также $opt_{\succ} \Phi \subset P_{\tilde{k}}(\Phi_{\partial})$.

В ряде задач проектирования систем возникает необходимость сужения найденного подмножества Парето-оптимальных решений до единственного варианта системы. Для этого могут быть использованы условные критерии предпочтения, основанные на разных методах сужения подмножества Парето. Однако, окончательный выбор единственного проектного решения должен производиться лишь в пределах найденного подмножества Парето-оптимальных систем, которое получено за счет исключения безусловно худших вариантов системы.

1.3. Сужение подмножества Парето до единственного проектного решения

Когда для последующих этапов проектирования должен быть выбран единственный вариант системы, возникает необходимость сужения подмножества Парето-оптимальных решений до единственного варианта системы с привлечением дополнительной информации об отношении предпочтения заказчика. Такая информация появляется в результате всестороннего анализа Парето-оптимальных вариантов системы, в частности, их структуры, параметров, многомерных рабочих характеристик, многомерных диаграмм обмена, относительной важности введенных показателей качества системы и пр. Полученные при этом дополнительная информация о предпочтениях используются для построения условного критерия предпочтения, основанного, в частности, на введении некоторой скалярной целевой функции, оптимизация которой приводит к выбору единственного варианта системы.

Для сужения множества Парето-оптимальных решений могут использоваться различные подходы, в частности, основанные на теории полезности, теории нечетких множеств, лексографическом сравнении и др. Рассмотрим некоторые из распространенных методов сужения подмножества Парето.

При использовании *теории полезности* выбирается скалярная целевая функция в виде аддитивной, мультипликативной, полилинейной функции полезности, которая в частном случае может иметь вид

$$F(k_1,k_2,...,k_m)=\sum_{j=1}^{m} c_j f_j(k_j), \qquad (1.11)$$

где c_j – шкалирующие коэффициенты, $f_j(k_j)$ – некоторые одномерные функции полезности, являющиеся оценками полезности варианта системы ϕ по показателю качества системы k_j.

Использование *теории нечетких множеств* основано на том, что из-за априорной неопределенности относительно предпочтения заказчика понятие "наилучший вариант системы" нельзя определить точно. Можно считать, что это понятие представляет собой нечеткое множество. При этом для оценивания эффективности системы могут быть использованы основные положения теории нечетких множеств. В соответствии с ней множество оценок эффективности вариантов системы будет нечетким множеством $K=\{(k_1,k_2,...,k_m),\xi_{\vec{k}}(k_1,k_2,...,k_m)\}$, которое является множеством подчиненных оценок, ранжированных по значениям функции принадлежности.

Наиболее общая форма функции принадлежности, интерпретированная в терминах теории нечетких множеств, имеет вид

$$\xi_{\vec{k}}(k_1,k_2,...,k_m)=\frac{1}{m}\left\{\sum_{j=1}^{m}\left[\xi_{k_j}(k_j)\right]^{\beta}\right\}^{\frac{1}{\beta}}. \qquad (1.12)$$

Достоинством такой формы функции принадлежности является то, что в зависимости от значения параметра β реализуется широкий класс функций от линейной аддитивной формы при $\beta=1$ до сугубо нелинейных зависимостей при $\beta\to\infty$.

Нахождение экстремального значения скалярной целевой функции (1.11) или (1.12) позволяет выбрать соответствующий ему единственный вариант системы из подмножества Парето-оптимальных проектных решений.

Лексико-графический подход к выбору единственного проектного решения из подмножества Парето может быть использован, когда желательно получить по возможности большее значение одного из показателей качества, например k_1, даже за счет "потерь" по остальным показателям. Это соответствует ситуации, когда весь набор показателей качества $k_1,k_2,...,k_m$ строго упорядочен по важности и при сравнении проектных

решений используется лексико-графическое отношение $\vec{k}' \underset{\succ}{lex} \vec{k}''$ соответствующих оценок показателей качества для вариантов систем ϕ' и ϕ''. При выполнении соотношения $\vec{k}' \underset{\succ}{lex} \vec{k}''$ говорят, что вектор $\vec{k}'$ лексико-графически больше, чем вектор $\vec{k}''$. При $m = 1$ лексико-графическое отношение совпадает с отношением > на подмножестве вещественных чисел.

Если в качестве отношения строго предпочтения используют лексико-графическое отношение, то это означает, что из пары оценок показателей качества (и соответствующих им проектных решений) предпочтительнее та оценка, у которой первая компонента вектора $\vec{k}'$ (оценка показателя качества k_1) больше, независимо от соотношений межу остальными компонентами вектора оценок $\vec{k}$. Когда первые компоненты двух оценок одинаковы, то предпочтительнее оценка (и соответствующее проектное решение), имеющая большую вторую компоненту; остальные компоненты данной оценки могут при этом "значительно уступать" соответствующим вторым компонентам оценки и т.д. В определении лексико-графического отношения важную роль играет порядок перечисления показателей качества.

1.4. Выводы

1. Изложена методология выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества, которая сформирована на базе основных положений теории многокритериальной оптимизации.

1. Приведены особенности формализованных постановок задачи выбора оптимальних рішень при ординалистическом подходе и кардиналистическом подходе к определению поняття оптимальности решений с учетом совокупности показателей качества.

2. Рассмотрены методы формирования подмножества Парето-оптимальных решений с учетом безусловного критерия предпочтения в критериальном пространстве показателей качества.

3. Проанализированы свойства Парето-оптимальных решений, в частности, многомерных потенциальных характеристик и многомерных диаграм обмена показателей качества.

4. Рассмотрены особенности ссужения подмножества Парето до единственного проектного варианта с использованием условного критерия предпочтения и привлечении дополнительной информации от экспертов.

2. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Растущие объемы и разнородность трафика, предъявляемые требования к качеству его передачи в мультисервисных сетях определяют необходимость применения новых подходов к их управлению. В настоящее время существует большое количество алгоритмов маршрутизации, реализованных по различным принципам [26 - 40]. Все эти алгоритмы решают задачи выбора оптимальных маршрутов, как правило, с учетом одного из показателей качества. Поэтому в современных мультисервисных сетях связи возникает задача учета совокупности показателей для обеспечения противоречивых требований по качества обслуживания различных типов трафика. Это определяет необходимость применения методов многокритериальной оптимизации на сетях для решения задач маршрутизации. В настоящем разделе рассматриваются теоретические и практические особенности многокритериальной оптимизации при решении задачи выбора оптимальных маршрутов в мультисервисных сетях [22, 23] на основе методологии, изложенной в разделе 1.

2.1. Основные принципы управления сетью связи

Рассмотрим общие положения управления сетью связи. Система управления включает объект управления, управляющее устройство (алгоритм управления) и измерительную систему. На объект управления поступают полезные входные воздействия $X(t)$ и помехи $\xi/(t)$. Состояние объекта определяется некоторой реакцией $V(t)$. Процесс экстремального управления заключается в том, чтобы по оценкам состояния объекта $V*(t)$, полученным с помощью измерительной системы и алгоритма оценивания, выработать оптимальные управляющие воздействия $U(t)$, которые бы приводили объект к требуемому состоянию $V(t)$. Эффективность работы системы управления определяется выбранным критерием оптимальности. Качество работы системы управления определяется степенью отклонения реального состояния системы $V^*(t)$ от требуемого $V(t)$

$$\psi(t) = V(t) - V^*(t).$$

Требуется выработать такие управляющие воздействия $U(t)$, чтобы добиться экстремума некоторого целевого функционала, в частности

$$J = \overline{\left[V_i(t) - V^*(t)\right]^2} \to \min_U . \qquad (2.1)$$

В сетях связи используемые разные механизмы управления (обработки потоков):

1. Резервирование полосы пропускания.
2. Управление шириной полосы пропускания.
3. Управление маршрутизацией и планирование маршрутов.
4. Использование кэш технологий.
5. Управление очередями.

Будем дальше рассматривать маршрутизацию в качестве механизма изменения состояния сети, под воздействием управляющих сигналов. В разветвленных коммутируемых сетях связи между любыми двумя узлами сети (источником и адресатом) имеется, как правило, несколько независимых путей, по которым могут быть переданы сообщения. Основной задачей маршрутизации является выбор определенного пути из указанного множества. Выбор осуществляется с помощью матриц (таблиц) маршрутов, которые хранятся в каждом узле коммутации (УК). Матрица маршрутов M_i i-го УК задает очередность выбора исходящих направлений при установлении связи i-го узла к любому из других узлов сети.

Матрицу M_i можно представить следующим образом:

$$M_i = \begin{array}{c} \\ \beta_{i1} \\ \beta_{i2} \\ \vdots \\ \beta_{ij} \\ \vdots \\ \beta_{iA} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} \text{УК}_1 & \text{УК}_2 & \cdots & \text{УК}_r & \cdots & \text{УК}_N \end{array} \\ \begin{bmatrix} m_{i11} & m_{i12} & \cdots & m_{i1r} & \cdots & m_{i1N} \\ m_{i21} & m_{i22} & \cdots & m_{i2r} & \cdots & m_{i2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{ij1} & m_{ij2} & \cdots & m_{ijr} & \cdots & m_{ijN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{iA_{i1}} & m_{iA_{i2}} & \cdots & m_{iA_{ir}} & \cdots & m_{iA_{iN}} \end{bmatrix} \end{array} \qquad (2.2)$$

Здесь N – число УК сети, β_{ij} - j-я ветвь, исходящая из УК_i, $j = \overline{1, A_i}$, A_i – количество ветвей, исходящих из УК_i, m_{ijr} – элемент, определяющий порядковый номер ветви β_{ij} при выборе пути передачи информации от УК_i

к $УК_r$, в случае простой матрицы маршрутов, либо вероятность выбора ветви β_{ij}, $\sum_{j=1}^{A_i} m_{ijr} = 1, r = \overline{1,N}$ в случае стохастической матрицы маршрутов.

Одним из вариантов воздействия на систему (изменение состояния системы) может быть выбор маршрутов с использованием многокритериального подхода.

2.2. Многокритериальный подход при выборе оптимальных маршрутов в мультисервисных сетях

Формулируется следующая многокритериальная задача маршрутизации. Пусть определено множество допустимых решений (маршрутов) на графе сети $X = \{x\}$, который называется дискретным, если X конечно или счетно.

Допустимыми будут те решения $x \in X$ в виде подграфов $x = (V_x, E_x)$ ($V_x \in V$, $E_x \in E$) для многовершинного графа $G = (V, E)$, которые удовлетворяют ограничениям. Предполагается, что на X задана векторная целевая функция $\vec{F}(x) = (F_1(x), \ldots, F_v(x), \ldots, F_m(x))$, составляющие которой определяют показатели качества маршрутов. Как правило, показатели качества являются связанными между собой и антагонистическими. При этом оптимальные по совокупности показателей качества варианты маршрутов представляет собой множество Парето-оптимальных альтернатив решения задачи маршрутизации, которым соответствует согласованный оптимум частных целевых функций

$$F_1(x), \ldots, F_v(x), \ldots, F_m(x). \qquad (2.3)$$

Рассмотрим особенности выбора оптимальных маршрутов в мультисервисной сети связи, состоящую из узлов и линий связи, соединяющие узлы. Эта сеть представляется графом $G = (V, E)$, где V – множество узлов, E – множество линий связи. Каждая линия e характеризуется показателями качества обслуживания k_l, которым в соответствие можно ставить весовые функции $w_l(e)$ с заданными ограничениями $w_l(e) \le c_l$, $l = \overrightarrow{1,m}$. Для учета совокупности показателей качества обслуживания предлагается использовать скалярную целевую функцию линии e в виде:

$$F(e) = \lambda_1 w_1(e) + \ldots + \lambda_i w_i(e) + \ldots + \lambda_m w_m(e), \text{ где } \lambda_i > 0, \sum_{i=1}^{m} \lambda_i = 1. \qquad (2.4)$$

Предлагается решать задачу нахождения оптимального пути (маршрута) p от узла источника s к узлу назначения t путем нахождения экстремального значения целевой функции маршрута:

$$\mathrm{extr}\left(w(p) = \sum_{j=1}^{N} F_j(e) \right), \tag{2.5}$$

где N - число линий связи, входящих в маршрут.

Первым этапом выбора оптимальных маршрутов является выделение подмножества Парето-оптимальных маршрутов, в результате чего отбрасываются безусловно худшие варианты маршрутов. Вариант маршрута $\tilde{x} \in X$ является Парето-оптимальным, если не существует другого допустимого решения $x^* \in X$, что выполняются неравенства $F_v(x^*) \le F_v(\tilde{x}), v = 1,\ldots,N$, среди которых хотя бы одно является строгим.

Для нахождения подмножества Парето-оптимальных решений предлагается использовать весовой метод. Его суть сводится к нахождению экстремума взвешенной сумы показателей качества маршрутов сети (1.8) при всевозможных комбинациях коэффициентов, характеризующих их относительную важность. В результате этого выбирается некоторое подмножество Парето-оптимальных вариантов маршрутизации с учетом совокупности показателей качества. В критериальном пространстве Парето-оптимальным вариантам маршрутов соответствует некоторая весовая поверхность, точки которой определяются согласованным оптимумом значений выбранных показателей качества маршрутов. Ни одна из безусловно худших точек (вариантов маршрутов) не может принадлежать этой поверхности, поскольку они исключаются при нахождении подмножества Парето.

Полученные Парето-оптимальные варианты маршрутов равнозначны с точки зрения безусловного критерия предпочтения (БКП) - критерия Парето. Поэтому каждый из них может быть использован при решении задачи многопутевой маршрутизации, что позволит равномерно загрузить линии связи соответствующими видами трафика с требуемым качеством обслуживания.

Однако в ряде случаев возникает необходимость выбора единственного варианта маршрутизации с учетом дополнительной информации, поступающей от экспертов (опытных специалистов). При этом могут быть применены разные методы сужения подмножества Парето до

единственного варианта, в частности: с использованием функций ценности, применении лексикографического подхода, на основе теории размытых множеств .

2.3. Практические особенности многокритериального выбора оптимальных маршрутов на примере фрагмента сети связи

Рассмотрены практические особенности решения сформулированной многокритериальной задачи маршрутизации на примере фрагмента сети связи (рис. 2.1). Модель исследуемой сети состоит из двенадцати узлов, связанных между собой линиями связи с потерями. Каждая линия связи имеет пропускную способность 128 кбит/с. Информация передается из узла 0 во все остальные узлы. Трафик передается со скоростью 64 кбит/с, размер передаваемых пакетов 210 байт. Исследования проводились в программном пакете Network Simulator.

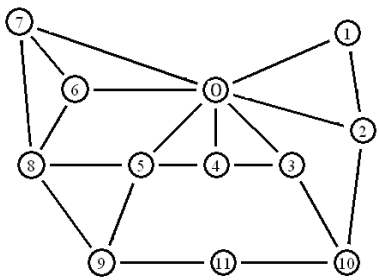

Рис. 2.1. Фрагмент исследуемой сети связи

Рассматривались следующие показатели качества обслуживания, которыми характеризуется каждая линия связи: время задержки пакетов, уровень потерь пакетов, стоимость использования линии связи.

Считалось, что время задержки передачи пакетов определяется в основном длиной линий связи. Уровень потерь пакетов зависит от модели потерь, введенной в каждой линии. Стоимость использования линии зависит от времени задержки на линии, величины потерь и интенсивности использования. Нормированные к максимальным значениям показатели качества линий связи приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Нормированные к максимальным значениям показатели качества линий связи

Линия связи	Время задержки передачи пакетов	Уровень потерь пакетов	Стоимость использования линии связи
0-1	0.676	1	0.333
0-2	1	0.25	1
0-3	0.362	1	0.333
0-4	0.381	0.25	1
0-5	0.2	1	0.333
0-6	0.19	1	0.333
0-7	0.571	0.25	1
7-6	0.4	0.25	0.333
7-8	0.362	0.25	0.667
8-6	0.314	0.5	0.5
8-5	0.438	0.25	0.333
8-9	0.248	0.5	0.333
9-5	0.257	0.25	1
9-11	0.571	0.25	0.667
11-10	0.762	0.25	0.333
5-4	0.381	0.25	0.667
2-10	0.457	0.25	0.333
3-10	0.79	0.25	0.333
4-3	0.286	0.25	0.333
1-2	0.448	0.25	0.333

При анализе графа сети (рис. 2.1) видно, что для каждого узла назначения существует большое множество вариантов выбора маршрута, даже при условии невозможности повторного посещения пройденного узла. Количество маршрутов для каждого узла назначения с узлом 0 приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Количество маршрутов для каждого узла назначения с узлом 0

Узел источник – узел назначения	Количество вариантов маршрутов
0-1	27
0-2	27
0-3	29
0-4	29
0-5	25
0-6	41
0-7	41
0-8	22
0-9	27
0-10	27
0-11	31

Ставится задачи выбора множество оптимальных по совокупности показателей качества вариантов маршрутов, которые соответствуют согласованному оптимуму показателей качества.

Выбор Парето-оптимальных маршрутов. Для решения задачи выбора Парето-оптимальных маршрутов применим описанный в п. 1.3 весовой метод с использованием следующих показателей качества: k_1, отражающий длину линии; k_2, отражающий уровень потерь пакетов; k_3, отражающий стоимость использования линий связи.

При минимизации выражения (2) со всевозможными комбинациями весовых коэффициентов получим множество Парето-оптимальных маршрутов, с соответствующими согласованными оптимумами введенных показателей качества.

Значения разных комбинаций коэффициентов, характеризующих относительную важность показателей качества, с шагом 0.1 и соответствующие им оптимальные маршруты приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Значения разных комбинаций коэффициентов, характеризующих относительную важность показателей качества, и соответствующие им Парето-оптимальные маршруты

Узлы источники – узлы назначения	Парето-оптимальные маршруты	Коэффициенты важности показателей качества
0-1; 0-5; 0-6	0-1; 0-5; 0-6	(0.8;0.1;0.1); (0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7); (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3); (0.5;0.3;0.2); (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.4;0.5); (0.1;0.5;0.4); (0.4;0.5;0.1); (0.4;0.1;0.5); (0.5;0.4;0.1); (0.5;0.1;0.4); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.3;0.4;0.3); (0.6;0.2;0.2); (0.2;0.6;0.2); (0.2;0.2;0.6)
	0-2-1; 0-4-5; 0-7-6	(0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1); (0.1;0.7;0.2)
0-2	0-2	(0.8;0.1;0.1); (0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1) (0.1;0.7;0.2) (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3) (0.5;0.3;0.2); (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.4;0.5); (0.1;0.5;0.4); (0.4;0.5;0.1); (0.5;0.4;0.1); (0.5;0.1;0.4); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.6;0.2;0.2); (0.2;0.6;0.2); (0.2;0.2;0.6) (0.3;0.4;0.3)
	0-1-2	(0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7); (0.4;0.1;0.5);
0-3	0-3	(0.8;0.1;0.1); (0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7); (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3); (0.5;0.3;0.2); (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.4;0.5); (0.1;0.5;0.4); (0.4;0.1;0.5); (0.5;0.4;0.1); (0.5;0.1;0.4); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.6;0.2;0.2);; (0.2;0.2;0.6) (0.3;0.4;0.3)
	0-4-3	(0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1); (0.1;0.7;0.2) (0.4;0.5;0.1) (0.2;0.6;0.2);
0-4	0-4	(0.8;0.1;0.1); (0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1) (0.1;0.7;0.2) (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3) (0.5;0.3;0.2); (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.4;0.5); (0.1;0.5;0.4); (0.4;0.5;0.1); (0.5;0.4;0.1); (0.5;0.1;0.4); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.6;0.2;0.2); (0.2;0.6;0.2); (0.2;0.2;0.6); (0.4;0.1;0.5); (0.3;0.4;0.3)
	0-3-4	(0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7)
0-7	0-7	(0.8;0.1;0.1); (0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1) (0.1;0.7;0.2) (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3) (0.5;0.3;0.2); (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.4;0.5); (0.1;0.5;0.4); (0.4;0.5;0.1); (0.5;0.4;0.1); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.6;0.2;0.2); (0.2;0.6;0.2); (0.2;0.2;0.6); (0.3;0.4;0.3)
	0-6-7	(0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7); (0.4;0.1;0.5); (0.5;0.1;0.4)
0-8	0-6-8	(0.8;0.1;0.1) (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2)
	0-7-8	(0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1); (0.1;0.7;0.2) (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.4;0.5;0.1); (0.2;0.6;0.2); (0.5;0.4;0.1)
	0-5-8	(0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3) (0.5;0.3;0.2); (0.1;0.4;0.5);

		(0.1;0.5;0.4) (0.4;0.1;0.5); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.3;0.4;0.3); (0.6;0.2;0.2); (0.2;0.2;0.6) (0.5;0.1;0.4)
0-9	0-5-9	(0.8;0.1;0.1); (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.3;0.4;0.3); (0.6;0.2;0.2); (0.2;0.6;0.2); (0.5;0.4;0.1); (0.5;0.1;0.4); (0.4;0.1;0.5); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3); (0.5;0.3;0.2); (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.4;0.5); (0.1;0.5;0.4); (0.4;0.5;0.1)
	0-4-5-9	(0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1); (0.1;0.7;0.2)
	0-5-8-9	(0.2;0.2;0.6); (0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7)
0-10	0-2-10	(0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.4;0.5); (0.1;0.5;0.4); (0.4;0.5;0.1) (0.3;0.4;0.3); (0.2;0.6;0.2); (0.5;0.4;0.1); (0.1;0.8;0.1);
	0-3-10	(0.8;0.1;0.1); (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.5;0.2;0.3); (0.5;0.3;0.2); (0.4;0.1;0.5); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.6;0.2;0.2); (0.2;0.2;0.6); (0.5;0.1;0.4); (0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7)
0-11	0-5-9-11	(0.8;0.1;0.1); (0.7;0.2;01); (0.7;0.1;0.2); (0.4;0.3;0.3); (0.3;0.3;0.4); (0.3;0.4;0.3); (0.5;0.2;0.3); (0.5;0.3;0.2); (0.4;0.5;0.1); (0.6;0.2;0.2); (0.5;0.4;0.1); (0.5;0.1;0.4)
	0-2-10-11	(0.1;0.8;0.1); (0.2;0.7;0.1); (0.1;0.7;0.2); (0.3;0.5;0.2); (0.2;0.5;0.3); (0.1;0.5;0.4); (0.2;0.6;0.2);
	0-3-10-11	(0.1;0.1;0.8); (0.1;0.2;0.7); (0.2;0.1;0.7); (0.2;0.3;0.5); (0.3;0.2;0.5); (0.1;0.4;0.5); (0.4;0.1;0.5); (0.2;0.2;0.6)

Для каждого узла назначения получены Парето-оптимальные маршруты. При этом ни одному из них нельзя отдать предпочтения, так как они равнозначны с точки зрения БКП.

Для иллюстрации на рис. 2.2 изображено некоторое множество вариантов маршрутов между узлами 0 и 8 в пространстве показателей качества k_1 и k_2. Левая нижняя граница, включающая три точки, соответствует множеству Парето-оптимальных решений. Нетрудно видеть, что им соответствует согласованный оптимум по Парето показателей качества (минимально возможное значения одного показателей качества при заданных фиксированных значениях другого показателя). Эта граница также являет собой диаграмму обмена показателей качества, которая показывает, как зависит потенциально достижимое значение одного из показателей качества от значения другого показателя.

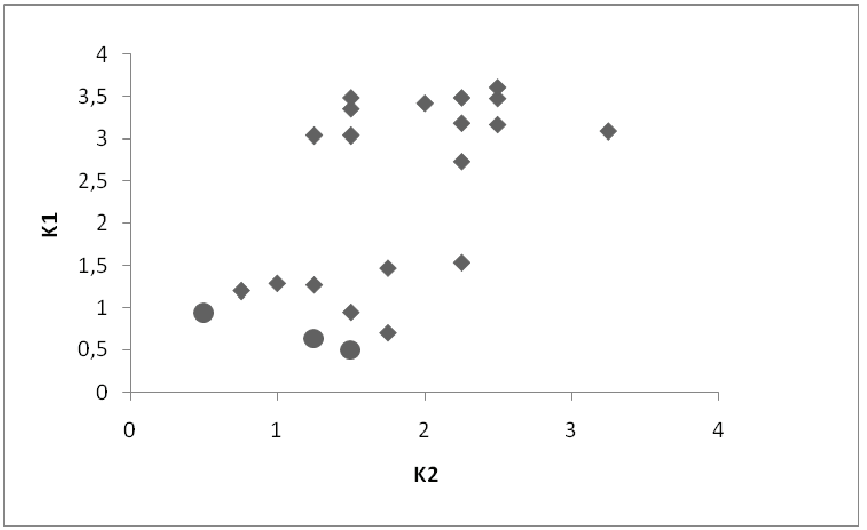

Рис. 2.2. Множество вариантов маршрутов между узлами 0 и 8

Полученное в табл. 2.3 подмножество Парето-оптимальных вариантов маршрутов можно использовать для организации многопутевой маршрутизации и выбора оптимальных маршрутов для передачи соответствующего трафика с требуемым качеством обслуживания.

При этом возникает вопрос: имеет ли смысл осуществлять выбор на основе безусловного критерия предпочтения (критерия Парето), если в дальнейшем для выбора единственного маршрута приходится вводить условный критерий предпочтения. В обоснованность целесообразности введения этапа нахождения Парето-оптимальных вариантов следует отметить:

– применение БКП дает возможность найти все Парето-оптимальные маршруты, отбросив при этом все безусловно худшие варианты маршрутов;

– применение БКП дает возможность найти потенциально наилучшие возможные значения каждого из показателей качества и связь между ними;

– даже если при выборе единственного варианта маршрута приходится вводить условный критерий предпочтения, то лучше вводить разного рода условности на более позднем этапе выбора.

Выбор единственного маршрута из подмножества Парето-оптимальных. Для выбора единственного маршрута из полученного множества Парето-оптимальных вариантов необходимо использовать дополнительную информацию от экспертов, которая уточняет и формализует начальное нечеткое представление об оптимальном маршруте.

Для выбора единственного маршрута будем использовать один из методов сужения множества Парето – лексикографический метод, когда набор показателей качества $k_1 \dots k_m$ строго упорядочен по важности. При этом используется лексикографическое отношение вариантов маршрутов, описываемых векторами оценок значений показателей качества $\vec{v} = (k_1 \dots k_m)$.

Приведем особенности лексикографического отношения маршрутов. Пусть дано векторы оценок $\overrightarrow{v'}, \overrightarrow{v''} \in V$. Лексикографическое отношение $\overrightarrow{v'} \overset{lex}{\succ} \overrightarrow{v''}$ выполняется тогда, когда выполняется одно из таких условий:

$$\begin{aligned} & v_1' > v_1'', \\ & v_1' = v_1'', v_2' > v_2'', \\ & \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ & v_j' > v_j'', j = 1,2,\dots,m-1; v_m' > v_m''. \end{aligned} \qquad (2.3)$$

Здесь $v_1' > v_1'' \in V$ – координаты соответствующих векторов оценок.

В определении лексикографического отношения важную роль играет порядок перечисления показателей качества. При изменении порядка перечисления изменяется и лексикографическое отношение.

В результате применения лексикографического метода из Парето-оптимальных вариантов маршрутов был выбран единственный при двух видах упорядочивания показателей качества: (k_2, k_3, k_1) и (k_3, k_2, k_1).

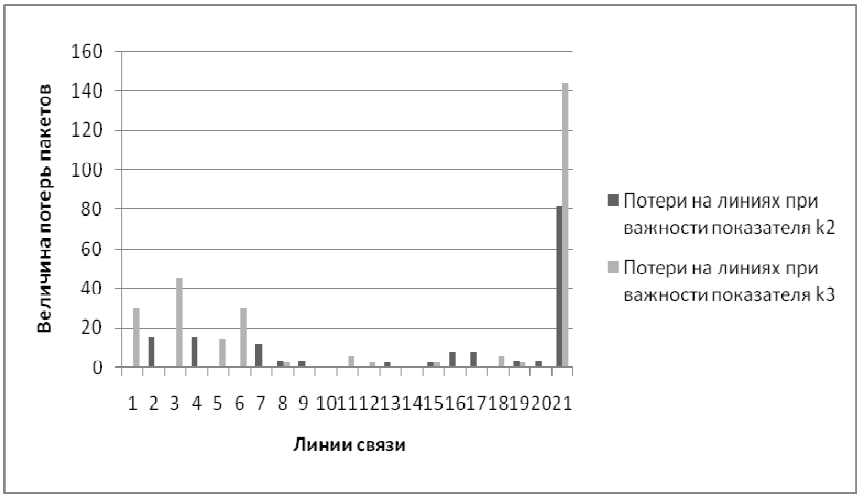

Рис. 2.3а. Величина потерь пакетов при важности различных показателей качества

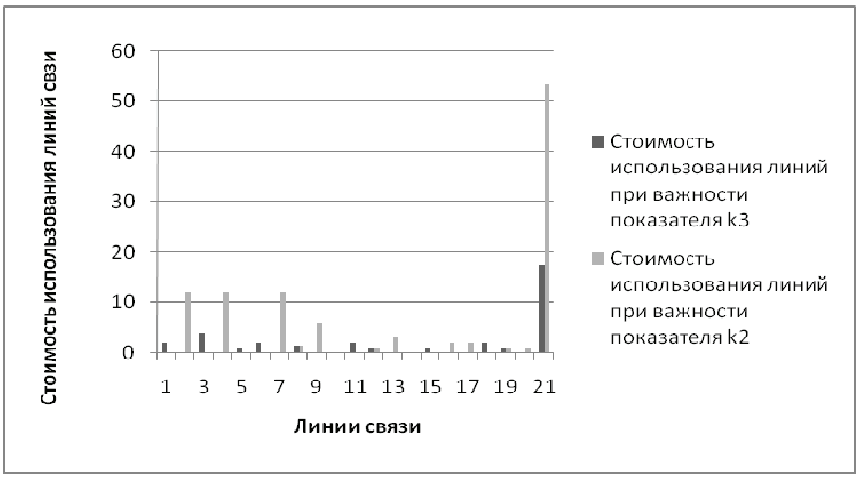

Рис. 2.3б. Стоимость использования линий связи при важности различных показателей качества

Рис. 2.3а показывает потери пакетов на линиях связи, из которых состоят маршруты, с разными показателями важности. Два последних столбца показывают сумму потерь пакетов на всех линиях связи. Рис. 2.3б

показывает стоимость использования линий связи, из которых состоят маршруты, с разными показателями важности. Два последних столбца показывают суммарную стоимость использования всех линий связи. Отсюда можно сделать следующие выводы: выигрыш наиболее важного показателя качества ведет к проигрышу других показателей качества.

Сравнение полученных вариантов маршрутизации с маршрутизацией по известному протоколу OSPF. В существующем алгоритме OSPF протокол динамической маршрутизации состояние (качество маршрута) определяется тремя характеристиками: задержкой, пропускной способностью и надежностью. Однако в качестве метрики выбирается и используется при маршрутизации только один из показателей качества.

Проиллюстрируем сравнение предложенного многокритериального подхода к выбору маршрутов и подхода к выбору маршрутов на основе протокола OSPF. На рис. 2.4 изображена загрузка линий сети связи при использовании полученного на основе многокритериального подхода подмножества Парето-оптимальных маршрутов, который приводит к многопутевой маршрутизации и маршрутов, полученных на основе протокола OSPF.

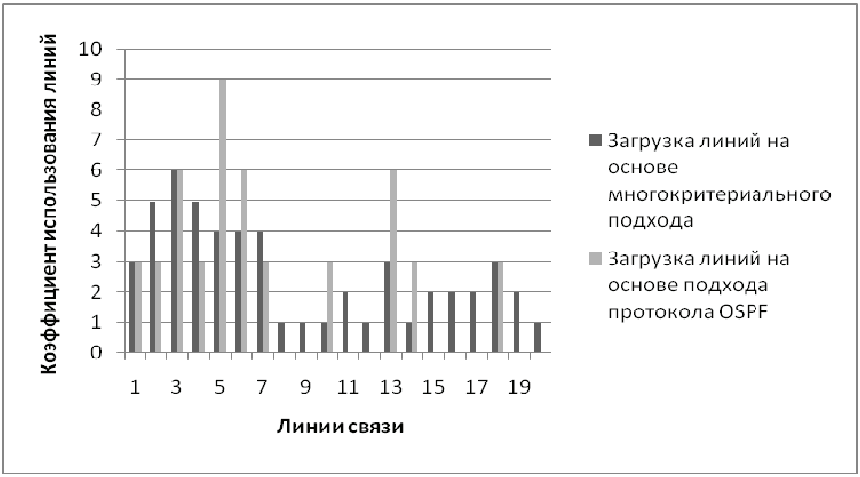

Рис. 2.4. Загрузка линий сети связи при использовании полученного на основе многокритериального подхода множества Парето-оптимальных маршрутов и маршрутов, полученных на основе протокола OSPF

Рис. 2.4 показывает, что при использовании полученного на основе многокритериального подхода множество Парето-оптимальных маршрутов, которое используется при организации многопутевой маршрутизации, загрузки линий связи более равномерные, нету больших перегрузок на отдельных линиях связи в отличии от маршрутизации по протоколу OSPF.

На рис. 2.5 изображено сравнение выбора маршрута из узла 0 в узел 8 с использованием многокритериального подхода при выборе коэффициентов относительной важности (0.3; 0.3; 0.4) и подхода на основе протокола OSPF по стоимости и потери пакетов на этом маршруте.

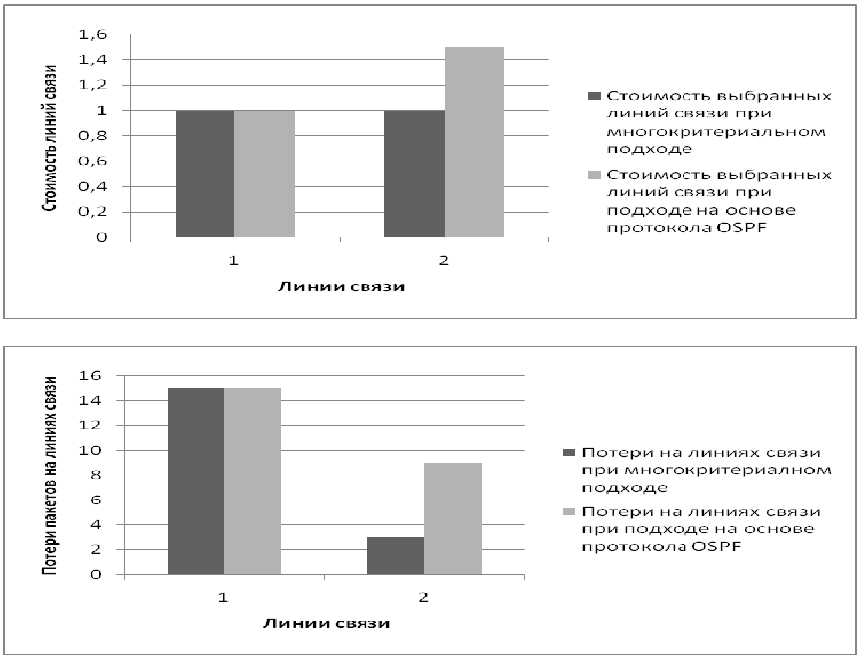

Рис. 2.5. Сравнение выбора маршрута из узла 0 в узел 8 с использованием многокритериального подхода и подхода на основе протокола OSPF по стоимости и потери пакетов на этом маршруте

Рис. 2.5 показывает выигрыш многокритериального подхода при учете потерь пакетов и стоимости использования линий связи относительно протокола OSPF. Хотя протокол OSPF, будет выигрывать с точки зрения

временной задержки, так как при этом выбирается путь лишь по одному этому показателю качества k_1.

2.4. Выводы

1. Многокритериальный подход к оптимальному решению задачи маршрутизации дает возможность учитывать нескольких показателей качества, которые всесторонне оценивают маршруты. Оптимальным решением задачи, которое удовлетворяют согласованному оптимуму показателей качества маршрутов, есть множество Парето-оптимальных решений.

2. Множество Парето-оптимальных решений можно использовать для организации многопутевой маршрутизации, что позволит равномерно использовать линии связи.

3. Для выбора единственного варианта маршрута можно использовать дополнительную информацию от экспертов с использованием методов сужения подмножества Парето на основе введения скалярных функций ценности, лексикографического подхода, теории размытых множеств и др.

4. Рассмотрены практические особенности применения многокритериального подхода к решению задачи оптимальной маршрутизации на примере фрагмента сети Харьковской области.

5. Проведен сравнительный анализ результатов решения задачи многокритериальной оптимизации и маршрутизации согласно известного протокола OSPF.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В МОБИЛЬНЫХ AD HOC СЕТЯХ

Существует много разных типов проактивных, реактивных и гибридных протоколов маршрутизации, которые могут быть использованы в мобильных ситуационных сетях [27-41]. В настоящем разделе проводится сравнительный анализ существующих протоколов маршрутизации с точки зрения совокупности показателей качества, определяющих свойства выбранного способа маршрутизации.

3.1. Классификация протоколов маршрутизации

Ограниченные ресурсы в MANET делают разработку эффективной и надежной стратегии маршрутизации очень сложной проблемой. Для эффективного использования ограниченных ресурсов необходима интеллектуальная стратегия, способная адаптироваться к изменяющимся условиям, таким как размер сети, плотность трафика и фрагментация сети. Вместе с тем, протокол маршрутизации должен обеспечивать различные уровни QoS для различных типов приложений и пользователей.

Ранее использовались два основных алгоритма маршрутизации. Эти алгоритмы обычно называются маршрутизацией по состоянию канала и дистанционно-векторной маршрутизацией. В маршрутизации по состоянию канала каждый узел поддерживает актуальное представление сети, периодически рассылая информацию о стоимости соединения с соседними узлами всем узлам сети, используя стратегию флудинга. Когда узел получает пакет обновления, он обновляет свое представление сети и информацию о состоянии канала, используя алгоритм кратчайшего пути для выбора узла дальнейшего хопа для каждого адресата. Традиционные алгоритмы маршрутизации по состоянию канала и дистанционно-векторной маршрутизации не могут быть использованы в больших MANET, по причине того, что периодические или частые изменения маршрутов в больших сетях могут потреблять значительную часть доступной полосы пропускания, приводить к конфликтам доступа к среде и значительно расходовать ресурс источников питания узлов. Для преодоления проблем, связанных с использованием данных алгоритмов в MANET, был предложен ряд протоколов маршрутизации, которые могут быть разделены на три группы: проактивные, реактивные и гибридные. В проактивных протоколах маршрутизации маршруты ко всем адресатам (или частям сети) определяются в момент формирования сети и поддерживаются при помощи периодического обновления маршрутов. В

реактивных протоколах маршруты определяются по требованию узлом-отправителем при помощи процесса поиска маршрута. Гибридные протоколы совмещают основные свойства двух описанных классов протоколов, то есть имеют как проактивный, так и реактивный характер одновременно. Каждая группа протоколов имеет ряд различных стратегий маршрутизации, которые используют линейную или иерархическую структуру маршрутов.

Протоколы маршрутизации в мобильных ad hoc сетях могут быть классифицированы по ряду отличительных характеристик. Эти характеристики обычно подразумевают информацию, необходимую для осуществления маршрутизации, определяют, когда эта информация получается, и какие функции могут выполнять узлы в процессе маршрутизации.

3.2. Особенности проактивной, реактивной и гибридной маршрутизации

Протоколы маршрутизации для мобильных ad hoc сетей могут быть классифицированы исходя из того, как получается и поддерживается мобильными узлами информация о маршрутах. Таким образом, сетевые протоколы маршрутизации могут быть разделены, как описано выше, на проактивные, реактивные и гибридные.

Проактивные (упреждающие) протоколы также часто называют табличными. Используя проактивный протокол маршрутизации, узлы в мобильной ad hoc-сети постоянно вычисляют маршруты ко всем доступным узлам и пытаются поддерживать актуальную и непротиворечивую маршрутную инфрмацию. Таким образом, узел-источник может получить маршрут незамедлительно, как только он понадобится.

В проактивных протоколах маршрутизации все узлы должны поддерживать адекватное представление сетевой топологии. При изменении топологии информация о нем должна быть передана всем сетевым узлам. Большинство проактивных протоколов маршрутизации в мобильных ad hoc сетях имеют свойства, унаследованные от алгоритмов, использующихся в проводных сетях. С целью адаптации к динамическим особенностям MANET, в традиционные протоколы для проводных сетей должны быть внесены определенные изменения. Используя проактивные протоколы маршрутизации, узлы непрерывно обновляют информацию о

состоянии сети и поддерживают маршруты независимо от того, есть ли в сети трафик, что порождает значительные расходы пропускной способности и заряда источника питания.

Реактивные протоколы маршрутизации для мобильных ad hoc сетей также имеют название протоколов с маршрутизацией «по требованию». В таких протоколах поиск маршрутов происходит только при необходимости. При передаче, узел-источник инициирует процедуру поиска маршрутов, которая завершается когда маршрут найден, либо когда маршрута не существует, после проверки всех возможных вариантов маршрутов.

В мобильных ad hoc сетях действующие маршруты могут быть нарушены вследствие мобильности узлов, поэтому поддержка маршрутов в реактивных протоколах является очень важной. По сравнению с проактивными протоколами маршрутизации, меньшие расходы на управляющий трафик являются несомненным преимуществом реактивных протоколов, поэтому реактивные протоколы в MANET имеют большую масштабируемость. Однако, используя реактивные протоколы, для узлов-источников могут возникать проблемы, связанные с задержками на поиск маршрута, перед тем, как они смогут начать передачу пакетов данных.

Примерами реактивных протоколов маршрутизации для мобильных ad hoc сетей могут служить протоколы DSR и AODV.

С целью объединить достоинства преодолеть недостатки проактивных и реактивных протоколов были предложены гибридные протоколы маршрутизации. Обычно гибридные протоколы маршрутизации для мобильных ad hoc-сетей используют иерархическую архитектуру сети. Проактивный и реактивный подходы используются на различных уровнях иерархии. В качестве примеров гибридных протоколов можно привести ZRP, ZHLS и HARP.

3.3. Структурирование и делегирование задач маршрутизации

Другой способ классификации основан на ролях, которые могут иметь узлы в схеме маршрутизации. В однородном протоколе маршрутизации роль, важность и функциональность всех мобильных узлов одинаковы. Примерами однородных протоколов маршрутизации могут служить WRP, DSR, AODV и DSDV. Однородный протокол маршрутизации обычно предполагает линейную сетевую структуру. В неоднородных протоколах узлы могут выполнять различные функции по управлению или маршрутизации. Для выбора таких узлов обычно используются

распределенные алгоритмы. В некоторых случаях неоднородный подход к маршрутизации использует иерархические сетевые структуры для упрощения организации и управления узлами.

Неоднородные протколы маршрутизации могут быть, в свою очередь, разделены по способу организации мобильных узлов и способу управления и маршрутизации. В соответствии с этим критерием выделяют иерархическую маршрутизацию, ориентированную на зоны, кластер-ориентированную иерархическую маршрутизацию и маршрутизацию, основанную на базовом узле, (zone-based hierarchical routing, cluster-based hierarchical routing, core-node-based routing).

В зонно-ориентированных протоколах маршрутизации для формирования зон применяются различные алгоритмы; например, некоторые из них используют географическую информацию. Использование разделения сети на зоны существенно снижает расходы на поддержку маршрутной информации. Мобильные узлы в пределах одной зоны знают, как достичь друг друга с наименьшими затратами, не поддерживая маршруты ко всем узлам сети. В некоторых зонно-ориентированных протоколах отдельные узлы действуют как шлюзы, обслуживая межзоновую связь. Примерами зонно-ориентированных протоколов могут служить ZRP и ZHLS.

Кластер-ориентированные протоколы маршрутизации используют определенные алгоритмы кластеризации для выбора главного узла в кластере. Мобильные узлы группируются в кластеры, а главные узлы отвечают за участие узлов в кластере и функции маршрутизации. Примером кластер-ориентированных протоколов в MANET может служить CGSR. Некоторые кластер-ориентированные протоколы, такие как HSR, поддерживают многоуровневую структуру кластеров.

В протоколах маршрутизации с базовыми узлами, из некоторых узлов сети, выбираемых динамически, формируется «магистральная» сеть. Узлы магистральной сети выполняют определенные функции, такие как формирование маршрутов и управление передачей пакетов. Примером такого протокола может служить CEDAR.

3.4. Маршрутизация с использованием сетевых метрик

Метрики, используемые при построении маршрутов, могут быть взяты за основу классификации протоколов маршрутизации. Большинство протоколов маршрутизации в мобильных ad hoc сетях в качестве метрики используют количество хопов. В ситуациях, когда возможно несколько

маршрутов, предпочтение отдается маршруту с минимальным количеством хопов. Если все беспроводные каналы в сети имеют одинаковую вероятность ошибки, короткие маршруты будут более стабильны и, кроме того, позволят значительно снизить расходы трафика и уменьшить коллизии. Однако, принимать одинаковые характеристики надежности в беспроводных ad hoc сетях часто некорректно. Поэтому, стабильность канала должна быть оценена при формировании маршрута. Например, подходы, применяемые в протоколах ABR и SSBR, используют в качестве метрик стабильность канала или мощность сигнала.

Некоторые мобильные приложения могут иметь различные требования QoS. С целью реализации требований QoS в мобильных ad hoc сетях, при маршрутизации должны быть задействованы соответствующие метрики, основанные на QoS. Как и в проводных сетях, в MANET могут быть использованы метрики QoS, такие как полоса пропускания, задержка, флуктуации задержки, коэффициент потери пакетов и стоимость. Например, в протоколе CEDAR в качестве метрик при построении маршрутов используются пропускная способность и стабильность соединения.

3.5. Оценка топологии, назначения и положения при маршрутизации

В протоколах маршрутизации для MANET, основанных на топологии, для принятия решений о маршрутизации, узлы используют информацию о сетевой топологии. В отличие от протоколов, ориентированных на топологию, для мобильных ad hoe-сетей предложены протоколы, основанные на информации о точке назначения. В таких протоколах узлу, для доставки пакета в точку назначения, достаточно знать только адрес следующего хопа в пределах маршрута. Например, протокол DSR основан на топологии, а AODV и DSDV на точке назначения. Доступность GPS, или другой подобной системы позиционирования, дает узлам доступ к информации об их географическом положении. В протоколах маршрутизации, ориентированных па положение, пространственные отношения между передающим узлом и узлом-адресатом, с учетом мобильности узлов, могут быть использованы для поиска маршрутов и доставки пакетов. Существующие подходы к маршрутизации в MANET на основе информации о положении могут быть разделены на две схемы. Согласно первой схеме, узлы передают пакеты исключительно основываясь на информации о положении и не требуют никакой другой информации.

Другая схема предполагает одновременное использование информации о положении и о топологии сети. Примерами типичных протоколов маршрутизации, основанных на положении, могут служить LAR и DREAM.

3.6. Многопутевая маршрутизация

Отдельно следует отметить алгоритмы многопутевой маршрутизации, создающие множество маршрутов от узла-источника до узла-получателя сообщения. Множество путей генерируется по требованию или проактивно. Поскольку, вследствие мобильности узлов, изменение топологии в ad hoc сетях происходит очень быстро, такой подход имеет свои преимущества. Основным преимуществом в использовании множества путей является более эффективное использование пропускной способности канала вместе со значительным увеличением надежности связи.

3.7. Протокол маршрутизации Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV)

Табличный протокол маршрутизации (Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) основан на алгоритме Беллмана-Форда. Каждый мобильный узел поддерживает таблицу маршрутизации, которая состоит из всех возможных направлений в сети и количества хопов, необходимых для достижения каждой из точек назначения. Каждая запись хранит также порядковый номер последовательности. Этот номер необходим для определения устаревших записей и предотвращения возникновения петель. В целях обеспечения целостности таблицы маршрутизации, обновления маршрутов периодически рассылаются по всей сети.

Существуют 2 типа обновлений: полный и инкрементальный. Полное обновление рассылает соседям полное содержание маршрутной таблицы и может потребовать для передачи отправку нескольких пакетов. Инкрементальные обновления, состоящие из изменений в маршрутной таблице, произошедших с момента последнего полного обновления, как правило, небольшие и помещаются в один пакет. Когда сеть стабильна, используется инкрементальное обновление, а полное обновление выполняется редко. С другой стороны, полное обновление будет выполняться гораздо чаще в быстро изменяющейся сети. Мобильные узлы для хранения инкрементальных обновлений используют отдельную таблицу.

В дополнение к информации таблицы маршрутизации, каждый пакет обновления маршрута содержит отдельный порядковый номер, который назначается передатчиком. Используется маршрут с самым новым (наибольшим) номером. Если несколько маршрутов имеют одинаковыйпорядковый номер, выбирается кратчайший из них.

Недостаток протокола — периодические обновления независимо от изменений топологии.

3.8. Протокол маршрутизации Cluster-Head Gateway Switch Routing (CGSR)

Протокол маршрутизации CGSR — это схема кластеризации, которая использует распределенный алгоритм, называемый Least Cluster Change (наименьшее изменение кластера, LCC). Путем объединения узлов в кластеры, контролируемые контроллерами кластеров, создана основа для разработки дополнительных возможностей канала доступа, распределения пропускной способности и маршрутизации. Узлы связываются с контроллером кластера, который, в свою очередь, связывается с другими контроллерами кластеров внутри сети.

Выбор контроллера кластера является очень важной задачей, поскольку частые изменения контроллера кластера окажет негативное влияние на зависящие от него алгоритмы распределение ресурсов. Таким образом, в этой схеме стабильность кластера имеет первостепенное значение. Согласно алгоритма LCC контроллер кластера будет меняться только в двух случаях: если два контроллера кластера входят в радиус действия друг друга, или когда узел отключается от любого другого кластера.

CGSR является эффективным способом для распределения каналов между различными кластерами путем повышения пространственного повторения. Требование CGSR к канальному уровню выглядит следующим образом: каждый кластер определяется уникальным кодом CDMA и, следовательно, каждому кластеру необходимо использовать пространственное повторное использование кодов. В пределах каждого кластера используется TDMA с передачей маркера.

В сети, использующей этот протокол, пакет передается через ряд контроллеров кластеров и шлюзов.

Шлюзы представляют собой узлы, которые являются членами более чем одного кластера, и поэтому используют несколько разных кодов CDMA,

определяемых соответствующими контроллерами кластеров. Основными факторами, влияющими на маршрутизацию в такой сети, являются передача маркера (контроллеры кластеров) и распределение кодов (шлюзы). Для обнаружения устаревших маршрутов и устранения петель используется, как и в DSDV [1], порядковый номер.

3.9. Протокол маршрутизации Wireless Routing Protocol (WRP)

Протокол маршрутизации WRP является результатом одной из самых ранних работ по алгоритмам маршрутизации в ad hoc сетях, и очень схож с распределенным алгоритмом Беллмана-Форда. Он представляет собой табличный протокол маршрутизации, в котором таблицы содержат данные обо всех направлениях. В таблице маршрутизации содержатся записи для каждого узла назначения, адрес следующего хопа и вес метрики. Выбор маршрута производится путем выбора одного из соседних узлов, который позволит свести к минимуму стоимость пути. Стоимость соединения содержится в отдельной таблице. Для определения стоимости могут использоваться различные методы.

Для поддержания актуальной таблицы маршрутизации используется рассылка пакетов обновления маршрутов. Они отправляются всем соседям узла и содержат все маршруты, известные данному узлу. Как следует из названия, это просто обновления и, следовательно, в них передаются только недавние изменения маршрутов, а не вся таблица маршрутизации. Чтобы сохранить маршрут, если не требуются никакие изменения, отправляются периодические пустые пакеты HELLO.

3.10. Сравнение табличных протоколов маршрутизации

Основные свойства табличных протоколов маршрутизации приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Свойства табличных протоколов маршрутизации

Параметр	DSDV	CGSR	WRP
Временная сложность (добавление связи, ошибка)	O(d)		O(h)
Сложность соединения (добавление связи, ошибка)	O(x=N)		
Организация узлов	Линейная	Иерархическая	Линейная
Отсутствие петель	Да		Да, но не мгновенно
Возможность multicast	Нет		
Количество таблиц	2		4
Частота обновлений	Периодически и по необходимости	Периодически	Периодически и по необходимости
Обновления передаются к	Соседним узлам	Соседним узлам и контроллеру	Соседним узлам
Использует уведомления о присутствии	Да	Нет	Да
Наличие «особых» узлов	Нет	Да (контроллеры)	Нет
Метрика	Кратчайший путь		

В табл.3.1 введены такие обозначения:

N — количество узлов сети;

d — диаметр сети;

h — высота дерева маршрутизации;

x — количество узлов, на которых отразится изменение топологии.

3.11. Протокол маршрутизации Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

Протокол маршрутизации AODV разработан как улучшение протокола DSDV. Цель AODV заключается в том, чтобы сократить число трансляции сообщений по всей сети, находя маршруты по требованию, вместо хранения полной актуальной маршрутной информации.

Узел-источником, стремящихся передать пакет данных узлу, назначения проверяет маршрутную таблицу на случай если он уже имеет правильный маршрут к узлу назначения. Если маршрут существует, узел просто передает пакеты на следующий хои маршрута к узлу назначения. С другой стороны, если в таблице нет подходящего нет маршрута, узел-источник начинает процесс поиска маршрута. Он транслирует пакет запроса

маршрута (RREQ) его непосредственным соседям, а те, в свою очередь передают его своим дальнейшим соседям до тех пор, пока запрос достигает либо промежуточных узлов, имеющих в своей таблице маршрут к месту назначения, или самого узла назначения. Пакет запроса маршрута содержит IP-адрес источника узла, текущий номер последовательности, IP-адрес узла назначения и последний известный порядковый номер. Промежуточный узел может ответить на пакет запроса маршрута только если он имеет порядковый номер больше или равный номеру, содержащемуся в заголовке пакета запроса маршрута. Когда промежуточные узлы передают пакет запроса маршрута их соседями, они записывают в своей маршрутной таблице адрес соседа, от которого пришел первый экземпляр пакета. Эта информация впоследствии будет использована для построения обратного пути для пакета ответа маршрута (RREP). Последующие идентичные RREQ пакеты отбрасываются. Когда пакет ответа маршрута доставляется из пункта назначения или промежуточного узла, узлы передают его вдоль установленного обратного пути и сохраняют прямой маршрут в таблицу маршрутизации путем использования симметричных связей. Обслуживание маршрута требуется в случае, если источник или промежуточный узел перемещается. Если исходный узел становится недоступным, происходит перезапуск процесс поиска маршрута. Если промежуточный узел движется, он отправляет уведомление о неисправности соединения каждому из своих соседей для обеспечения удаления этой части маршрута. После того, как сообщение достигнет узла-источника, выполнится перезапуск процесса поиска маршрута.

Локальные перемещения не приводят к глобальным последствиям, как в случае DSDV. Устаревшие маршруты удаляются, как следствие, не требуется никакого дополнительного обслуживания маршрутов. AODV имеет механизм старения маршрутов, однако он не может учитывать, как долго маршрут может быть актуальным. Задержки минимизируются за счет избежания использования нескольких маршрутов. Интеграция многоадресной маршрутизации делает AODV отличным от других протоколов маршрутизации. AODV сочетает одноадресную, многоадресную и широковещательную передачу сообщений; в настоящее время, он использует только симметричные связи между соседними узлами.

3.12. Протокол маршрутизации Dynamic Source Routing (DSR)

Одним из наиболее часто упоминаемых протоколов маршрутизации является Dynamic Source Routing (DSR), который является алгоритмом маршрутизации «по требованию» и имеет фазы поиска и поддержания маршрута.

Поиск маршрута предусматривает сообщения запроса маршрута и ответа маршрута. На этапе поиска маршрута, когда узел хочет послать сообщение, он отправляет пакет запроса маршрута своим соседям. Каждый узел в пределах радиуса передачи, получивший пакет запроса, добавляет свой идентификатор к пакету и ретранслирует его дальше. В конце концов, одно из сообщений достигнет либо узла назначения, либо узла, которому известен актуальный маршрут к узлу назначения. Поскольку каждый узел поддерживает собственный кэш маршрутов, поиск маршруте до узла назначения сначала производится в кэше. Сохранение маршрута в кэша каждого узла сокращает расходы, порожденные в фазе поиска маршрута. Если маршрут найден в кэше, узел возвращает сообщение ответа маршрута и не производит дальнейшую пересылку запроса. Первый пакет, который достигает узла назначения, будет иметь полный маршрут. DSR предполагает, что полученный маршрут является кратчайшим, поскольку алгоритм принимает во внимание первый пакет, прибывший в узел назначения. Пакет ответа маршрута, посылаемый от узла назначения узлу-источнику, содержит полный маршрут от источника до узла назначения. Таким образом, исходный узел знает свой маршрут к узлу назначения, и может приступить к маршрутизации пакетов данных. Источник сохраняет этот маршрут в маршрутный кэш.

На этапе поддержания маршрута используются два вида пакетов: ошибка маршрута и подтверждение. DSR обеспечивает актуальность существующих маршрутов основываясь на подтверждениях, получаемых от соседних узлов, свидетельствующих о том, что пакеты были переданы на следующий хоп. Пакеты подтверждения также включают пассивное подтверждение, поскольку узел способен «подслушать» передачу пакета но маршруту соседом следующею хопа. Пакет ошибки маршрута генерируется когда узел обнаруживает проблему передачи, которая означает, что узлу не удалось получить подтверждение. Такой пакет отправляется к источнику, с тем чтобы начать новый этап поиска маршрута. Получив сообщение об ошибке маршрута, узлы удаляют запись о маршруте, которая использует ошибочное соединение, из их маршрутного кэша.

3.13. Протокол маршрутизации Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)

TORA - адаптивный и масштабируемый протокол маршрутизации, основанный на концепции обратных ссылок. Он находит несколько маршрутов от отправителя к получателю в очень динамичной среде мобильной сети. Важной проектной особенностью TORA является то, что служебные сообщения локализованы в пределах небольшого набора узлов, находящихся вблизи точки изменения топологии. Узлы поддерживают маршрутную информацию об их соседях, находящихся в пределах одного хопа.

Основным преимуществом этого протокола является способ обработки повреждений связей. В случае повреждения связи TORA меняет направление связей, перестраивая DAG для поиска альтернативного маршрута. Этот механизм поиска обычно требует одного прохода распределенного алгоритма, поскольку таблицы маршрутизации изменяются одновременно в течение внешнего этапа поискового механизма. Другие алгоритмы маршрутизации, такие как LMR, используют два прохода, тогда как DSR и AODV используют трехпроходный алгоритм. TORA может работать с однопроходным алгоритмом при услйвии, что все узлы синхронизированы (с помощью GPS) с целью формирования временного порядка топологических изменений. Метрика "высоты" зависит от логического времени повреждения связи.

3.14. Протокол маршрутизации ABR

Протокол маршрутизации ABR (Associativity-Based Routing) для принятия решения о выборе маршрута использует свойство "ассоциативности". В этом алгоритме наиболее важным фактором при выборе маршрута является стабильность соединения. Поиск маршрутов производится путем рассылки пакетов запроса; анализируя эти пакеты узлу назначения становится известно обо всех возможных маршрутах между ним и узлом-источником. Оптимальным считается маршрут, принадлежащий этому множеству, и оптимальный по свойству ассоциативности.

Алгоритм ABR учитывает «степень ассоциативности» с помощью механизма, называемого «отметки ассоциативности».

ABR является эффективным алгоритмом в выборе маршрутов, поскольку он в значительной степени зависит от стабильности маршрута. Тем не

менее, ему присущи некоторые недостатки, такие как требования к памяти для таблиц маршрутизации и хранения отметок, а также дополнительные вычислительные ресурсы для расчета значения отметок вместе со значительным расходом энергии.

3.15. Протокол маршрутизации SSBR

Протокол маршрутизации SSBR (Signal Stability-Based Adaptive Routing) отличается от обычных протоколов маршрутизации. Основными критериями маршрутизации является стабильность сигнала и местоположения. В базовых принципах маршрутизации этот протокол схож со стандартными протоколами маршрутизации «по требованию»: запрос маршрута транслируется по всей сети, узел назначения отправляет обратно пакет ответа маршрута, затем отправитель посылает данные но выбранному маршруту. Тем не менее, мощность сигнала (качество связи) между соседними узлами в процессе выбора маршрута в данном протоколе играет важную роль.

SSBR состоит из двух подпротоколов: Протокола динамической маршрутизации (Dynamic Routing Protocol, DRP) и Протокола Статической Маршрутизации (Static Routing Protocol, SRP). DRP взаимодействует с драйвером сетевого интерфейса через API, получая фактическую мощность принимаемого сигнала. Используя эту информацию, DRP ведет таблицу стабильности сигнала, записи которой описывают каждое соединение с соседними узлами как «слабое» или «сильное». Эта таблица обновляется с каждым новым полученным пакетом. Например, если получен пакет HELLO, производится измерение мощности сигнала и обновление таблицы стабильности; другие пакеты, такие как пакеты данных, пакеты обновления маршрута и так далее, передаются на SRP для дальнейшей обработки. SRP выполняет текущие задачи, такие как пересылка пакетов в соответствии с текущей таблицей маршрутизации, ответ на запросы маршрута и так далее.

Алгоритм SSBR использует схему для определения надежности связи аналогичную алгоритму ABR. Несмотря на то, что первый из них использует мощность сигнала, а последний — временные отметки, задача выбора оптимального маршрута остается аналогичной.

3.16. Сравнение реактивных протоколов маршрутизации

Характеристики реактивных протоколов маршрутизации приведены в табл.3.2.

Таблица 3.2. Сравнение реактивных протоколов маршрутизации

Параметр	AODV	DSR	TORA	ABR	SSBR
Временная сложность (инициализация)	O(2d)			O(d+z)	
Временная сложность (восстановление)	O(2d)	O(2d) или 0 при нахождении и записи в кеше	O(2d)	O(l+z)	
Сложность связи (инициализация)	O(2N)			O(N+y)	
Сложность связи (восстановление)	O(2N)		O(2x)	O(x+y)	
Организация узлов	Линейная				
Отсутствие петель	Да				
Поддержка multicast	Да	Нет			
Оповещение о присутствии	Нет			Да	
Поддержка множественных маршрутов	Нет	Да		Нет	
Маршруты хранятся в	Таблице маршрутов	Кеше маршрутов	Таблице маршрутов		
Таймеры устаревания маршрутов	Да	Нет			
Способ перестройки маршрута	Удалить маршрут, уведомить источник		Обратный поиск; восстановление	Локальный широковещательный запрос	
Метрика	Новый и короткий путь	Кратчайший путь		Связанность и стабильность	

Таблица 3.2. Сравнение табличных и реактивных протоколов маршрутизации

Параметр	Реактивные протоколы	Табличные протоколы
Доступность маршрутной информации	Доступно по требованию	Всегда доступно, независимо от необходимости
Периодическое обновление маршрутов	Не требуется	Требуется
Реакция на мобильность	Локальный поиск пути (ABR и SSBR)	Информирование других узлов для поддержания актуальной информации
Служебный трафик	Растет с увеличением мобильности активных узлов	Выше, чем у реактивных протоколов

3.17. Выводы

1. В настоящем разделе был выполнен анализ и классификация алгоритмов маршрутизации в мобильных ad hoc сетях. Алгоритмы маршрутизации различаются по способам маршрутизации, используемым сетевым метрикам, использованию знаний о топологии, а также применением стратегии многопутевой маршрутизации. Для каждого из рассмотренных алгоритмов приведено краткое описание работы и оценку достоинств и недостатков алгоритмов маршрутизации.

2. Полученные результаты анализа позволяют говорить о необходимости применения методов многокритериальной оптимизации к сравнению и выбору существующих протоколов маршрутизации с учетом совокупности показателей качества, характеризующих время задержки, количество промежуточных узлов, стабильность, быстродействие, надежность каналов и др.

4. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНІЙ ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ В AD HOC СЕТЯХ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Беспроводные ad hoc сети относятся к мобильным децентрализованным динамическим самоорганизующимся сетям, которые не имеют постоянной структуры. Каждое устройство, принимающее участие в организации такой сети, может являться передатчиком, приемником, ретранслятором и конечным устройством. Каждый узел ad hoc сети может свободно перемещаться в любое время и в любом направлении, причем вследствие этого некоторые старые связи могут быть утеряны, а также могут быть установлены новые связи уже с другими узлами сети. Такая технология построения беспроводной сети показывает себя актуальной в ситуациях, когда необходимо быстро развернуть сеть на территории с подвижными узлами. Примерами таких ситуаций могут служить стихийные бедствия, военные действия и другие экстренные ситуации. За счет постоянного изменения структуры сети могут возникнуть проблемы с маршрутизацией, так как изменяются возможные пути доставки информации между узлами. Эти проблемы решаются с помощью проактивных, реактивных и гибридных протоколов маршрутизации. Следует отметить, что каждый протокол маршрутизации характеризуется совокупностью показателей качества, определяющих основные свойства выбранного способа маршрутизации. Показатели качества протоколов маршрутизации, как правило, связаны между собой и являются антагонистическими, когда при улучшении одного показателя качества ухудшаются другие показатели качества. При построении ad hoc сетей возникает необходимость выбора предпочтительного протокола маршрутизации с учетом совокупности противоречивых показателей качества. В этих случаях для сравнительного анализа и выбора предпочтительного протокола маршрутизации следует применять методы многокритериальной оптимизации. В данном разделе рассматриваются особенности применения метода анализа иерархий для многокритериального выбора единственного предпочтительного варианта маршрутизации в ad hoc сетях с учетом совокупности показателей качества [25].

4.1. Анализ исходного множества протоколов маршрутизации

В ad hoc сетях наиболее часто применяются проактивные протоколы DSDV, OLSR, WRP, а также реактивные протоколы AODV, DSR. Кратко рассмотрим некоторые особенности этих протоколов.

DSDV (Dynamic Source Routing protocol) – протокол, основанный на алгоритме Беллмана-Форда, пересылающий обновления сразу после их получения. Каждое обновление маршрутов каждого узла имеет свой уникальный порядковый номер, что позволяет обеспечить актуальность информации о маршрутах. Предусматривает возможность подключения одного из узлов ad-hoc сети к любой другой сети, в таком случае этот узел является шлюзом.

OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) – протокол, основанный на алгоритме Дейкстры. В нем введена концепция сетевых устройств, которые играют роль MPR (Multi Point Relay) и, по сути, являются основой ad hoc сети. Именно устройства MPR могут формировать и рассылать обновления через всю ad-hoc сеть. Каждое устройство, не исполняющее роль MPR, выбирает один или несколько таких MPR устройств, от которых получает обновления маршрутной информации, но не транслирует ее в сеть.

WRP (Wireless Routing Protocol) – протокол, по принципу работы схожий с протоколом RIP: периодический обмен таблицами маршрутизации и основные средства защиты от возникновения петель маршрутизации. Создает соединения, которые постоянно поддерживаются между соседними ad hoc узлами сети.

AODV (Adhoc On-Demand Distance Vector) – протокол, использующий вектор расстояния по запросу. Позволяет клиенту при необходимости установить соединение с другим клиентом с помощью распространения запроса по всей ad hoc сети. Все узлы, получившие запрос, сохраняют информацию об отправителе в таблице маршрутизации и ответ на запрос возвращается по установленному маршруту.

DSR (Dynamic Source Routing protocol) – протокол, который похож на AODV, однако не использует маршрутизацию от источника. Здесь путь прохождения пакета по всем узлам указывается внутри пакета, и ответный пакет возвращается по тому же маршруту, каким пришел запрос.

4.2. Математические особенности метода анализа иерархий

Кратко рассмотрим некоторые особенности метода анализа иерархий (МАИ) [15]. Суть этого метода состоит в декомпозиции проблемы выбора единственного предпочтительного варианта проектируемой системы из некоторого множества вариантов с учетом совокупности показателей качества. Принцип декомпозиции предусматривает структурирование

проблемы выбора в виде иерархии уровней с вершины (цель выбора) через промежуточный уровень 2 (показатели качества системы) к самому низкому уровню 3 (альтернативные варианты построения системы). Затем от опытных экспертов получают их субъективные суждения в виде парных сравнений относительной важности различных элементов проблемы выбора. В результате обработки полученных численных данных составляются матрицы парных сравнений элементов проблемы выбора. Для этих матриц вычисляются их главные собственные векторы, соответствующие максимальным собственным значениям. Далее согласно определенным математическим процедурам получают вектор глобальных приоритетов, компоненты которого определяют приоритетность выбора предпочтительного варианта проектируемой системы. Единственному предпочтительному варианту системы из заданного множества вариантов соответствует максимальное значение компонент вектора глобальных приоритетов.

Принцип сравнительных суждений экспертов в МАИ заключается в том, что элементы проблемы выбора сравниваются экспертами попарно по важности. Попарно сравниваются относительная важность разных вариантов систем (на уровне 3) и разных показателей качества системы (на уровне 2). Результаты парных сравнений сводятся к матричной форме

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}a_{12}...a_{1j} \\ a_{21}a_{22}...a_{2j} \\ ... \\ a_{i1}a_{i2}...a_{ij} \end{pmatrix}, \qquad (4.1)$$

где $a_{ij} = \frac{w_s}{w_j}$ – оценки парных сравнений разных элементов выбора w_s, w_j.

Диагональ этой матрицы заполняется значениями "1", а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполняются соответствующими обратными значениями.

Оценки парных сравнений элементов a_{ij} находятся с использованием субъективных суждений экспертов, численно определяемых по шкале относительной важности элементов, которая представлена в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Шкала относительной важности элементов сравнения

Относительная важность	Определение степени важности
1	Равная важность элементов сравнения
3	Умеренное превосходство одного элемента над другим
5	Существенное превосходство одного элемента над другим
7	Значительное превосходство одного элемента над другим
9	Очень сильное превосходство одного элемента над другим
2,4,6,8	Промежуточные решения между двумя суждениями

Далее выполняется обработка сформированных матриц парных сравнений, которая с математической точки зрения сводятся к вычислению главного собственного вектора, соответствующего максимальному собственному значению матрицы. Компоненты главного собственного вектора матрицы парных сравнений показателей качества вычисляются как среднее геометрическое значение в строке матрицы парных сравнений

$$V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} a_{ij}}\ ,\ \ j = \overline{1,n}\,, \tag{4.2}$$

где n – число показателей качества.

Через компоненты главного собственного вектора вычисляются соответствующие компоненты вектора приоритетов в виде нормированных значений

$$P_j = \frac{V_j}{S}\ ,\ \ j = \overline{1,n}\,, \tag{4.3}$$

где $S = \sum_{j=1}^{n} V_j$.

Такие процедуры выполняются вначале на уровне 2 для показателей качества системы. Аналогично находятся оценки матриц парных сравнений вариантов систем на уровне 3 в отдельности по отношению к каждому показателю качества системы. На основе этих матриц согласно (4.2) и (4.3) вычисляются компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов системы по отношению к отдельным показателям качества системы $\vec{Q}_j, j = \overline{1,n}$.

С использованием полученных векторов приоритетов вычисляются значения компонент вектора глобальных приоритетов $\vec{C}$ согласно

$$C_i = \sum_{j=1}^{n} P_j Q_{ij}, \; i = \overline{1,N}, \tag{4.4}$$

где N - число сравниваемых вариантов систем.

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов (4.4) выбирается соответствующий предпочтительный вариант системы.

4.3. Результаты многокритериального выбора предпочтительного протокола маршрутизации методом МАИ

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного варианта протокола маршрутизации в ad-hoc сетях с учетом совокупности показателей качества. В качестве показателей качества выбраны основные характеристики протоколов, в частности, время конвергенции, память, управление. В табл. 4.2 приведены оценки значений показателей качества для различных типов протоколов маршрутизации [5].

Таблица 4.2. Порядок значений показателей качества протоколов маршрутизации

Тип протокола маршрутизации	Показатели качества протоколов		
	Время конвергенции	Память	Управление
DSDV	O(D·I)	O(N)	O(N)
OLSR	O(D·I)	$O(N^2)$	$O(N^2)$
WRP	O(h)	$O(N^2)$	O(N)
AODV	O(2·D)	O(2·N)	O(2·N)
DSR	O(2·D)	O(2·N)	O(2·N)

Здесь приведены соотношения, которые определяют зависимости показателей качества от основных характеристик сети, в частности, O(.) – означает порядок сложности; D – диаметр сети; I – среднее время обновления; N – количество узлов в сети; h – высота дерева маршрутизации. Нетрудно видеть, что эти показатели качества связаны между собой и носят конкурирующий характер.

На рис. 4.1 показано иерархическое представление проблемы выбора предпочтительного протокола маршрутизации. На уровне 1 находится цель

выбора предпочтительного варианта протокола, на уровне 2 – показатели качества протоколов, на третьем – альтернативные варианты протоколов.

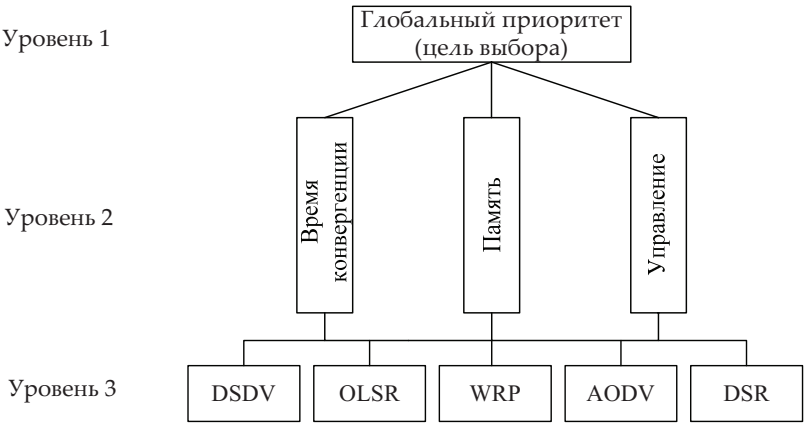

Рис. 4.1. Декомпозиция проблемы выбора предпочтительного протокола маршрутизации

Согласно методу МАИ построена матрица парных сравнений для совокупности показателей качества (т.е. на уровне 2) (табл. 4.3). Для заполнения этой таблицы с помощью опытного эксперта выполнены парные сравнение важности выбранных показателей качества, определяющих сложность протоколов маршрутизации, в частности, время конвергенции, память, управление. Диагональ этой матрицы заполнена значениями "1", а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполнены обратными значениями.

Таблица 4.3. Матрица парных сравнений показателей качества протоколов маршрутизации и вычисленные оценки компонент вектора приоритетов

	Время конвергенции	Память	Управление	Собственный вектор V_i	Вектор приоритетов Q_{ij}
Время конвергенции	1	1/3	1/5	0,405	0,1006
Память	3	1	1/4	0,909	0,226
Управление	5	4	1	2,71	0,673

Далее выполнены парные сравнения на уровне 3 в виде относительной сложности альтернативных вариантов протоколов по отношению к каждому показателю качества. В результате обработки полученных матриц вычислены согласно (4.2) и (4.3) собственные векторы и векторы приоритетов, которые приведены в табл. 4.5, 4.6, 4.7.

Таблица 4.5. Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации по отношению к времени конвергенции

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	Компоненты собственного вектора V_{i1}	Компоненты вектора приоритетов Q_{i1}
DSDV	1	1/2	4	5	5	2,186	0,323
OLSR	2	1	4	5	5	2,885	0,427
WRP	¼	¼	1	1/3	1/3	0,368	0,054
AODV	1/5	1/5	3	1	2	0,752	0,111
DSR	1/5	1/5	3	1/2	1	0,569	0,084

Таблица 4.6. Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации по отношению к памяти

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	Компоненты собственного вектора V_{i2}	Компоненты вектора приоритетов Q_{i2}
DSDV	1	1/4	1/4	1/3	1/3	0,368	0,06
OLSR	4	1	2	3	3	2,352	0,384
WRP	4	½	1	3	3	1,782	0,291
AODV	3	1/3	1/3	1	2	0,918	0,15
DSR	3	1/3	1/3	1/2	1	0,698	0,114

Таблица 4.7. Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации по отношению к управлению

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	Компоненты собственного вектора V_{i3}	Компоненты вектора приоритетов Q_{i3}
DSDV	1	1/5	1/2	1/3	1/3	0,026	0,004
OLSR	5	1	5	3	3	2,954	0,459
WRP	2	1/5	1	1/3	1/3	0,534	0,083
AODV	3	1/3	3	1	2	1,428	0,222
DSR	3	1/3	3	1/2	1	1,485	0,231

В табл. 4.8 сведены полученные оценки компонент вектора приоритетов показателей качества, а также векторов приоритетов протоколов маршрутизации, по отношению к времени конвергенции, памяти, управлению. С использованием этих векторов приоритетов вычислены значения компонент вектора глобальных приоритетов согласно (4.6), которые приведены в последнем столбце табл. 4.8.

Таблица 4.8. Результаты вычисления значений компонент вектора глобальных приоритетов

№	Тип протокола маршрутизации	Q_{ij}			C_i
		$j=1$	$j=2$	$j=3$	
1	DSDV	0,323	0,06	0,004	0,048
2	OLSR	0,427	0,384	0,459	0,438
3	WRP	0,054	0,291	0,083	0,127
4	AODV	0,111	0,15	0,222	0,194
5	DSR	0,084	0,114	0,231	0,189
P_j		0,1006	0,226	0,673	

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов выбираетя предпочтительный вариант протокола маршрутизации в ad hoc сетях с учетом введенных показателей качества. Таким является протокол маршрутизации OLSR, основанный на алгоритме Дейкстры.

4.5. Выводы

1. Проанализированы характеристики разных протоколов маршрутизации в беспроводных ad hoc сетях с учетом совокупности показателей качества.

2. Рассмотрены математические особенности одного из методов многокритериального выбора предпочтительного варианта – метода анализа иерархий.

3. Получены матрицы парных сравнений показателей качества и вариантов протоколов маршрутизаций, для которых вычислены их главные собственные векторы и векторы приоритетов.

4. На основе полученных данных вычислен вектор глобальных приоритетов, по максимальному значению компонент которого выбран предпочтительный вариант маршрутизации в беспроводной ad hoc сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматриваются особенности применения методов многокритериальной оптимизации для решения проблемы выбора предпочтительного варианта маршрутизации в мобильных ситуационных сетях с учетом совокупности противоречивых показателей качества. Кроме того, рассматриваются особенности решения и другой проблемы маршрутизации - многокритериального выбора предпочтительного протокола маршрутизации из некоторого множества существующих протоколов с учетом совокупности показателей качества.

Изложена методология выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества, которая сформирована на базе основных положений теории многокритериальной оптимизации. Приведены особенности формализованных постановок задачи выбора оптимальних рішень при ординалистическом подходе и кардиналистическом подходе к определению поняття оптимальности решений с учетом совокупности показателей качества. Рассмотрены методы формирования подмножества Парето-оптимальных решений с учетом безусловного критерия предпочтения в критериальном пространстве показателей качества. Проанализированы свойства Парето-оптимальных решений, в частности, многомерных потенциальных характеристик и многомерных диаграм обмена показателей качества. Рассмотрены особенности ссужения подмножества Парето до единственного проектного варианта с использованием условного критерия предпочтения и привлечении дополнительной информации от экспертов.

Рассмотрены практические особенности применения многокритериального подхода к решению задачи оптимальной маршрутизации на примере фрагмента сети Харьковской области. Многокритериальный подход к оптимальному решению задачи маршрутизации дает возможность учитывать нескольких показателей качества, которые всесторонне оценивают маршруты. Получено Парето-оптимальное решение задачи маршрутизации, которое удовлетворяют согласованному оптимуму показателей качества маршрутов. Множество Парето-оптимальных решений можно использовать для организации многопутевой маршрутизации, что позволит равномерно использовать линии связи. Для выбора единственного варианта маршрута из подмножества Парето-оптимальных использован лексикографический подход, основанный на упорядочивании по важности показателей качества маршрутов. Проведен

сравнительный анализ результатов решения задачи многокритериальной оптимизации и маршрутизации согласно известного протокола OSPF.

Проведен сравнительный анализ и классификация алгоритмов маршрутизации в мобильных ad hoc-сетях. Алгоритмы маршрутизации различаются по способам маршрутизации, используемым сетевым метрикам, использованию знаний о топологии, а также применением стратегии многопутевой маршрутизации. Для каждого из рассмотренных алгоритмов приведено краткое описание работы и оценку достоинств и недостатков алгоритмов маршрутизации. Полученные результаты анализа дают основание говорить о необходимости применения методов многокритериальной оптимизации к сравнению и выбору существующих протоколов маршрутизации с учетом совокупности показателей качества.

Рассмотрены теоретические и практические особенности многокритериального выбора предпочтительного протокола маршрутизации на основе метода анализа иерархий. Получены матрицы парных сравнений показателей качества и вариантов протоколов маршрутизаций, для которых вычислены их главные собственные векторы и векторы приоритетов. На основе полученных данных вычислен вектор глобальных приоритетов, по максимальному значению компонент которого выбран предпочтительный вариант маршрутизации в беспроводной ad-hoc сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carlos De Morais Cordeiro. Ad Hoc & Sensor Net works: Theory and Applications. - Agrawal World Scientific, 2006. - 641 p.

2. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. - М.: Наука, 1986. - 221 с.

3. Губонин Н.С. Оптимизация систем передачи информации по совокупности технико-экономических показателей // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. - 1985. - №1. - С. 57 - 62.

4. Granat J., Wierzbicki A. P. Multicriteria analysis in telecommunications // Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. - 2004. - pp. 1- 6.

5. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. - СПб.: Наука и техника, 2005. - 168 с.

6. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. - М.: Техносфера, 2003. - 424 с.

7. Mishra A.R. Advanced Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G Evolution TO 4G / Edited by Ajay R. Mishra. - UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. - 542 p.

8. Перепелица В.А. Многокритериальные задачи теории графов. Алгоритмический подход. – Киев, 1989. – 156 с.

9. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кепнер Л.М. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты. – М.: Наука, 1986. - 128с.

10. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. - М.: Наука, 1982. - 256 с.

11. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 176с.

12. Безрук В.М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку. - Харків: ХНУРЕ, 2002. - 164 с.

13. Ногин В.Д., Протодьяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации. - М.: Высшая школа, 1986. - 379с.

14. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации и принятия решений. - СПб.: Издательство „Лань", 2001. - 384 с.

15. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. - New York: McGraw Hill, 1980. – 278 p.

16. Bezruk V.M., Bukhanko A.N., Chebotareva D.V., VarichV.V. Multicriterion optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling // Open access book "Telecommunications Networks. Current status and future trends". Chapter 11. – Rijeka: INTECH, 2012. – pp. 251-274.

17. Чеботарёва Д.В., Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи. - Харьков: Компания СМИТ, 2013. - 148 с.

18. Безрук В.М., Буханько О.М., Чеботарьова Д.В. Оптимізація та математичне моделювання мереж зв'язку. - Харків: Компанія СМІТ, 2014. - 194с.

19. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций. - Харьков: Компания СМИТ, 2017. - 268 с.

20. Bezruk V.M. Methods of Multi-criterion Information-System Optimization // Telecommunications and Radio Engineering. - 2001. - 55(8). - P. 52 – 60.

21. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В. Принятие оптимальных решений при планировании сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества // Радиотехника. - Харьков, 2014. - Вып.178. - С. 119 – 130.

22. Безрук В.М., Варич В.В. Многокритериальный подход к маршрутизации в сетях связи // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2010. - 4/9 (46). - С. 11-16.

23. Bezruk Valeriy, Galchenko Kiril. Multicriterion analysis and choosing of the optimal routing in ad-hoc networks // 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology. - 2017. - pp. 234 - 238.

24. Bezruk V., Zelenin A.,Vlasova V., Skorik J. Selection of preferred routing protocols of wireless sensor and actuator network nodes // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. - 2016. - Volume 1, Issue 9. - pp. 4-9.

25. Скорик Ю.В., Гальченко К.Р., Безрук В.М. Многокритериальный выбор предпочтительного протокола маршрутизации в ad hoc сетях методом анализа иерархий // Проблеми телекомунікацій. - Харків, 2017. - №1 (20). - С. 14-21.

26. Астраханцев А.А., Безрук В.М. Маршрутизація в мережах зв'язку. - Харків: СМІТ, 2011. - 367 с.

27. Астраханцев А.А., Горбань С.М. Сравнительный анализ эффективности протоколов маршрутизации в ad-hoc сетях // Инфокоммуникационные системы. - 2013. - №2. - с. 156-159.

28. C. Perkins and P. Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers // In Proceedings of the ACM SIGCOMM. - 1994. - pp. 234-244.

29. C. Chiang, H. Wu, W. Liu, and M. Gerla. Routing in clustered multihop, mobile wireless networks // In Proceedings of IEEE SICON. - 1997. - pp. 197-211.

30. S. Mutrhy and J. Garcia-Luna-Aceves. An efficient routing protocol for wireless networks // MONET. - 1996. №1(2). - pp. 183-197

31. C. Perkins and E. Royer. Ad hoc on-demand distance vector routing // In Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. – 1999. - pp. 99-100.

32. D. Johnson and D. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks \ In T. Imielinski and H. Korth, editors. // Mobile Computing. - Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1996. - pp. 153-181.

33. V. Park and M. Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks // In Proceedings of the IEEE INFOCOM. - 1997. - pp. 1405-1413.

34. M.S. Corson and A. Ephremides. A distributed routing algorithm for mobile wireless networks // ACM / Baltzer Wireless Networks Journal. - 1995. - №1(1) - pp. 61-81.

35. C.-K. Toh. Associative-based routing for ad hoc mobile networks // Wireless Personal Communications Journal, Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems. - 1997. - №4(2). - pp. 103-139.

36. R. Dube, C. Rais, K. Wang, and S. Tripathi. Signal stability-based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks // IEEE Personal Communications Magazine. - 1997. - №4. – pp. 36-45.

37. M. Abolhasan , T. Wysocki, E. Dutkiewicz // A review of routing protocols for mobile ad hoc networks // Ad hoc networks. - 2004. - vol. 2. - pp. 1–22.

38. C. Cordeiro, D. Agrawal. Ad hoc and sensor networks. Theory and applications. - Singapore: World scientific, 2006. - 683 p.

39. Carlos De Morais Cordeiro. Ad Hoc and Sensor Net works: Theory and Applications / Carlos De Morais Cordeiroharma Prakash // Agrawal World Scientific. - 2006. - №1. – 641 p.

40. C. Perkins and E. Royer. Ad hoc on-demand distance vector routing // Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. - 1999. - pp. 99-100.

41. C.-K. Toh. Associative-based routing for ad hoc mobile networks // Wireless Personal Communications Journal. Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems. - 1997. - №4(2). - p. 103-139.

More Books!

yes

I want morebooks!

**Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн - в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов!
Мы используем экологически безопасную технологию "Печать-на-Заказ".**

Покупайте Ваши книги на
www.morebooks.de

Buy your books fast and straightforward online - at one of the world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.morebooks.de

SIA OmniScriptum Publishing
Brivibas gatve 1 97
LV-103 9 Riga, Latvia
Telefax: +371 68620455

info@omniscriptum.com
www.omniscriptum.com

OMNIScriptum