

УДК 004.031. 621.39 (612)

Элементы оптимизации при разработке сетей инфокоммуникаций

Для оптимизации разработки сетей инфокоммуникаций (ИК) используются различные подходы. Представлен анализ отдельных методов оптимизации для создания сетей ИК. Рассмотрены ординалистический и кардиналистический подходы к определению понятия оптимальности ИК. Дан анализ методов нахождения Парето-оптимальных проектных решений и экспертных оценок о ценности полученных Парето-оптимальных вариантов системы. Приведен алгоритм метода анализа иерархий (МАИ). Представлен пример выбора технологии для сетей мобильной связи 4-го поколения с использованием МАИ.

В. А. ВИШНЯКОВ,
д. т. н., профессор, профессор
кафедры ИКТ

Белорусский государственный
университет
информатики и радиоэлектроники

■ **Ключевые слова:**

сети инфокоммуникаций, методы оптимизации, экспертные оценки, метод анализа иерархий.

Введение. За последние годы структура инфокоммуникационных (ИК) сетей в мире и в Республике Беларусь стала более сложной, мобильной и многосервисной. В связи с этим для проектирования сетей ИК необходимо использовать оптимизацию. Кратко рассмотрим особенности некоторых оптимизационных задач, решаемых в ИК.

Типичные задачи проектирования ИКС решались с использованием методов однокритериальной оптимизации. Это задачи перехода с медной на оптоволоконную технологию, анализ развития сетей, выбора оптимальных маршрутов и определение оптимальной скорости передачи, выбор архитектуры сетей, распределение каналов, месторасположение спутников. В основном использовались генетические и эволюционные алгоритмы [1].

Известно применение методов многокритериальной оптимизации при номинальном планировании сетей сотовой связи, выборе оптимальной структуры и параметров транспортных сетей, управления сетями связи, при маршрутизации с учетом совокупности показателей качества [1].

Проблема маршрутизации – одна из наиболее значимых областей в задаче управления сетями. В вопросе маршрутизации обычно рассматривается несколько критериев, таких как стоимость, ширина полосы пропускания, задержка, джиттер, потерянные пакеты, вероятность ошибок [1, 2].

Ординалистический подход по оптимальности решений основан на использовании бинарных отношений. В случае когда при выборе наилучших (оптимальных) решений лица, принимающего решения (ЛПР), руководствуется отношением строгого предпочтения $>$, из всего множества возможных решений X выделяются решения, недоминируемые по этому бинарному отношению. Остальные решения являются худшими.

Кардиналистический подход по оптимальности решений основан на использовании целевой функции $f(x)$, значение которой рассматривается как ценность решения x и оно определяет предпочтение ЛПР. Однако из-за недостаточной информированности ЛПР про оптимальность с учетом противоречивых требований к проектным решениям не всегда удается задать скалярный критерий оптимальности. Поэтому решения характеризуются векторной целевой функцией, включающей совокупность частных целевых функций $P(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$, которые определяют полезность решения x с точки зрения разных требований. При этом возникают более сложные задачи оптимизации решений по совокупности показателей качества, которые называются задачами многокритериальной либо векторной оптимизации.

В случае если функции связаны между собой и являются антагонистическими, такая оптимизационная задача сводится к нахождению компромисса, который означает, что дальнейшее улучшение значения каждой целевой функции может быть достигнуто лишь за счет ухудшения значений других целевых функций. Соответствующие решения $x^{(*)} \in X$ называют Парето-оптимальными относительно векторной целевой функции $f(x)$.

Методы нахождения Парето-оптимальных проектных решений. Для нахождения Парето-оптимальных решений могут быть использованы разные специальные методы: весовой метод, метод рабочих характеристик, метод главного критерия и др. [1, 3].

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

$$P_j(X) = \{x^{(*)} \in X : \arg \text{extr} [f(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \dots + \lambda_m f_m(x)]\}, x \in X, \quad (1)$$

в которой весовые коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ выбираются из условия $\lambda_i > 0, \sum \lambda_i = 1, i = 1, m$. Подмножество Парето-оптимальных решений содержит те проектные варианты, которые удовлетворяют условию (1) при разных допустимых комбинациях весовых коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$.

Метод рабочих характеристик состоит в том, что все целевые функции, кроме одной, переводятся в подмножество ограничений вида равенства, находится ее экстремум на множестве допустимых решений:

$$P_j(X) = \{x^{(0)} \in X : \arg \text{extr} [f_1(x)], f_2(x) = b_2; f_3(x) = b_3, \dots, f_m(x) = b_m, x \in X, \quad (2)$$

где b_2, b_3, \dots, b_m – некоторые фиксированные, но произвольные значения целевых функций.

В методе главного критерия в качестве целевой функции выбирается одна из функций $f_i(x)$, например $f_1(x)$, которая, по мнению ЛПР, лучше отражает цель принятия решений.

Экспертный подход. Информация от группы экспертов может быть использована для формализованного построения некоторого критерия предпочтения и выбора лучшего варианта системы. Такой экспертный критерий предпочтения может основываться на использовании *скалярной* целевой функции многих переменных (k_1, \dots, k_m) , где k_i – оценки факторов качества системы, определяемые значениями целевых функций для ее лучшего варианта.

Оптимизация этой функции на подмножестве Парето-оптимальных оценок системы $P(Y)$ приводит к выбору лучшего варианта системы:

$$\varphi 0 = \arg \text{extr} U(k_1, \dots, k_m). \quad (3)$$

Одним из используемых методов сужения подмножества Парето-оптимальных решений до одного варианта является применение скалярной функции *ценности*. Функцию $U(k)$ (где $k = (k_1, \dots, k_m)$) называют функцией ценности для отношения строгого предпочтения, если для произвольных оценок $k', k'' \in Y$ в критериальном пространстве неравенство $U(k') > U(k'')$ имеет место тогда, когда $k' \geq k''$.

Если существует такая функция ценности $U(k)$, то единственное лучшее решение находится путем максимизации этой функции на подмножестве Парето-оптимальных оценок:

$$\max U(k), k \in \text{opt} \geq V. \quad (4)$$

Вопрос существования функций ценности и способы их оценивания детально рассматриваются во многих работах [2, 4, 5]. Процедура формирования функции ценности $U(k)$ иногда называется **сверткой** векторного критерия $k = (k_1, \dots, k_m)$.

Обобщенная функция ценности может принимать вид

$$U(k_1, \dots, k_m) = \sum c_j \varphi_j(k_j), j = 1, m, \quad (5)$$

где $\varphi_j(\cdot)$ – одномерные функции ценности, которые характеризуют ценность системы по j -му показателю качества; c_j – весовые коэффициенты.

Задача построения функции (5) сводится к оценке коэффициентов c_j , выбору функций $\varphi_j(k_j)$, проверке их независимости по отношению предпочтения, проверке согласованности построенной функции ценности. Иногда может быть использована более простая функция ценности в виде

$$U(k) = \sum c_j k_j, j = 1, m. \quad (6)$$

При этом используются разные методы получения дополнительной информации о значении коэффициентов c_j . Это методы экспертных оценок, которые заключаются в интервью с несколькими экспертами с учетом информации о вариантах разрабатываемой системы по факторам ее качества.

Метод анализа иерархий заключается в разложении задачи выбора одного наилучшего варианта системы на отдельные компоненты и получении экспертных суждений по парным сравнениям различных элементов задачи поиска. В результате анализа

новых данных формируется матрица парных сравнений. Для этой матрицы вычисляется основной собственный вектор, и в соответствии с определенной математической процедурой получаются компоненты глобального вектора приоритетов. Лучший вариант системы из заданного набора опций соответствует максимальному значению составляющих глобального вектора приоритетов. Алгоритм МАИ включает в себя шаги [2, 3]:

1. Выделение проблемы и формулирование цели.
2. Определение основных критериев и альтернатив.
3. Построение иерархии: от цели через критерии к альтернативам.
4. Построение матрицы попарных сравнений критериев с целью выбора альтернатив по критериям.
5. Применение метода анализа полученных матриц.
6. Определение весов альтернатив в соответствии с системой иерархии.

Важность различных вариантов систем (на уровне 3) и различные показатели качества (на уровне 2) сравниваются попарно. Результаты парных сравнений элементов сводятся к матричной форме

$$A = \| a_{ij} \|, \quad (7)$$

где $a_{ij} = w_i / w_j$ – оценки парных сравнений элементов выбора w_i / w_j . Диагональ этой матрицы заполняется единичными значениями, а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполняются обратными значениями. Например, для 2 будет 1/2, для 3 – 1/3 и т. д.

Компоненты главного собственного вектора матрицы парных сравнений (7) показателей качества вычисляются как среднее геометрическое значение в строке матрицы парных сравнений по формулам 8–10:

$$V_j = n \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, j = \overline{1, n} \quad p_j = \frac{V_j}{S}, j = \overline{1, n}, \quad (8-10)$$

$$S = \sum_{j=1}^n V_j$$

Аналогично находятся оценки матриц парных сравнений для вариантов системы на уровне 3 в отдельности по отношению к каждому показателю качества системы. На основе этих матриц вычисляются компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов систем

Q_j по отношению к отдельным показателям качества систем.

С использованием полученных данных вычисляются значения компонент вектора глобальных приоритетов C согласно формуле 11:

$$C_i = \sum_{j=1}^n P_j Q_{ij}, i = \overline{1, N}, \quad (11)$$

где P_j – локальные приоритеты альтернатив, Q_{ij} – локальные оценки важности показателей.

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов (11) выбирается соответствующий предпочтительный вариант системы.

Пример выбора технологии сетей мобильной связи (МС) 4-го поколения по МАИ. Для сравнительного анализа возьмем технологии МС 4-го поколения: HSPA, WiMAX и LTE [1].

В технологии МС имеется два варианта HSPA+ (7 HSPA и добавления к варианту 8). В нисходящем канале они отличаются 64-QAM-модуляцией. Модуляция 64-QAM была добавлена к восходящей линии связи, и возможности VoIP были улучшены.



Таблица 1 – Значения показателей качества для стандартов сотовой сети связи

Показатели качества	HSPA релиз 7	HSPA релиз 8	WiMAX	LTE
K_1 , бит/Гц/сек	0,87	1,75	1,59	1,59
K_2 , км	30	40	50	5
K_3 , Мбит/сек	21	35	48	75

Таблица 2 – Нормированные показатели качества для стандартов сотовой сети связи

Показатели качества	HSPA релиз 7	HSPA релиз 8	WiMAX	LTE
K_1	0,497	1	0,9	0,9
K_2	0,6	0,8	1	0,1
K_3	0,28	0,467	0,64	1

Таблица 3 – матрица парных сравнений показателей качества, оценки компонент главного собственного вектора и вектора приоритетов показателей качества

	K_1	K_2	K_3	V_j	P_j
K_1	1	3	1/2	1,145	0,298
K_2	2	1	1/3	0,874	0,228
K_3	2	3	1	1,817	0,474

Таблица 4 – матрица парных сравнений вариантов СМС по отношению к спектральной эффективности

	N_1	N_2	N_3	N_4	V_1	Q_{ij}
N_1	1	1/7	1/5	1/5	0,178	0,03
N_2	7	1	2	2	3,037	0,512
N_3	5	1/2	1	1	1,357	0,229
N_4	5	1/2	1	1	1,357	0,229

Таблица 5 – матрица парных сравнений вариантов СМС по отношению к радиусу действия

	N_1	N_2	N_3	N_4	V_1	Q_{ij}
N_1	1	1/3	1/5	5	0,693	0,09
N_2	3	1	1/3	7	1,913	0,249
N_3	5	3	1	8	4,932	0,642
N_4	1/5	1/7	1/8	1	0,153	0,02

Таблица 6 – матрица парных сравнений вариантов СМС по отношению к скорости передачи

	N_1	N_2	N_3	N_4	V_1	Q_{ij}
N_1	1	1/3	1/5	1/7	0,212	0,029
N_2	3	1	1/3	1/5	0,584	0,081
N_3	5	3	1	1/3	1,71	0,237
N_4	7	5	3	1	4,717	0,653

Таблица 7 – результаты вычисления вектора глобальных приоритетов

СМС	Q_{ij}	Q_{2j}	Q_{3j}	ζ_j
N_1	0,03	0,09	0,029	0,124
N_2	0,512	0,249	0,081	0,2158
N_3	0,229	0,642	0,237	0,327
N_4	0,229	0,02	0,653	0,423
P_j	0,298	0,228	0,474	

Сети MS с технологией WiMAX предназначены для предоставления услуг как стационарным, так и мобильным пользователям. WiMAX имеет сопоставимые пиковые скорости в нисходящем канале с HSPA+ (выпуск 8) с той же модуляцией, скоростью кодирования и шириной канала. Но мобильный WiMAX в восходящем канале имеет пиковую скорость в 2–3 раза выше. Мобильный WiMAX поддерживает ширину канала до 20 МГц, частоту, дублирование по времени. Его частотные профили находятся в диапазонах 700, 1700, 2300, 2500 и 3500 МГц [1].

Для системы Long Term Evolution (LTE) технология OFDMA используется в нисходящем канале, а SC-FDMA – в восходящем канале. Модуляция – до 64 QAM, ширина канала – до 20 МГц, дуплексирование TDD и FDD. Используются адаптивные антенные системы, гибкая сеть доступа. Сетевая архитектура представляет собой полностью IP-сеть. Система LTE использует технологии и методы, уже используемые в мобильном WiMAX. LTE представляет собой переход от систем CDMA к системам OFDMA, а также переход к полностью IP-системе с пакетной связью. Для обеспечения обратной совместимости требуются двухрежимные абонентские устройства.

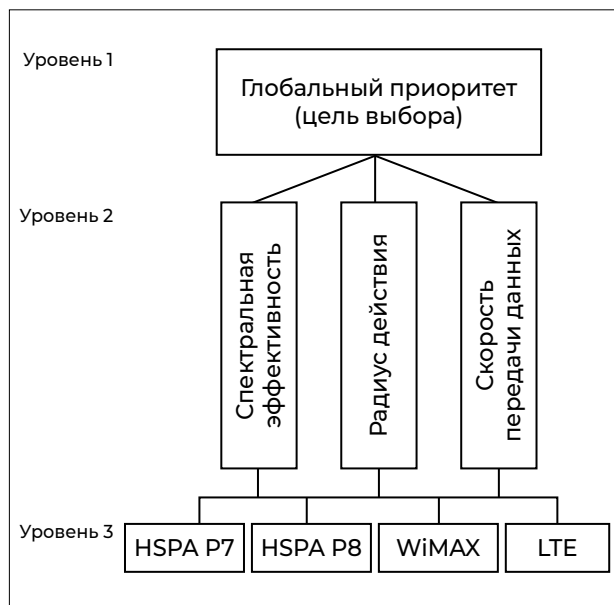
Показатели качества сетевых технологий MS носят конкурирующий характер. Для выбора предпочтительного варианта SMS-технологий необходимо применять методы многокритериальной оптимизации. В таблице 1 приведены начальные значения показателей качества для различных стандартов сети сотовой связи: K_1 – спектральная эффективность (нисходящая линия связи), K_2 – дальность действия, K_3 – скорость передачи данных.

Эти параметры приведены к виду показателей качества – путем деления на максимальное значение в каждой строке (таблица 2).

Рассмотрим применения МАИ для выбора лучшего варианта технологий СМС 4-го поколения. На рисунке показано иерархическое представление задачи выбора СМС.

В таблице 3 дана матрица парных сравнений показателей качества, рассчитаны оценки составляющих основного собственного вектора и вектора приоритетов показателей качества. Выполнены парные сравнения вариантов технологий на 3-м уровне иерархии: парные сравнения технологий по отношению к выбранным показателям качества. В результате обработки полученных матриц парных сравнений вычисляются основные собственные векторы V_j и векторы приоритетов P_j по формулам (8–10).

В таблицах 4–6 приведена матрицы парных сравнений стандартов сети мобильной связи по отношению к показателям качества: спектральной



Декомпозиция задачи выбора иерархии технологий сетей МС

эффективности, к радиусу действия, скорости передачи данных. Приведены вычисленные компоненты соответствующих локальных собственных

векторов и векторов приоритетов согласно формулам (8–10).

В таблице 7 приведены результаты вычисления главного вектора глобальных приоритетов технологий СМС по формуле (11). Анализируя результаты заключаем, что предпочтительным вариантом технологии СМС является вариант N4. Это технология LTE со скоростью передачи данных 75 Мбит/с, спектральной эффективностью 1,57 бит/Гц/с и радиусом действия базовых станций 5 км.

Заключение. Представлен анализ отдельных методов оптимизации для создания сетей ИК. Рассмотрены ординалистический и кардиналистический подходы к определению понятия оптимальности ИК. Дан анализ методов нахождения Парето-оптимальных проектных решений и экспертных оценок о ценности полученных Парето-оптимальных вариантов системы. Приведен алгоритм метода анализа иерархий, относящегося к экспертным. Представлен пример выбора технологии для сетей мобильной связи 4-го поколения с использованием этого метода, в котором лучшей оказалась технология LTE.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Безрук, В. М.** Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций / В. М. Безрук, Д. В. Чеботарев, Ю. В. Скорик. – ХНУЭ, Харьков, 2017. – 268 с.
2. **Кормен, Томас Х.** и др. Алгоритмы: построение и анализ = INTRODUCTION TO ALGORITHMS. – 2-е изд. – М.: «Вильямс», 2006. – 1296 с.
3. **Джамалипур, А.** Беспроводной мобильный Интернет: архитектура, протоколы и сервисы / А. Джамалипур. – М.: Техносфера, 2009. – 496 с.
4. **Никкульшин, Б. В.** Системный анализ и принятие решений в проектной и управленческой деятельности: учебно-методическое пособие по учебной дисциплине «Теория системного анализа и принятие решений в инфокоммуникациях» для студентов II степени специальности «Системы и сети инфокоммуникаций» всех форм обучения / Б. В. Никкульшин, Т. В. Тиханович, В. Г. Русин, В. А. Вишняков. – Минск: БГУИР, 2021. – 72 с.
5. **Саати, Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 2003. – 320 с.
6. **Таха, Х. А.** Введение в исследование операций: пер. с англ. / Х. А. Таха. – 6-е изд. – М.: Вильямс, 2001. – 912 с.

Various approaches are used to optimize the development of infocommunication networks (IC). An analysis of individual optimization methods for creating IR networks is presented. The ordinalistic and cardinalistic approach to the definition of the concept of optimality IC are considered. The analysis of methods for finding Pareto-optimal design solutions and expert assessments of the value of the obtained Pareto-optimal variants of the system is given. The algorithm of the hierarchy analysis method (MAI) is given. An example of the choice of technology for mobile communication networks of the 4th generation using MAI is presented.

Keywords: infocommunication networks, optimization methods, expert assessments, hierarchy analysis method.

Получено 16.11.2021.