

УДК 381.324:621.394.74

ПРИНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ С УЧЕТОМ СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Часть 2.

Применение методологии многокритериальной оптимизации в задачах планирования, проектирования и управления в телекоммуникационных сетях



В.М. БЕЗРУК, А.Н. БУХАНЬКО,
Д.В. ЧЕБОТАРЕВА, В.В. ВАРИЧ,
Ю.В. СКОРИК

Харьковский национальный университет
радиоэлектроники

Розглядаються особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації для рішення задач оптимального вибору проектних рішень в телекомунікаційних мережах. Наводяться основні етапи багатокритеріальної оптимізації за Парето.

Features of multicriteria optimization methods application for the solving of problems of a design decisions optimum choice in telecommunication networks are considered. The basic stages of multicriteria Pareto optimization are resulted.

Рассматриваются особенности применения методов многокритериальной оптимизации для решения задач оптимального выбора проектных решений в телекоммуникационных сетях. Приводятся основные этапы многокритериальной оптимизации по Парето.

Введение

Современные телекоммуникационные сети, независимо от их организации и типа передаваемой информации, становятся все более сложными и определяются множеством технико-экономических требований, которые характеризуются некоторой совокупностью показателей качества при их создании и эксплуатации. Как правило, существует некоторое множество допустимых проектных решений и необходимо выбирать наилучшие (оптимальные по заранее заданному критерию) в задачах долгосрочного планирования и проектирования телекоммуникационных сетей, а также краткосрочного планирования и ситуативного управления с учетом совокупности показателей качества. Поэтому актуальным является применение методов многокритериальной оптимизации для принятия оптимальных проектных решений [1 – 5]. При этом характерны следующие этапы: формирование некоторого исходного множества решений, определение подмножества допустимых решений, задание векторного критерия оптимальности, учитывающего совокупность показателей ка-

чества, а также выбор структуры и параметров телекоммуникационной сети, оптимальных по заданному критерию оптимальности.

В первой части статьи на основе анализа известных работ кратко излагаются особенности методологии многокритериальной оптимизации систем и ее использования для выбора оптимальных проектных решений с учетом совокупности показателей качества. В данной, второй, части статьи приводятся практические особенности применения методологии многокритериальной оптимизации в некоторых задачах долгосрочного и краткосрочного сетевого планирования, проектирования и управления в телекоммуникационных сетях, в частности, в задачах выбора оптимальных вариантов работы сети передачи данных, оптимального планирования сотовых сетей связи, оптимальной маршрутизации, выбора оптимальных речевых кодеков и управления сетевыми ресурсами с учетом совокупности показателей качества [6 – 10].

При этом исходное множество допустимых вариантов телекоммуникационной сети формируется на основе разных топологий и сетевых технологий, возможных пропускных способностях каналов связи, различных вариантов дисциплин обслуживания в узлах коммутации, разных способов маршрутизации и др. Каждый проектный вариант сети оценивается по совокупности показателей качества и представляется в критериальном пространстве оценок, где выделяется подмножество эффективных (Парето-оптимальных) оценок показателей качества и соответствующие им Парето-оптимальные проектные варианты сети. Далее может быть использован любой вариант сети из найденного подмножества Парето-оптимальных, поскольку эти варианты являются эквивалентными – несравнимыми по безусловному критерию предпочтения (критерию Парето). При необходимости с привлечением дополнительной информации об отношениях предпочтения может быть введен условный скалярный критерий предпочтения и выполнено дальнейшее сужение подмножества Парето-оптимальных вариантов и выбрано единственное проектное решение сети.

I. Выбор оптимальных проектных вариантов сети передачи данных с учетом совокупности показателей качества

Были рассмотрены особенности применения методологии многокритериальной оптимизации при выборе оптимального проектного варианта сети передачи данных с пакетной коммутацией при учете совокупности показателей качества [6]. Получены Парето-оптимальные варианты сети, среди которых выбрано единственное проектное решение.

В рассмотренном примере выбраны показатели качества, определяемые временем доставки и вероятностью потери пакетов в рамках дейтаграммой передачи сообщений. Эти показатели качества связаны между собой и являются антагонистическими, то есть при улучшении значения одного из показателей другой показатель качества ухудшается. Такая задача выбора оптимальных проектных вариантов сети передачи данных актуальна для практических приложений, критичных ко времени доставки сообщений, в частности, в системах передачи видео и речевых сообщений,

системах банковских терминалов, системах сигнализации, системах устранения неисправностей на сетях связи.

При исследованиях построена математическая модель полносвязной топологии сети передачи данных. В структуру математической модели сети введены имитаторы источников сообщений, процедуры упаковки сообщений в пакеты и передачи их по каналам связи, процедуры маршрутизации и обслуживания в узлах коммутации, имитаторы ошибок в каналах связи. Моделировались источники сообщений с пуассоновским законом распределения и разными интенсивностями заявок. Предусмотрено также моделирование разных задержек при передаче пакетов, связанных с конечной скоростью распространения сигналов в каналах связи, фиксированной пропускной способностью каналов, а также временем пребывания пакетов в очереди на передачу по каналам связи. Реализованы различные варианты работы сети, которые отличались дисциплинами обслуживания пакетов данных в очередях, способами маршрутизации при передаче пакетов и размером окна транспортного соединения (рис. 1).

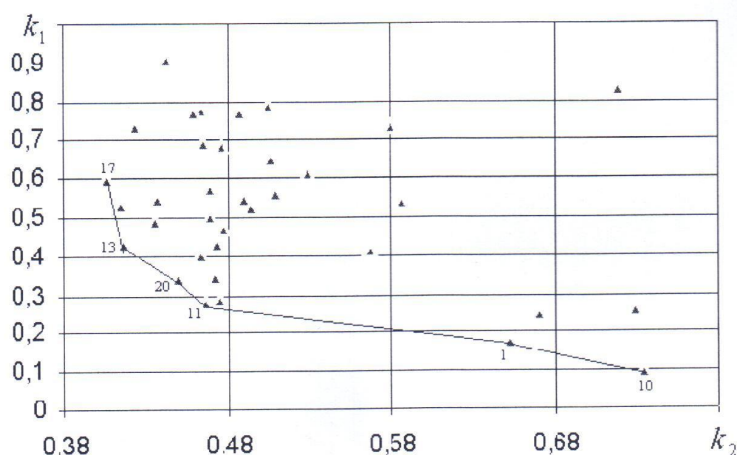


Рис. 1. Выбор Парето-оптимальных вариантов сети передачи данных в критериальном пространстве

В приведенном примере было рассмотрено тридцать шесть вариантов работы сети. В результате имитационного моделирования для каждого варианта найдены оценки показателей качества: среднего времени доставки $k_1 = \bar{T}$ и средней вероятности потери пакетов $k_2 = \bar{P}$. При этом полученное допустимое множество вариантов работы сети было представлено в критериальном пространстве. На рис. 1 приведены значения показателей качества вариантов сети, нормированные к максимальным значениям. Здесь выделено подмножество Парето-оптимальных оценок вариантов сети путем исключения безусловно худших вариантов по критерию Парето. Подмножеству Парето-оптимальных вариантов сети соответствует левая нижняя граница множества допустимых вариантов, которая включает варианты: 1, 10, 11, 13, 17, 20. Среди Парето-оптимальных вариантов сети выбран единственный вариант с применением условного критерия предпочтения - минимума скалярной функции ценности в виде результирующего показателя качества $k_p = C_1 k_1 + C_2 k_2$. Для случая $C_1 = 0,4$, $C_2 = 0,6$ выбран вариант работы сети 11, для которого установлены: дисциплина обслуживание заявок - в случайном порядке, способ маршрутизации - равномерный согласно весам, размер «окна» передачи - равный 8.

II. Многокритериальная оптимизация при планировании сотовых сетей связи

Рассмотрены практические особенности применения методологии многокритериальной оптимизации при номинальном планировании сотовых сетей связи (ССС) [7].

Нахождение оптимальных вариантов СССР при номинальном планировании СССР с учетом совокупности показателей качества включает следующие стадии:

- задание исходного множества вариантов сетей, которые отличаются данными по обслуживаемой территории, выделенной полосе частот, количеству абонентов и др.;
- выделение множества допустимых вариантов с учетом ограничений на структуру и параметры сетей, а также ограничений на значение показателей качества;
- выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов сетей с использованием безусловного критерия предпочтения;
- анализ полученных Парето-оптимальных вариантов сетей, оценивание их многомерных потенциальных характеристик и многомерных диаграмм обмена показателей качества;
- выбор единственного варианта сети из подмножества Парето с использованием условного критерия предпочтения.

В примере сформировано множество допустимых вариантов СССР второго поколения, которое определялось различными данными по планируемому количеству абонентов в сети, размеру обслуживаемой территории, активности абонентов, выделенной полосе частот, размеру кластеров, мощности передатчиков базовые станции (БС), допустимой вероятности блокирования вызовов, проценту времени ухудшения качества связи.

При этом рассчитаны основные технические параметры СССР:

1. Общее число частотных каналов, выделяемых для развертывания СССР,

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k),$$

где F_k - полоса частот, занимаемая одним частотным каналом СССР.

2. Число радиочастот, необходимое для обслуживания абонентов в одном секторе каждой соты

$$n_s = \text{int}(N_k / C \cdot M).$$

3. Величина допустимой телефонной нагрузки в одном секторе одной соты или в соте (для БС, имеющих антенны с круговой диаграммой направленности), которая определяется соотношениями:

$$A = n_0 \left[1 - \sqrt{1 - (P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_0 / 2})^{1/n_0}} \right] \quad \text{при } P_{\text{бл}} \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}};$$
$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln(P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_0 / 2})} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \text{при } P_{\text{бл}} > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}},$$

где $n_0 = n_s \cdot n_a$; n_a - число абонентов, которые одновременно могут использовать один частотный канал.

4. Количество абонентов, обслуживаемых БС, которое зависит от числа секторов, допустимой телефонной нагрузки и активности абонентов

$$N_{aBTS} = M \text{int}(A / \beta).$$

5. Необходимое число БС на заданной территории обслуживания

$$N_{BTS} = \text{int}(N_a / N_{aBTS}).$$

6. Радиус соты, при условии, что нагрузка распределена по всей зоне равномерно

$$R = \sqrt{\frac{1,21 \cdot S_0}{\pi N_{BTS}}}.$$

7. Величина защитного расстояния между BTS с одинаковыми частотными каналами

$$D = R\sqrt{3C}.$$

8. Вероятность ошибки в процессе сеанса связи

$$P_{ош} = \frac{1}{(\sqrt{3C} - 1)^{2k}}.$$

9. Эффективность использования радиоспектра, определяемая числом активных абонентов, приходящихся на единицу полосы частот

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k C}.$$

В результате расчетов разработан начальный (номинальный) частотно-территориальный план и сформировано множество допустимых вариантов ССС.

Рассмотрен пример номинального планирования ССС, в котором были выбраны следующие показатели качества: вероятность ошибки, емкость сети, количество базовых станций в сети, эффективность использования радиочастотного спектра, вероятность блокировки, площадь покрытия. Для каждого варианта ССС были найдены оценки значений показателей качества, проведено их нормирование к максимальным значениям и приведение к сопоставимому виду. Нахождение подмножества Парето-оптимальных вариантов ССС выполнено в пространстве оценок введенных показателей качества.

Для реализации основных стадий выбора оптимальных вариантов ССС с применением методологии многокритериальной оптимизации был создан программный комплекс, интерфейс которого приведен на рис. 2. Данный программный комплекс выполняет формирование множества допустимых вариантов ССС с использованием морфологического подхода, выбор подмножества вариантов систем, оптимальных по критерию Парето, и сужение подмножества Парето до единственного варианта с введением условного критерия предпочтения.

7 OPT

Весовые коэффициенты относительной важности показателей качества:

0,167 0,167 0,167 0,167 0,167 0,167

Матрица оценок значений показателей качества:

Вар/показ	1 Na/So	2 Posh	3 Nk	4 An	5 NaBTS	6 NBTS	7 Ro	8 J	9 Na	10 So	11 Ba	12 Pb	13 Pt	14 dF
1	0,8611	0,0229	0,2	0,8231	0,8632	0,1411	0,6911	0,8589	0,5833	0,5	0,7222	0,7692	0,4	0,2
2	0,8958	0,0229	0,24	0,8189	0,8836	0,1657	0,6708	0,8343	0,5833	0,3333	0,6667	0,8462	0,4	0,25
3	0,9167	0,0229	0,34	0,8148	0,9105	0,2155	0,6773	0,7845	0,5833	0,1667	0,5556	0,9231	0,4	0,35
4	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
6	0,9537	0,0229	0,2	0,832	0,7836	0,0445	0,3262	0,9555	0,7917	0,25	0,8333	0,6154	0,3333	0,2
7	0,881	0,0229	0,34	0,837	0,9303	0,2763	0,7616	0,7237	0,5833	0,4167	0,5	0,5385	0,3333	0,35
8	0,8611	1	0,3	0,6028	0,8079	0,1007	0,6343	0,8238	0,5833	0,5	0,5556	0,4615	0,2667	0,3
9	0,9306	1	0,14	0,837	0,9368	0,305	0,7029	0,4662	0,5833	0	0,4444	0,5385	0,2667	0,15
10	0,6212	1	0,16	0,832	0,9461	0,3571	0,8824	0,375	0,5833	0,8167	0,3333	0,6154	0,2667	0,175
11	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
12	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
13	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
14	0,7917	0,0229	0,6	0,5527	0,7211	0,06909	0,6395	0,9309	0,5833	0,6667	0,6556	0,9231	0,4	0,6
15	0,75	0,0229	0,5	0,545	0,7553	0,09485	0,6923	0,9052	0,5	0,6667	0,6	1	0,3333	0,5
16	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
17	0,8333	1	0,3	0,5683	0,7961	0,1516	0,6559	0,7346	0,3333	0,3333	0,5444	0,7692	0,2	0,3
18	0,8056	1	0,2	0,8189	0,9224	0,3478	0,8032	0,3914	0,4167	0,5	0,5	0,8462	0,1333	0,2
19	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

Выбор двух параметров для построения графика

1 Открыть файл матрицы

100 F:\леша\mL.txt

Выполнить Парето-оптимизацию

Выполнить выбор единств. варианта

Безусловно худших систем: 29

Наилучший вариант системы №72

Построить график

Рис. 2. Интерфейс программного комплекса для выбора оптимальных вариантов ССС с учетом совокупности показателей качества

С помощью программного комплекса сформировано исходное множество из 100 вариантов ССС. Для каждого варианта найдены оценки значений указанных 6 показателей качества (отмеченных в окнах на интерфейсе соответствующим знаком ☒). В критериальном пространстве было выделено подмножество Парето-оптимальных вариантов, включающее 71 вариант ССС. При этом отброшено 29 безусловно худших по критерию Парето вариантов ССС (условно отмечены на интерфейсе знаком «8»). Из условия минимума условного критерия предпочтения в виде взвешенной суммы значений выбранных показателей качества из подмножества Парето выбран единственный вариант – 72. Этот вариант ССС характеризуют такие данные: количество абонентов в сети – 30 000; площадь обслуживаемой территории – 320 км²; активность абонентов – 0,025 Эрл; ширина полосы частот – 4 МГц; допустимая вероятность блокирования вызова – 0,01; процент времени ухудшения качества связи – 0,07; плотность обслуживания – 94 акт. абон./км²; размер кластера – 7; количество базовых станций в сети – 133; количество обслуживаемых одной БС абонентов – 226; эффективность использования радиочастотного спектра – $1,614 \cdot 10^{-4}$ акт. абон./Гц; телефонная нагрузка – 3,326 Эрл; вероятность ошибки – $5,277 \cdot 10^{-7}$.

В результате Парето-оптимизации получены также многомерные диаграммы обмена (МДО) показателей качества. Для иллюстрации некоторые МДО представлены на рис. 3. Каждая точка МДО определяет потенциально наилучшие значения каждого из показателей, которые могут быть достигнуты при фиксированных, но произвольных значениях других показателей качества.

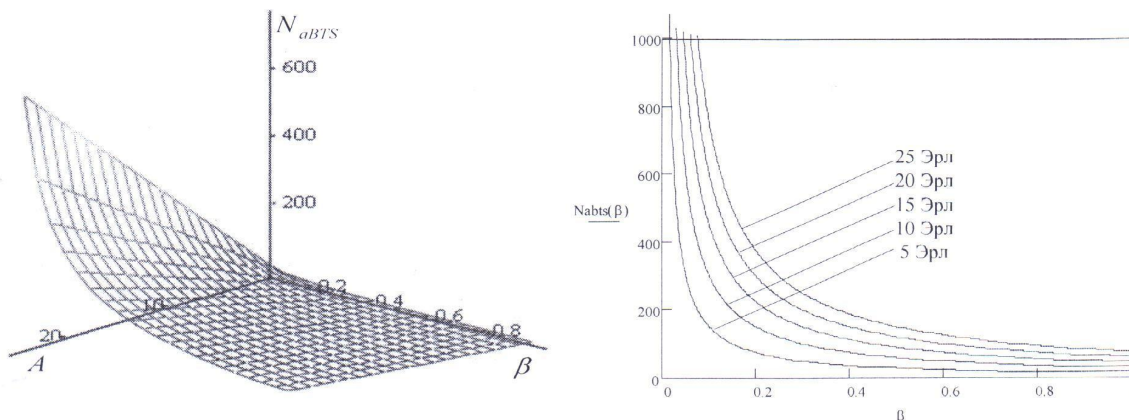


Рис. 3. Многомерные диаграммы обмена показателей качества (числа абонентов, обслуживаемых одной БС, нагрузки, активности абонентов) для ССС

Рассмотрены также особенности применения методологии многокритериальной оптимизации при планировании транспортной сети ССС с учетом совокупности показателей качества. При этом могут быть использованы показатели качества, учитывающие: длину радиорелейного пролета, общую длину сети, используемую и резервную пропускную способность; надежность пролета; скорость передачи; полосу частот; вероятность ошибочного приема бита (BER), стоимостные характеристики и др.

III. Оптимальная маршрутизация в мультисервисных сетях связи с учетом совокупности показателей качества

Мультисервисная сеть связи представляет собой сложную систему с множеством элементов, и для обеспечения высокого качества обслуживания различных типов трафика актуальной задачей является оптимальная маршрутизация с учетом совокупности показателей. Поэтому возникает необходимость применения методологии многокритериальной оптимизации при планировании маршрутизации в таких сетях связи [8].

Задача оптимальной маршрутизации с учетом совокупности показателей качества представляется моделью $\{X, F\} \rightarrow x^*$, где $X = \{x\}$ – множество допустимых решений; $F(\bullet)$ – целевая функция выбора; x^* – оптимальное решение задачи маршрутизации. Многокритериальный подход требует осуществить декомпозицию целевой функции $F(\bullet)$, то есть ее эквивалентное представление с помощью совокупности частных функций выбора $F_v(x)$, $v = 1, \dots, N$.

При этом может быть сформулирована следующая многокритериальная задача маршрутизации. Задано множество допустимых решений (маршрутов) на конечном графе сети $G = (V, E)$, где V – множество узлов, E – множество линий связи. Допустимое множество маршрутов – это те решения $x \in X$ в виде подграфов $x = (V_x, E_x)$ для графа $G = (V, E)$, которые удовлетворяют ограничениям $V_x \in V$, $E_x \in E$. Полагается, что на множестве X задана векторная целевая функция $\bar{F}(x) = (F_1(x), \dots, F_\nu(x), \dots, F_m(x))$, составляющие которой определяют значения соответствующих показателей качества маршрутов k_ν . Показатели качества маршрутов, как правило, связаны между собой и антагонистичны. Требуется найти оптимальные по совокупности показателей качества варианты маршрутов. Решением такой задачи является подмножество Парето-оптимальных вариантов решения задачи маршрутизации, которым соответствует согласованный оптимум частных целевых функций $F_1(x), \dots, F_\nu(x), \dots, F_m(x)$.

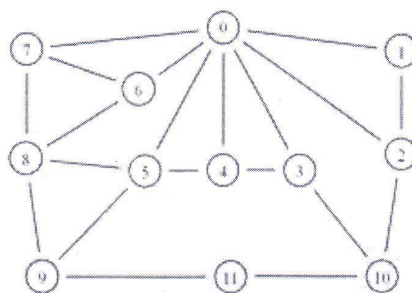
Рассмотрим особенности выбора оптимальных маршрутов с учетом совокупности показателей качества сети связи, представляемой графом $G = (V, E)$. Каждый маршрут, определяемый соответствующими комбинациями линий связи $E_x \in E$, характеризуется совокупностью показателей качества обслуживания k_ν , $\nu = \overline{1, m}$ и соответствующими им частными целевыми функциями $F_1(x), \dots, F_\nu(x), \dots, F_m(x)$.

Выбор оптимальных маршрутов с учетом совокупности показателей качества состоит в выделении подмножества Парето-оптимальных вариантов маршрутизации. Вариант маршрута $\tilde{x} \in X$ является Парето-оптимальным, если не существует другого маршрута $x^* \in X$, для которого выполняются неравенства $F_\nu(x^*) \leq F_\nu(\tilde{x})$, $\nu = \overline{1, m}$, причем, хотя бы одно из них является строгим. При сравнении маршрутов по этому векторному критерию предпочтения из множества допустимых вариантов исключаются безусловно худшие варианты маршрутов и остаются несравнимые – Парето-оптимальные варианты маршрутов.

В частности, для нахождения Парето-оптимальных вариантов маршрутизации использован весовой метод. Он сводится к нахождению экстремальных значений скалярной целевой функции маршрутов при различных допустимых комбинациях значений коэффициентов λ_i ($\lambda_i > 0$, $\sum_{i=1}^V \lambda_i = 1$):

$$\underset{\text{var}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_\nu)}{\text{extrem}} \left(F_p(x) = \sum_{\nu=1}^m \lambda_\nu F_\nu(x) \right).$$

Рассмотрены некоторые практические особенности решения многокритериальной задачи маршрутизации на примере фрагмента сети связи (рис. 4).



Информация передается из узла 0 во все остальные узлы. Введены следующие показатели качества линий связи: время задержки пакетов, уровень потерь пакетов, стоимость использования линии связи. Значения нормированных к максимальным значениям показатели качества линий связи приведены в табл. 1.

Линия связи	Время задержки передачи	Уровень потерь пакетов	Стоимость 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

Для иллюстрации на рис. 5 изображено некоторое множество вариантов маршрутов между узлами 0 и 8 в пространстве оценок показателей качества k_1 и k_2 . Подмножеству Парето-оптимальных альтернатив маршрутов, найденных весовым методом, соответствует левая нижняя граница, включающая три точки, обозначенные ($\blacktriangle$). Этому подмножеству соответствует согласованный по Парето оптимум по-

казателей качества, то есть минимально возможное значение одного показателя качества при изменении значений другого показателя качества.

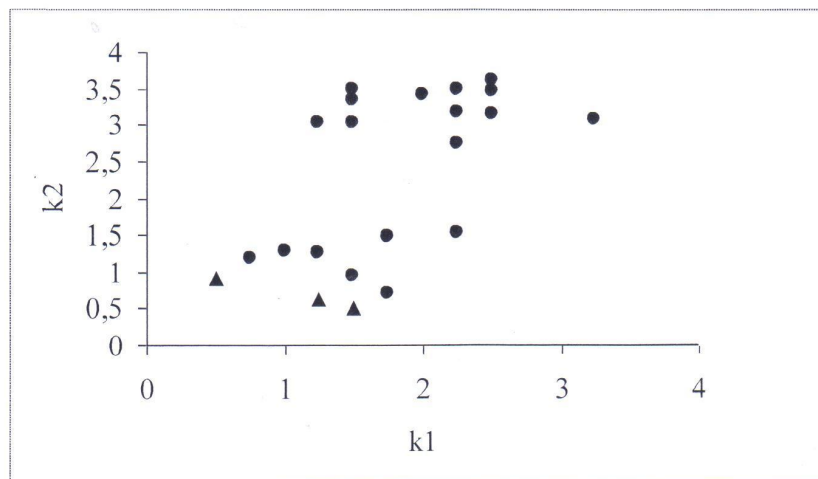


Рис. 5. Выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов маршрутов в критериальном пространстве

Найденные Парето-оптимальные варианты маршрутов эквивалентны с точки зрения безусловного критерия предпочтения – критерия Парето. Полученное подмножество Парето-оптимальных вариантов маршрутов может быть использовано для организации многопутевой маршрутизации, используемой, в частности, в технологии MPLS. Такой подход позволит реализовать выравнивание нагрузки и управление трафиком и обеспечить заданное качество обслуживания по совокупности показателей качества.

IV. Выбор оптимальных речевых кодеков с учетом совокупности показателей качества

Для проведения сравнительного анализа существующих речевых кодеков и выбора оптимального варианта использовались данные о 23 речевых кодеках, которые описаны совокупностью 5 показателей качества: скорость кодирования, оценка качества кодирования речи, сложность реализации, размер кадра, суммарная задержка [9]. Исходные значения показателей качества речевых кодеков приведены в табл. 2.

Нетрудно видеть, что показатели качества речевых кодеков связаны между собой и носят антагонистический характер.

Временная задержка возрастает с увеличением размера кадра, а также с увеличением сложности алгоритма кодирования. При передаче речи допустимая задержка в одном направлении не может быть больше 250 мс.

Размер кадра влияет на качество воспроизводимой речи: чем длиннее кадр, тем более эффективно кодируется речь. С другой стороны, при увеличении длины кадра возрастает задержка на обработку передаваемой информации. Размер кадра кодера определяется компромиссом между этими требованиями.