

УДК 338.984

# МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ В АД-НОС СЕТЯХ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ



[В.М. БЕЗРУК](#), [Ю.В. СКОРИК](#), [К.Р. ГАЛЬЧЕНКО](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – In the construction of wireless ad-hoc networks, the choice of the preferred routing protocol plays an important role, taking into account a set of quality indicators, which, as a rule, are interrelated and antagonistic. This determines the need to select the preferred routing protocol using multi-criteria optimization methods. In this article, practical features of applying one of such methods, the hierarchy analysis method, are considered for multi-criteria selection of the preferred version of the routing protocol in ad-hoc networks, taking into account a set of quality indicators. The analysis of the most frequently used ad-hoc networks of proactive protocols DSDV, OLSR, WRP, as well as AODV, DSR reactive protocols was carried out. As quality indicators, the main characteristics of the protocols are chosen, in particular, the convergence time, memory, and control. According to the method of analyzing hierarchies with the involvement of experts, matrices of paired comparisons of quality indicators and considered routing protocols were obtained. For the matrices obtained, their principal eigenvectors and priority vectors are calculated, which are then used to calculate the global priority vector. The preferred value of the global priority vector component is the preferred version of the routing protocol in the wireless ad-hoc network. This protocol is an OLSR routing protocol based on the Dijkstra algorithm.

**Анотація** – Проаналізовано характеристики різних протоколів маршрутизації в безпроводових ad-hoc мережах з урахуванням сукупності показників якості. Розглянуто математичні особливості одного з методів багатокритеріального вибору переважного варіанту – методу аналізу ієрархій. На основі проаналізованих даних отримано вектор глобальних пріоритетів, за максимальним значенням компонент якого обраний кращий варіант маршрутизації в безпроводовій ad-hoc мережі.

**Аннотация** – Проанализированы характеристики различных протоколов маршрутизации в беспроводных ad-hoc сетях с учетом совокупности показателей качества. Рассмотрены математические особенности одного из методов многокритериального выбора предпочтительного варианта – метода анализа иерархий. На основе проанализированных данных получено вектор глобальных приоритетов, по максимальному значению компонент которого выбран лучший вариант маршрутизации в беспроводной ad-hoc сети.

## Введение

Беспроводные ad-hoc сети относятся к мобильным децентрализованным динамическим самоорганизующимся сетям, которые не имеют постоянной структуры [1]. 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 ин-

формации между узлами. Эти проблемы решаются с помощью проактивных, реактивных и гибридных протоколов маршрутизации [1-5]. 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 [6]. В данной статье рассматриваются особенности применения метода анализа иерархий для многокритериального выбора единственного предпочтительного варианта маршрутизации в ad-hoc сетях с учетом совокупности показателей качества.

## **I. Сравнительный анализ протоколов маршрутизации в ad-hoc сетях**

В ad-hoc сетях наиболее часто применяются проактивные протоколы DSDV, OLSR, WRP, а также реактивные протоколы AODV, DSR. Кратко рассмотрим некоторые особенности этих протоколов [1-5].

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 выполняющее 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, в котором периодический обмен таблицами маршрутизации и защита от возникновения петель маршрутизации осуществляется аналогично протоколу RIP, создавая соединения, которые постоянно поддерживаются между соседними ad-hoc узлами сети.

AODV (Adhoc On-Demand Distance Vector) – протокол, использующий вектор расстояния по запросу. Он 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, а ответ на запрос возвращается по установленному маршруту.

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

Следует отметить, что каждый протокол маршрутизации характеризуется совокупностью показателей качества. В качестве показателей качества могут служить такие характеристики протоколов как время конвергенции, память, управление. Эти показатели качества связаны между собой и являются антагонистическими. Поэтому для выбора предпочтительного протокола маршрутизации в ad-hoc сетях следует применять методы многокритериальной оптимизации. Одним из таких методов является метод анализа иерархий.

## II. Математические особенности метода анализа иерархий

Кратко рассмотрим некоторые особенности метода анализа иерархий (МАИ) [6]. 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

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & & & \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

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

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. 1.

Таблица 1. Шкала относительной важности элементов сравнения

Относительная важность	Определение
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 сводится 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

$$V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $n$  – число показателей качества.

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

$$P_j = \frac{V_j}{S}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

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 (2) и (3) вычисляются компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов системы по отношению к отдельным показателям качества системы  $\bar{Q}_j, j = \overline{1, n}$ .

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

$$C_i = \sum_{j=1}^n P_j Q_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где  $N$  – число сравниваемых вариантов систем.

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов (4) выбирается соответствующий предпочтительный вариант системы.

### III. Выбор предпочтительного варианта протокола маршрутизации на основе метода анализа иерархий

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. 2 приведены оценки значений показателей качества для различных типов протоколов маршрутизации [5].

Таблица 2. Показатели качества протоколов маршрутизации

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

В табл. 2 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. Эти показатели качества связаны между собой и носят конкурирующий характер.

На рис. 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.

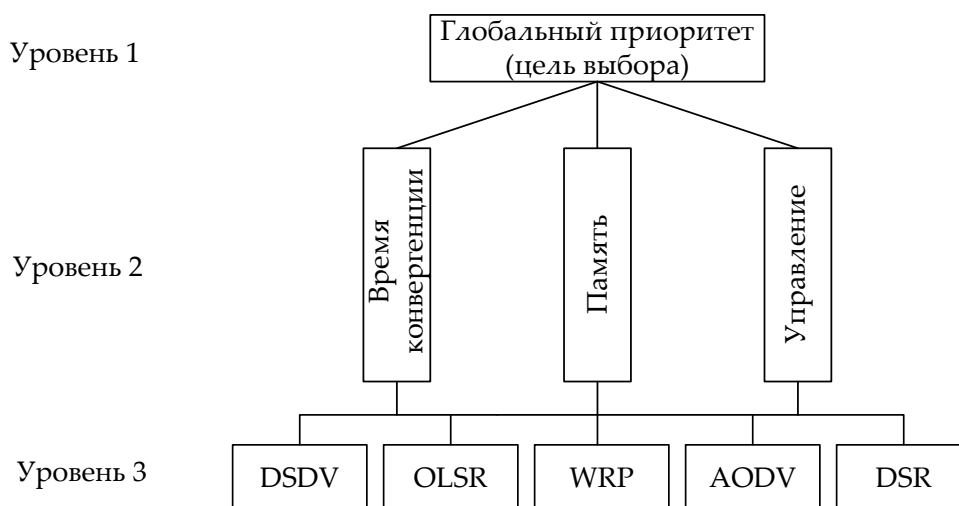


Рис. 1 Декомпозиция проблемы выбора

Согласно МАИ построена матрица парных сравнений для совокупности показателей качества (т.е. уровне 2) (табл. 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 3. Матрица парных сравнений показателей качества протоколов маршрутизации и вычисленные оценки компонент вектора приоритетов

	Время конвергенции	Память	Управление	Компоненты собственного вектора $V_j$	Компоненты вектора приоритетов $P_j$
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 (2) и (3) собственные векторы и векторы приоритетов, которые приведены в табл. 4, 5, 6.

Таблица 4. 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	1/4	1/4	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 5. 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	1/2	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 6. 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. 7 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 глобального вектора приоритетов согласно (6), которые приведены в последнем столбце табл. 7. По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов  $\tilde{N}_i$  выбирается предпочтительный вариант протокола маршрутизации в ad-hoc сетях с учетом введенных показателей качества. Таким является протокол маршрутизации OLSR, основанный на алгоритме Дейкстры.

Таблица 7. Результаты вычисления значений компонент глобального вектора приоритетов

№	Тип протокола маршрутизации	$Q_{i1}$	$Q_{i2}$	$Q_{i3}$	$C_i$
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	

## Выводы

1. Проведен анализ наиболее часто применяемых в ad-hoc сетях проактивных протоколов DSDV, OLSR, WRP, а также реактивных протоколов AODV, DSR. В качестве показателей качества выбраны основные характеристики протоколов, в частности, время конвергенции, память, управление.

2. Рассмотрены практические особенности применения одного из методов многокритериального выбора предпочтительного варианта – метода анализа иерархий. Получены матрицы парных сравнений показателей качества и вариантов протоколов маршрутизации, для которых вычислены их главные собственные векторы и векторы приоритетов.

3. На основе полученных данных вычислен вектор глобальных приоритетов. По максимальному значению его компонент выбран предпочтительный вариант маршрутизации в беспроводных ad-hoc сетях, которым является протокол маршрутизации OLSR.

## Список литературы:

1. Астраханцев А.А., Безрук В.М. Маршрутизация в сетях зв'язку. – Харків: Компания СМІТ, 2011. – 367 с.
2. Cordeiro С.М., Agrawal D.P. Ad Hoc & Sensor Networks: Theory and Applications. – World Scientific, 2006. – 636 p.
3. Perkins С., Royer E. Ad hoc on-demand distance vector routing // Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. – 1999. – P. 99-100.
4. Toh С.-К. 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.
5. Астраханцев А.А., Горбань С.М. Сравнительный анализ эффективности протоколов маршрутизации в ad-hoc сетях // Инфокоммуникационные системы. – 2013. – №3. – С. 156-159.
6. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций. – Харьков: Компания СМІТ, 2017. – 268 с.