DOI 10.37882/2223–2966.2022.12–2.12

МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ[1]

Гаипов Константин Эдуардович
Ведущий научный сотрудник научной лаборатории Спутниковые телекоммуникационные системы, кандидат тех. наук, Сибирский государственный университет науки и технологии им. академика М.Ф. Решетнева

Крикунов Илья Леонидович
Младший научный сотрудник научной лаборатории Спутниковые телекоммуникационные системы, Сибирский государственный университет науки и технологии им. академика М.Ф. Решетнева

Демичева Алена Алексеевна
Младший научный сотрудник научной лаборатории Спутниковые телекоммуникационные системы, Сибирский государственный университет науки и технологии им. академика М.Ф. Решетнева
gaipovke@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается решение задачи двухкритериальной оптимизации распределение информационных потоков, в качестве критериев оптимальности выступают минимум суммарного времени нахождения заявок в буфере телекоммуникационного устройства и минимум суммарных потерь в результате переполнения буфера. Оба критерия оптимальности находятся во взаимном исключении, так как увеличение одного приводит к уменьшению другого. Решение данной задачи показано на примере сети с двумя возможными маршрутами с использованием инструментов среды математического моделирования MatLab. Математическое моделирование проводилось двумя методами: первый вариант с использованием генетического алгоритма и двумя параметрами оптимизации, второй вариант подразумевает использование метода линейной свёртки оптимизируемых функций и использование традиционных градиентных алгоритмов поиска экстремального значения целевой функции.

Ключевые слова: Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, алгоритм линейной свертки, фронт Парето.

A MODEL OF MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF THE DISTRIBUTION OF INFORMATION FLOWS IN TELECOMMUNICATION NETWORKS

K. Gaipov
I. Krikunov
A. Demicheva

Summary. In this article, the solution of the problem of two-criteria optimization of the distribution of information flows is considered, the minimum of the total time spent by applications in the buffer of a telecommunications device and the minimum of total losses as a result of buffer overflow act as optimality criteria. Both optimality criteria are mutually exclusive, since an increase in one leads to a decrease in the other. The solution of this problem is shown by the example of a network with two possible routes using the tools of the MatLab mathematical modeling environment. Mathematical modeling was carried out by two methods: the first option using a genetic algorithm and two optimization parameters, the second option involves the use of the method of linear convolution of optimized functions and the use of traditional gradient algorithms for finding the extreme value of the objective function.

Keywords: multiobjective optimization, genetic algorithm, linear convolution algorithm, Pareto front.

[1] Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева

Введение

В современном мире все больше распространяются задачи, когда становится невозможно ограничиться использованием единственного критерия, т.к. особой ценностью обладают сразу несколько качественных факторов. Именно благодаря такому изобилию задач с несколькими критериями, теория многокритериальной оптимизации увеличивает свою значимость.

Исходя из этих данных, можно сформулировать определение многокритериальной оптимизации или МКО. Многокритериальная оптимизация — это одновременная оптимизация минимум двух (и более) конфликтующих между собой целевых функций в заданной области определения. При этом существует ряд конкурирующих свойств, таких как: цена-качество, задержки-потери и многие другие [1].

При этом осуществление данного процесса невозможно без лица, которое принимает конечное решение, им может являться человек или целый коллектив. Данного человека называют лицом, принимающим решение (ЛПР). Ответственность за выбор того или иного решения и его последствия несет ЛПР.

Допустимым или оптимальным является такое решение, которое больше остальных соответствует желаниям, целям или интересам лица, принимающего решение. Как правило, цель ЛПР часто получается выразить в максимизации или минимизации целевой функции, заданной на множестве допустимых решений (множество X). Как итог, оптимальным называется $K(X)$ — множество наилучших решений, принадлежащее множеству допустимых решений.

Тогда следует рассмотреть случай, когда перед оператором связи ставится следующая задача: от источника информации S необходимо обеспечить передачу некоторого объема данных V до приемника R. В качестве критериев оптимальности будут использоваться время задержки пакетов данных и потеря информации на маршрутизаторах. Будем считать, что функциональные зависимости среднего времени задержки и вероятности потерь являются известными. В данном случае, функциональная зависимость будет определяться статистическими характеристиками потока, проходящего через телекоммуникационное устройство, к которому подключен канал связи, размеру буфера данного устройства, а также скоростью передачи данных по каналам связи.

Для получения математической модели распределения трафика по сети, сеть удобнее всего изобразить в виде направленного графа. Каждое направленное ребро графа будет соответствовать направлению потока данных, узлы графа будут соответствовать моделям телекоммуникационных устройств. На рисунке 1 продемонстрирована модель сети, состоящей из двух узлов коммутации ($R1$ и $R2$) и пары источник-приемник (S и R).

Маршрутизаторы $R1$ и $R2$ имеют одинаковую пропускную способность C, равную 20 единицам, однако длина буфера m у маршрутизатора $R2$ в разы больше, чем у $R1$. Благодаря этому значение задержек и потерь на маршрутизаторах будет существенно отличаться, что позволит создать множество различных допустимых решений X.

Решение задачи

Задачи многокритериальной оптимизации имеют множество чрезвычайно различных способов решения. Существует несколько способов классификации этих методов [2, 3]. Во-первых, можно использовать методы сведения многих критериев к единственному, т.е. введением неких весовых коэффициентов для каждого из критериев таким образом, что более важный критерий получает более высокий вес (метод линейной свертки, метод идеальной точки и др. [4–7]). Во-вторых, можно решать задачи МКО с помощью одного признанного наиболее важным критерия, остальные же критерии при этом играют роль дополнительных ограничений. И, наконец, использовать упорядочение заданного множества критериев и последовательная оптимизация по каждому из них (метод последовательных уступок [8]).

Так же стоит упомянуть, что критерии оптимальности могут быть нескольких видов:

- нейтральные;
- находящиеся в согласовании друг с другом;
- конкурирующие между собой.

Для первого и второго типа критериев оптимизация системы может быть выполнена отдельно по каждому отдельному показателю. Для критерия третьего вида достижение потенциально возможного значения каждого показателя в отдельности может быть невыполнимо. При этом может быть достигнут лишь согласованный оптимум противоречивых между собой целевых функций (оптимум по критерию Парето [9]). Такой оптимум означает, что достигается потенциально возможное значение каждого показателя качества в отдельности без ухудшения других показателей качества всей системы. При этом дальнейшее усиление одного из параметров может быть достигнуто только за счёт ухудшения других критериев качества [10]. Потери пакетов в сети

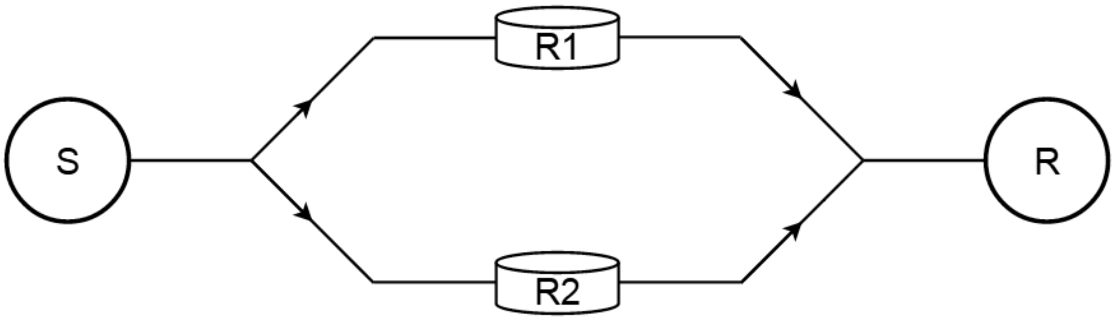

Рис. 1. Структура сети

```
A = [];
B = [];
Aeq = [1 1];
Beq = 30;
lb = [0; 0];
ub = [];
c = [];
ceq = [];
```

Рис. 2. Система ограничений для представленной топологии

и время задержки пакетов, используемые в работе в качестве параметров оптимизации, являются наглядным примером критериев, конкурирующих друг с другом.

В данной работе будут рассмотрены решения поставленной задачи с помощью программы MatLab R2015b с подключённым пакетом дополнений «Optimization Toolbox». В первом случае воспользуемся численным методом решения задач МКО, использующим функцию *gamultiobj*, в основе которой задействован контролируемый элитарный генетический алгоритм (вариант NSGA-II [11]). Во втором случае будет произведена линейная свертка критериев по методу, описанному в [7, с. 75–76] и дальнейшее решение задачи однокритериальной (одномерной) оптимизации с помощью функции *fmincon*. Результатом выполнения для каждого способа должно быть получено множество $K(X)$ — фронт Парето.

Решение данной задачи необходимо начать с задания ограничений: от источника S до получателя R должно быть передано 30 единиц информации и трафик, проходящий через каждый канал, должен быть неотрицательным (т.е. трафик должен равняться положительному значению или отсутствовать в канале). Для создания такой системы ограничений воспользуемся алгоритмом, основанным на методе Галлагера [12]. Его особенностью выступает то, что в качестве независимых переменных выступают беспетельные маршруты — набор каналов, соединяющих источник с получателем трафика, без повторения уже задействованных ранее каналов связи. Метод поиска всех беспетельных маршрутов на графе описан в [13].

Тогда в данной задаче в качестве переменных x_1 и x_2 будут использоваться значения трафика, передаваемого по маршрутам, включающим маршрутизаторы $R1$ и $R2$ соответственно. После этого, система ограничений примет следующий вид:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \\ x_1 + x_2 = 30; \end{cases}$$

Далее приведем данную систему к тому виду, которая будет пригодна для функций *gamultiobj* и *fmincon*. Для этого требуется подставить наши ограничения в следующую модель:

```
function f = myfunobj(x)
m1 = 3;
m2 = 20;
C = 20;
if x(1) == 0
 f(2) = ((((x(2)/C)^2)*(1-((x(2)/C)^m2)*(m2+1-m2*(x(2)/C)))/((1-(x(2)/C))*(1-((x(2)/C)^(m2+2)))))/x(2));
else
 if x(2) == 0
 f(2) = ((((x(1)/C)^2)*(1-((x(1)/C)^m1)*(m1+1-m1*(x(1)/C)))/((1-(x(1)/C))*(1-((x(1)/C)^(m2+2)))))/x(1));
 else
 f(2) = ((((x(1)/C)^2)*(1-((x(1)/C)^m1)*(m1+1-m1*(x(1)/C)))/((1-(x(1)/C))*(1-((x(1)/C)^(m2+2)))))/x(1)) + ...
 ((((x(2)/C)^2)*(1-((x(2)/C)^m2)*(m2+1-m2*(x(2)/C)))/((1-(x(2)/C))*(1-((x(2)/C)^(m2+2)))))/x(2));
 end
end
f(1) = (x(1)*(1-x(1)/C)*((x(1)/C)^m1)/(1-(x(1)/C)^(m1+1))) + (x(2)*(1-x(2)/C)*((x(2)/C)^m2)/(1-(x(2)/C)^(m2+1)));
end
```

(а)

```
function f = myfun(x)
Alpha = 1;
Beta = 1-Alpha;
m1 = 3;
m2 = 20;
C = 20;
if x(1) == 0
 f(1) = ((((x(2)/C)^2)*(1-((x(2)/C)^m2)*(m2+1-m2*(x(2)/C)))/((1-(x(2)/C))*(1-((x(2)/C)^(m2+2)))))/x(2));
else
 if x(2) == 0
 f(1) = ((((x(1)/C)^2)*(1-((x(1)/C)^m1)*(m1+1-m1*(x(1)/C)))/((1-(x(1)/C))*(1-((x(1)/C)^(m2+2)))))/x(1));
 else
 f(1) = ((((x(1)/C)^2)*(1-((x(1)/C)^m1)*(m1+1-m1*(x(1)/C)))/((1-(x(1)/C))*(1-((x(1)/C)^(m2+2)))))/x(1)) + ...
 ((((x(2)/C)^2)*(1-((x(2)/C)^m2)*(m2+1-m2*(x(2)/C)))/((1-(x(2)/C))*(1-((x(2)/C)^(m2+2)))))/x(2));
 end
end
f(2) = (x(1)*(1-x(1)/C)*((x(1)/C)^m1)/(1-(x(1)/C)^(m1+1))) + (x(2)*(1-x(2)/C)*((x(2)/C)^m2)/(1-(x(2)/C)^(m2+1)));
f = Alpha*f(1) + Beta*f(2);
end
```

(б)

Рис. 3. Подфункции критериев оптимальности для задачи МКО (а) и задачи оптимизации с помощью линейной свертки (б)

Таблица 1. Множество $K(X)$ и значение критериев оптимальности

№ решения	x_1	x_2	$f_{пот.пак.}(x_1, x_2)$	$f_{вр.зад.}(x_1, x_2)$
1	11,41994	18,57906	1,40455	0,403718
2	12,75212	17,24704	1,563612	0,30767
3	12,96593	17,03433	1,614644	0,294307
4	13,75319	16,24595	1,847486	0,250524
5	14,45155	15,54766	2,102013	0,21915
6	16,21436	13,78537	2,881677	0,164711
7	18,24549	11,75429	3,953767	0,129101
8	19,36015	10,63955	4,606612	0,116139
9	22,89733	7,102288	6,932692	0,089474
10	24,22552	5,774165	7,891457	0,082577
11	25,66694	4,333979	8,976024	0,076176
12	26,31041	3,689394	9,47359	0,073592
13	27,11298	2,886868	10,10483	0,070575
14	29,21737	0,783625	11,8105	0,063513
15	30,00000	0,00001	12,46154	0,061137

$$\begin{cases} A \cdot x \le B \\ A_{eq} \cdot x = B_{eq} \\ c(x) \le 0 \\ c_{eq}(x) = 0 \\ lb \le x \le ub \end{cases}$$

С помощью матриц A, A_{eq} и векторов B, B_{eq} задаются линейные равенства и неравенства. Набор нижних и верхних границ для вектора переменных x задают lb и ub. Нелинейные ограничения задаются функциями $c(x)$ и $c_{eq}(x)$, которые возвращают векторные значения. В поставленных условиях, с помощью A_{eq} и B_{eq} мы зададим условия требуемого объема передаваемых данных V, а неотрицательное значение трафика, передаваемого по каналам, обеспечим с помощью нижней границы lb. Так же это можно было бы сделать в виде линейного неравенства $A \cdot x \le B$, но использование нижней границы эффективнее и удобнее для решения, т.к. задействует меньший объем памяти. В итоге, система ограничений для решения поставленной задачи в среде MatLab представлена на рисунке 2.

В качестве целевых функций будут использоваться формулы временных задержек и потерь пакетов для системы массового обслуживания M/M/1/N, представленные в [14].

$$f_{\text{вр.зад.}} = \frac{L_{\text{очереди}}}{X} = \frac{Ro^2 \cdot \left(1 - Ro^m \cdot (m + 1 - m \cdot Ro)\right)}{(1 - Ro) \cdot (1 - Ro^{m+2}) \cdot X}$$

$$f_{\text{пот.пак.}} = P_{\text{пот.пак.}} \cdot X = \frac{(1 - Ro) \cdot Ro^m}{1 - Ro^{m+1}} \cdot X$$

где m — размер буфера на телекоммуникационном устройстве;

Ro — отношение интенсивности поступающего трафика к интенсивности обработки трафика ($Ro_i = X_i / C_i$).

Теперь, исходя из представленных выше формул, составляются две подфункции для расчета требуемых критериев оптимальности. В первом случае две функции являются отдельными элементами и рассчитываются отдельно. Для второго метода будет составлена одна целевая функция — сумма функции временных задержек $f_{вр.зад.}$ и функции потери пакетов $f_{пот.пак.}$ с некоторыми весовыми коэффициентами α и β соответственно. Это даст возможность регулировать значения данных коэффициентов и, следовательно, увеличить количество решений для построения фронта Парето. Следует отметить, что функция временных задержек не определена при $x_i = 0$. В таком случае, будем считать, что значение задержек при нулевом трафике по каналу связи так же равны нулю. Результат реализации подфункции для задачи МКО представлен на рисунке 3(а), а для задачи с использованием линейной свертки на рисунке 3(б).

Заключительным этапом работы выделим поиск решения и обработка результатов. При решении задачи с помощью функции *gamultiobj* воспользуемся следующими настройками: общее количество поколений устанавливаем равным 200, селекция производится по методу турнирного выбора из двух представителей, доля воспроизводства в следующем поколении устанавливается равной 80%, а доля мутации методом

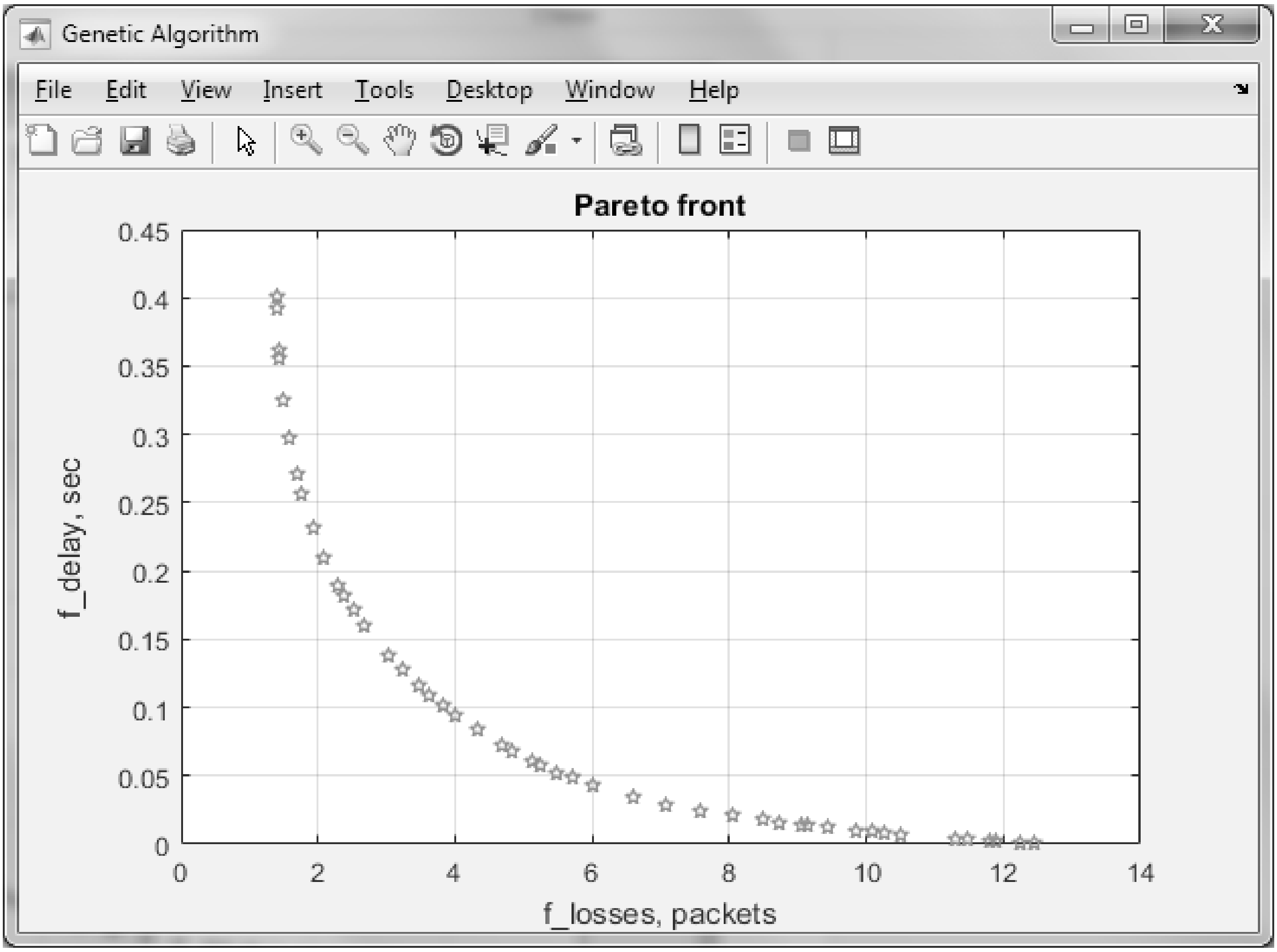

Рис. 4. Фронт Парето для задачи МКО

адаптивной случайной генерации составляет 20% (погрешность вычисления нового поколения установлена по умолчанию равной 0,001). Значения переменных x_1 и x_2, а также функций $f_{вр.зад.}$ и $f_{пот.пак.}$ выведены в таблицу 1.

Воспользовавшись встроенной функцией *gaplotpareto* можно отобразить фронт Парето для полученных ранее результатов. В качестве оси абсцисс на графике воспользуемся функцией потерь пакетов, а в качестве оси ординат — функцию временных задержек. Тогда на рисунке 4 можно увидеть фронт Парето для задачи МКО, полученный с помощью генетического алгоритма.

Для решения задачи с помощью метода линейной свертки, воспользуемся встроенной функцией *fmincon*. Эта функция позволяет определять минимальные значения в задачах с ограничениями. В этом примере параметры $f_{пот.пак.}$ и $f_{вр.зад.}$ подобраны таким образом, чтобы свести конкурирующие между собой критерии оптимальности к «условному» минимуму. И хотя функция *fmincon* непригодна для решения задач МКО, но она подходит для решения задач однокритериальной оптимизации. В качестве стандартных настроек были выбраны следующие пункты: в качестве алгоритма для решения выбран *active set algorithm*, т.к. он хорошо работает в маломасштабных и среднемасштабных задачах; количество итераций установлено равным 400, точность приращения значения аргументов и самой целевой функции равно 1e^{-6}. Результаты работы алгоритма для различных параметров α и β представлены в таблице 2.

Так же, как и для задачи МКО, построим фронт Парето для оптимизации задачи линейной свёртки. На рисунке 5 можно увидеть фронт Парето для задачи однокритериальной оптимизации. На этом графике отчетливо видно, что оба решения идентичны, но в отличии от автоматически сгенерированного решения численным методом, метод линейной свертки имеет меньшее количество точек на графике. Это связано

Таблица 2. Результаты решения для задачи одномерной оптимизации

№ решения	x_1	x_2	α	β	$f_{пот.пак.}(x_1, x_2)$	$f_{вр.зад.}(x_1, x_2)$
1	11,4210	18,5790	0	1	1,4048	0,4012
2	11,5204	18,4796	0,2	0,8	1,4058	0,3934
3	11,6878	18,3122	0,4	0,6	1,4118	0,3803
4	11,8224	18,1776	0,5	0,5	1,4205	0,3699
5	12,0243	17,9757	0,6	0,4	1,4396	0,3546
6	12,3562	17,6438	0,7	0,3	1,4861	0,3303
7	12,9827	17,0173	0,8	0,2	1,6189	0,2880
8	14,4920	15,5080	0,9	0,1	2,1179	0,2076
9	16,7105	13,2895	0,95	0,05	3,1284	0,1322
10	17,7146	12,2854	0,96	0,04	3,6582	0,1075
11	19,0986	10,9014	0,97	0,03	4,4496	0,0790
12	20,7462	9,2538	0,98	0,02	5,4749	0,0529
13	23,2399	6,7601	0,99	0,01	7,1760	0,0282
14	26,4545	3,5455	0,995	0,005	9,5860	0,0112
15	30,0000	0,0000	1	0	12,4615	0,0001

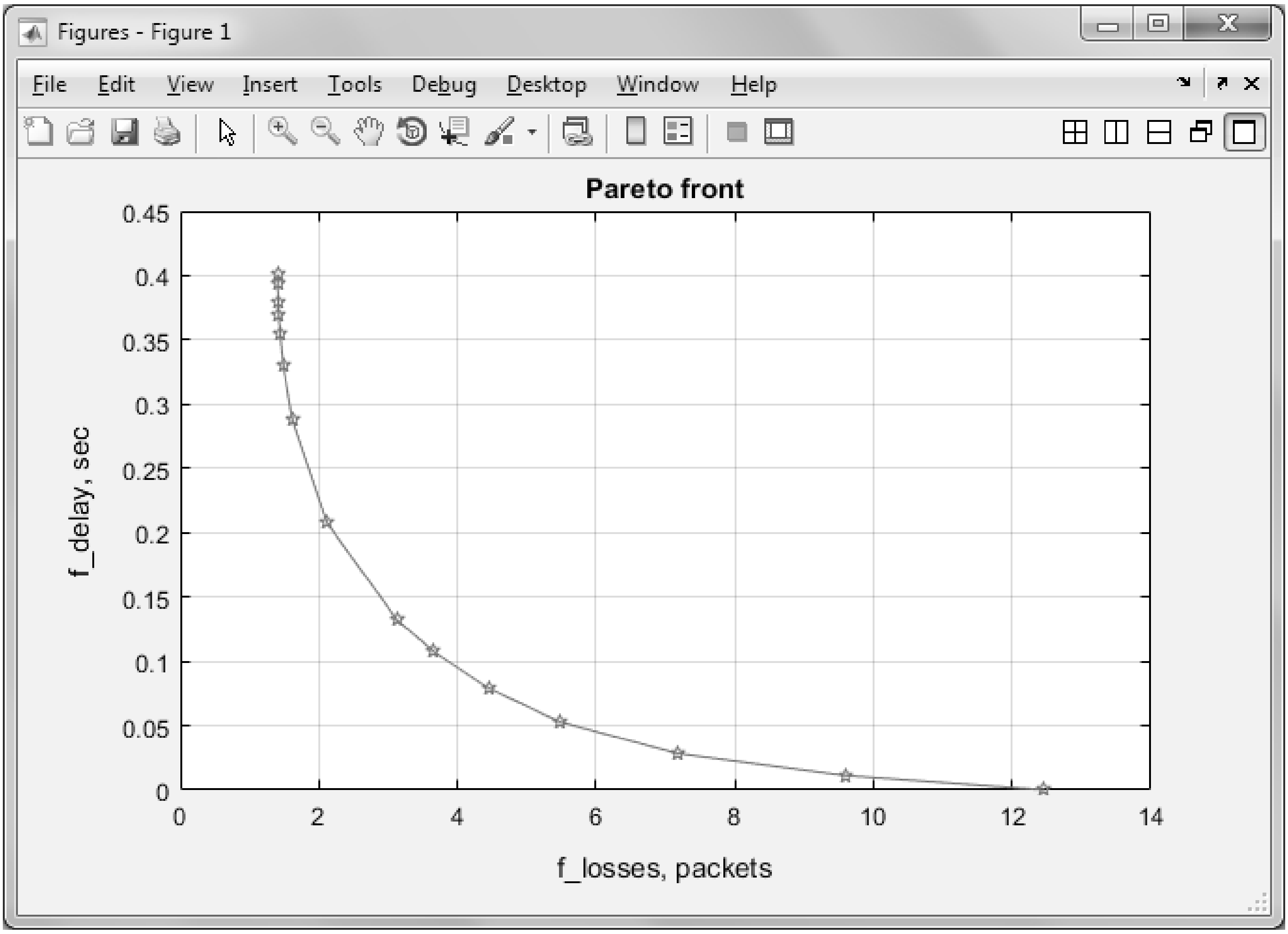

Рис. 5. Фронт Парето для задачи линейной свёртки

с вариативностью выбора параметров α и β, и может быть изменено ЛПР.

Выводы

Полученные результаты показывают, что поставленная задача решается неоднозначно и необходимы дополнительные критерии, на основании которых можно выбрать подходящее решения, зависящие от типа передаваемой информации. Для таких целей можно использовать рекомендации международного союза электросвязи Y1540 и Y1541 [15], где приведены нормы для различного типа трафика.

Использование предложенных методик расчёта может быть использовано в программах по автоматизированному проектированию телекоммуникационных сетей совместно с алгоритмами формирования математических моделей оптимального распределения трафика [16, 17].

Использование двух подходов к решению многокритериальных задач позволят их применять к математическим моделям распределения трафика и параметрического синтеза, где оптимизируемые переменные могут принимать, как непрерывные значения, так и дискретные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова Полина Александровна, Сахаров Дмитрий Михайлович, Васильева Татьяна Владимировна. «Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решения» Инновационные аспекты развития науки и техники, № 6, 2021, с. 153–157.
2. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие. М.: МАКС Пресс, 2008. 197 с.
3. Растригин Л.А., Эйдук Я.Ю. Адаптивные методы многокритериальной оптимизации // Автоматика и телемеханика. 1985. № 1. С. 5–26.
4. J. Figueira, S. Greco, M. Ehrgott (eds.). Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, Springer, 2004, 1085 p.
5. А.Б. Петровский. Теория принятия решений, Академия, М., 2009, 400 с.
6. В.Д. Ногин. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход, Физматлит, М., 2005, 176 с.
7. В.Д. Ногин. «Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации», Искусственный интеллект и принятие решений, 2014, № 4, с. 73–82.
8. Горбунов В.М. Теория принятия решений: учебное пособие. Томск: Изд-во Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010, 67 с.
9. Карпенко А.П., Семенихин А.С., Митина Е.В. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 4. Режим доступа: http://www.technomag.edu.ru/doc/363023.html (дата обращения 08.07.2012).
10. Чеботарёва Дарья Васильевна, Безрук Валерий Михайлович. «Автоматизация многокритериального выбора оптимального решения при планировании сетей мобильной связи» Радиоэлектроника и информатика, № 1 (64), 2014, с. 20–24.
11. Deb, Kalyanmoy. «Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms», John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2001.
12. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989.
13. Демичев М.С., Гаипов К.Э.— Алгоритм поиска беспетельных маршрутов // Программные системы и вычислительные методы.— 2020.— № 4.— С. 10–25. DOI: 10.7256/2454–0714.2020.4.33605
14. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных систем. М.: Техносфера. 2003. 512 с.
15. Владимиров, С.А. Реализация методики оценки операторских сетей на соответствие рекомендациям ITU-T Y.1540, Y.1541 / С.А. Владимиров, И.С. Алексеев, А.С. Воронов // Информационные технологии и телекоммуникации.— 2018.— Т. 6.— № 3.— С. 52–63.
16. Свидетельство № 2022684654. Оптимальное распределение трафика сети массового обслуживания на основе контурного метода по критерию минимума потерь: программа для ЭВМ / К.Э. Гаипов, И.Л. Крикунов, А.А. Демичева (RU); правообладатель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». № 2022683987; заявл. 08.12.2022; опубл. 15.12.2022. 26,626 КБ
17. Свидетельство № 2022684788. Оптимальное распределение трафика сети массового обслуживания на основе узлового метода по критерию минимума потерь: программа для ЭВМ / К.Э. Гаипов, И.Л. Крикунов, А.А. Демичева (RU); правообладатель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». № 2022684267; заявл. 08.12.2022; опубл. 16.12.2022. 22,928 КБ

Крикунов Илья Леонидович, Демичева Алена Алексеевна (gaipovke@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»