



Серия «Математика»
2013. Т. 6, № 1. С. 35–44
Онлайн-доступ к журналу:
<http://isu.ru/izvestia>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

УДК 519.854, 004.8, 004.023

Алгоритмы искусственной иммунной системы для вариантной задачи размещения телекоммуникационных центров *

А. А. Колоколов

Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН

Т. В. Леванова

Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН

Ю. С. Поздняков

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Аннотация. В статье рассматривается вариантная задача оптимального размещения центров телекоммуникаций, которая представляет собой обобщение известной задачи о доминирующем множестве в графе. Строится математическая модель целочисленного линейного программирования. Предлагается алгоритм искусственной иммунной системы и его реализации, приводятся результаты экспериментального исследования на сериях тестовых задач.

Ключевые слова: дискретная оптимизация; целочисленное программирование; вариантная задача размещения; алгоритм искусственной иммунной системы; центр телекоммуникаций.

Введение

Применение телекоммуникационных технологий имеет большое значение для развития отдельных районов и всей страны в целом. Их внедрение положительно сказывается на социальной, экономической, политической и других сферах деятельности. Задаче размещения телекоммуникационных центров посвящен ряд публикаций. В работе [14] она изучается как обобщение задачи о доминирующем множестве в графе, приводится соответствующая математическая модель. В [4] исследуется двухкритериальная модификация задачи, строятся алгоритмы

* Работа поддержана грантом РФФИ № 13-01-00862.

поиска точных и приближенных решений. В [1] предлагается алгоритм искусственной иммунной системы для вариантной задачи размещения центров телекоммуникаций.

Рассматриваемая задача является достаточно сложной как с теоретической, так и с практической точек зрения. Применение пакетов прикладных программ для решения подобных проблем не всегда бывает обосновано, так как получение оптимального решения может потребовать значительных временных затрат. В связи с этим в последние годы активно развиваются методы приближенного решения. Особое место среди них занимают так называемые метаэвристики, основанные на аналогиях с процессами и явлениями, протекающими в природе [12]. Наиболее известны из них генетические алгоритмы, эволюционные, муравьиной колонии, имитации отжига (см., например, [3, 6, 8]).

Иммунная система человека — это целый комплекс органов и тканей, которые обеспечивают его защиту от заболеваний. Система иммунитета вызывает большой интерес исследователей своими механизмами памяти, поиска, распознавания, адаптации и др. В настоящее время множество методов, основанных на принципах иммунологии, расширяется. Активно развиваются алгоритмы искусственной иммунной системы, известно их использование для задач дискретной оптимизации, в частности, задачи календарного планирования [11] и задачи коммивояжера [13].

Цель данной работы — развитие подхода, основанного на применении иммунных алгоритмов для решения сложных комбинаторных проблем. Продолжены исследования, начатые в [1] для задачи оптимального размещения телекоммуникационных центров, построена и реализована модификация иммунного алгоритма, созданы и апробированы серии тестовых примеров. Получены результаты вычислительного эксперимента, свидетельствующие о конкурентоспособности предложенных алгоритмов.

1. Вариантная задача размещения телекоммуникационных центров

Изучается вариантная задача размещения телекоммуникационных центров (телецентров) в следующей постановке. Имеется множество населенных пунктов некоторого региона, в котором требуется определить пункты размещения центров телекоммуникаций и выбрать подходящее для них оборудование. При этом рассматриваются транслирующие станции нескольких типов, отличающиеся стоимостью и дальностью распространения сигнала. Необходимо найти размещение телецентров такое, чтобы во всех населенных пунктах имела возможность по-

лучения телевизионного сигнала и суммарная стоимость выбранных станций была минимальной.

Для построения модели целочисленного линейного программирования (ЦЛП) введем следующие обозначения:

$J = \{1, \dots, n\}$ — список обслуживаемых населенных пунктов;

d_{ij} — расстояние между пунктами $i, j \in J$;

$R = \{1, \dots, k\}$ — список типов станций;

c_r — стоимость станции типа r , $r \in R$;

b_r — дальность распространения сигнала станции типа r , $r \in R$.

Переменные модели:

$$z_i^r = \begin{cases} 1, & \text{если в пункте } i \text{ размещен телецентр со станцией} \\ & \text{типа } r, \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если в пункте } j \text{ имеется прием сигнала станции,} \\ & \text{установленной в пункте } i, \\ 0 & \text{— иначе,} \end{cases}$$

$i, j \in J, r \in R.$

Модель ЦЛП имеет вид:

$$\sum_{r \in R} c_r \sum_{i \in J} z_i^r \rightarrow \min \quad (1.1)$$

при условиях

$$d_{ij} y_{ij} \leq \sum_{r \in R} b_r z_i^r, i, j \in J, \quad (1.2)$$

$$\sum_{i \in J} y_{ij} \geq 1, j \in J, \quad (1.3)$$

$$\sum_{r \in R} z_i^r \leq 1, i \in J, \quad (1.4)$$

$$y_{ij}, z_i^r \in \{0, 1\}, i, j \in J, r \in R.$$

С помощью целевой функции (1.1) определяется суммарная стоимость выбранных станций. Согласно (1.2) в пункте j имеется возможность приема сигнала станции типа r , размещенной в пункте i , если расстояние d_{ij} не превышает дальности b_r распространения сигнала. Условие (1.3) гарантирует, что каждый населенный пункт будет обслужен. Неравенство (1.4) означает, что в каждом телецентре может быть установлено не более одной станции.

Данная задача является обобщением NP-трудной задачи поиска оптимального доминирующего множества в графе [2] и может иметь до-

статочной большой размерности. Решение таких задач приводит к существенным затратам временных и вычислительных ресурсов, поэтому возникает необходимость использования алгоритмов приближенного решения. Нами был предложен один из таких алгоритмов, работающий по аналогии с иммунной системой [7].

2. Иммунная система

Биологическая иммунная система представляет собой сложную структуру, в которой используется множество механизмов для защиты организма от вирусов, бактерий и других чужеродных тел, называемых *антигенами*. Иммунная система борется с антигенами различным образом, в том числе с помощью *иммунных клеток*. Эти клетки продуцируют *антитела*, связывающие и нейтрализующие антигены. Связывание — это химическое взаимодействие между антителом и антигеном. *Прочность связывания* является основной характеристикой иммунных клеток; чем прочнее связь, тем лучше иммунная система сопротивляется чужеродным телам.

Иммунная система реагирует на проникновение антигена в организм, стимулируя клонирование большого количества иммунных клеток и выработку антител. Во время клонирования происходят мутации, приводящие к случайному изменению клеток и увеличению прочности связывания [10]. Особая группа иммунных клеток выполняет регулируемую роль, ограничивая их общую численность и запрещая неблагоприятные мутации. Таким образом, иммунную систему можно представить в виде саморегулируемой сети [16]. Подробно об этой системе написано в ряде работ, например, в [9].

По аналогии с процессами, происходящими в биологической иммунной системе, разработаны алгоритмы отрицательного отбора, клонирования, иммунной сети и др. [5, 15]. Схема алгоритма иммунной сети использована нами при разработке алгоритма поиска приближенных решений вариантной задачи размещения центров телекоммуникаций.

3. Алгоритм иммунной сети

Чтобы построить алгоритм искусственной иммунной системы, необходимо указать, что мы будем понимать под иммунными клетками, антителами, антигенами, определить одну или несколько функций, характеризующих прочность связывания, выбрать схему алгоритма. Для рассматриваемой задачи размещения нами предложен алгоритм (см. ниже Алгоритм 1), имитирующий процесс клонирования клеток им-

мунной системы при обнаружении чужеродного тела, а также саморегуляцию иммунной сети [15].

Алгоритм 1. Схема алгоритма иммунной сети.

1. Инициализация: создание начальной сети иммунных клеток.
2. Связывание антигена: взаимодействие иммунных клеток с антигеном.
3. Сетевое взаимодействие: определение связей между иммунными клетками.
4. Стимуляция: вычисление количества клонов и размера мутации.
5. Сетевая динамика: клонирование и мутация иммунных клеток, обновление сети клеток.
6. Цикл: переход на шаг 2, пока не будет выполнено условие остановки.

Каждой клетке иммунной системы ставится в соответствие целочисленный вектор (z_i) . Положим $z_i = r$, если в пункте i следует установить станцию типа r , и $z_i = 0$, если в пункте не будет размещен телецентр. Зная вектор (z_i) , нетрудно найти матрицу (y_{ij}) прикрепления населенных пунктов к телецентрам. Поэтому вектор (z_i) будем называть решением задачи. Здесь везде $i, j \in J$.

Первый шаг алгоритма соответствует процессу, когда чужеродные тела обнаружены, начинается формирование популяции иммунных клеток. Алгоритм создает начальное множество решений. Расположение центров телекоммуникаций и их тип выбираются случайным образом.

Второй шаг отвечает связыванию антигена антителами, вычисляется прочность связывания. В терминах алгоритма эта величина выражена целевой функцией задачи (1.1).

На третьем шаге определяются связи в иммунной системе, и ограничивается общая численность клеток. Решения отбираются в две группы: «лучшие» и «худшие» по значению целевой функции, остальные исключаются. В алгоритме все решения связаны, их связь характеризуется расстоянием между решениями в метрике Хемминга.

На четвертом шаге определяются число клонов и размер мутации клеток. Вычисляется количество копий «лучших» решений, которое линейно зависит от расстояния между копируемым решением и группой «худших». Выбирается параметр изменения векторов.

На пятом шаге популяция клеток пополняется новыми клонами с различными мутациями. В разработанном алгоритме создаются копии решений и модифицируются соответствующие вектора. При этом случайным образом изменяются значения компонент, затем используется

алгоритм локального поиска для уменьшения значения целевой функции. После того, как все копии модифицированы, лучший и худший по значению целевой функции вектора добавляются к текущему множеству решений.

4. Результаты экспериментального исследования

Нами реализовано два алгоритма искусственной иммунной системы, обозначим их $IA1$ и $IA2$. Первый включает все шаги описанной выше схемы Алгоритма 1, во втором отсутствует сетевое взаимодействие, решения не исключаются из популяции. Эти программы имеют следующие входные параметры:

s — *число начальных решений*. В обоих алгоритмах на этапе инициализации создается не более s различных решений.

α — *параметр отбора решений*. Задаёт границу отбора решений в «лучшую» и «худшую» группы. В алгоритме $IA1$ в «лучшую» группу входят вектора, для которых значение целевой функции удовлетворяет условию $f_{min} \leq f(z) \leq f_{min} + \alpha \cdot (f_{max} - f_{min})$, где f_{max} и f_{min} наибольшее и наименьшее значения целевой функции на текущем множестве векторов. В «худшую» группу — вектора, для которых справедливо $f_{max} - \alpha \cdot (f_{max} - f_{min}) \leq f(z) \leq f_{max}$. В алгоритме $IA2$ текущее множество решений неограниченно.

K_{copy} — *максимальное число копий решений*. Применяется для ограничения процесса клонирования. Число копий каждого решения, создаваемое в алгоритме $IA1$, линейно зависит от расстояния до группы «худших» решений, но не превышает K_{copy} . В алгоритме $IA2$ это число постоянно.

Q_{var} — *параметр изменения векторов*. Используется на этапе мутации вектора z для построения окрестности $N(z)$ по следующему правилу: $z' \in N(z)$, если $z'_i \geq z_i$, $i \in J$, и $\sum_{i \in J} (z'_i - z_i) \leq \rho$, где ρ — радиус окрестности, $\rho \leq Q_{var}$. В алгоритме $IA1$ радиус ρ линейно зависит от расстояния до группы «худших» решений. Чем больше это расстояние, тем меньше ρ . В алгоритме $IA2$ радиус не изменяется. Мутация решения z выполняется в два этапа. Сначала выбирается вектор z' из окрестности $N(z)$, затем применяется алгоритм локального поиска для z' . Получившийся вектор является результатом мутации исходного решения.

Для сравнения алгоритмов разработаны две группы тестовых примеров. Количество населенных пунктов в них равняется 100, число типов станций изменяется от 3 до 10. В первой группе пункты находятся на двумерной евклидовой плоскости. Их координаты выбраны случайным образом на отрезке $[0; 7000]$. Во второй группе пункты представляют собой вершины полного графа. Расстояния соответствуют весам

ребер такого графа и имеют равномерное распределение на отрезке [1; 2000]. Дальность распространения сигнала лежит в диапазоне от 300 до 2000. Точные решения получены нами с помощью системы моделирования задач математического программирования и оптимизации *GAMS* (<http://www.gams.com/>).

Для построения программ использовался компилятор Microsoft® C/C++ версии 16.00.40219.01 для 08x86. Тестирование выполнялось на персональном компьютере с процессором Intel® Core™ i5-2430M 2.4 GHz.

Экспериментальное исследование обоих алгоритмов (*IA1*, *IA2*) и системы *GAMS* проводилось по следующим параметрам: ν — частота получения глобального оптимума, ϵ — среднее относительное отклонение значения целевой функции от оптимального, δ — полуширина 95%-ного доверительного интервала для среднего отклонения. Использовались значения параметров: $s = 100$, $\alpha = 0,05$, $K_{copy} = 100$, $Q_{var} = 20$, время работы ограничивалось $t = 15$ минутам.

Тестовые примеры на евклидовой плоскости оказались относительно простыми для системы *GAMS*. С помощью нее были получены точные решения для всех примеров за одну минуту. К этому времени иммунный алгоритм нашел такие решения только в 40% запусков, среднее отклонение составило $\epsilon = 3,5\%$. В дальнейшем качество решений увеличивалось, за 15 минут алгоритм нашел точные решения уже в 70% запусков, а $\epsilon = 0,9\%$, что является хорошими показателями для подобных алгоритмов.

Тестовые примеры на полном графе, наоборот, оказались более сложными. В этом случае система *GAMS* за одну минуту работы нашла оптимальные решения только в 68% запусков. Ниже в таблице приведены результаты экспериментального сравнения обоих алгоритмов (*IA1*, *IA2*) и системы *GAMS*. В конце каждой минуты вычислялись и записывались в соответствующую строку параметры ν , ϵ и δ . Например, в строке 5 таблицы стоят значения указанных параметров после пяти минут работы алгоритмов. При анализе этих данных можно заметить, что алгоритм *IA1* находит более качественные решения по сравнению с *IA2*. Так, за 15 минут в 76,27% запусков были получены точные решения, относительное отклонение составило 2,90%, полуширина доверительного интервала равнялась 0,89%. Эти значения лучше соответствующих показателей алгоритма *IA2*. Действительно, программа, не включающая сетевое взаимодействие, за 15 минут нашла точные решения в меньшем количестве запусков (72,60%), а среднее относительное отклонение и полуширина доверительного интервала оказались больше (4,16% и 1,17% соответственно). Итак, алгоритм *IA1* в данном случае может быть сравним с системой *GAMS* по частоте нахождения за отведенное время оптимального решения. Полученные результаты позволяют сде-

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента.
Задачи на полном графе

t , мин	<i>GAMS</i>	<i>IA1</i>			<i>IA2</i>		
	ν , %	ν , %	ϵ , %	δ , %	ν , %	ϵ , %	δ , %
1	68,33	50,85	10,63	1,99	40,20	91,33	15,99
2	75,00	54,66	8,66	1,68	55,56	11,67	3,60
3	76,67	58,05	7,46	1,57	59,13	7,82	1,73
4	78,33	59,75	6,49	1,43	64,42	6,44	1,60
5	78,33	62,29	5,60	1,29	64,90	5,99	1,51
6	83,33	66,95	4,68	1,21	65,38	5,75	1,41
7	83,33	69,07	4,13	1,09	65,87	5,65	1,41
8	83,33	70,34	3,79	1,01	67,31	5,43	1,39
9	83,33	72,03	3,51	0,99	69,23	5,00	1,33
10	83,33	74,15	3,31	0,98	69,71	4,77	1,28
11	85,00	74,58	3,22	0,97	70,67	4,50	1,25
12	85,00	75,00	3,17	0,96	70,67	4,42	1,23
13	85,00	75,00	3,12	0,95	71,15	4,41	1,23
14	85,00	75,42	2,98	0,90	71,15	4,25	1,17
15	85,00	76,27	2,90	0,89	72,60	4,16	1,17

лать вывод о том, что сетевое взаимодействие играет положительную роль в алгоритме иммунной сети.

Следует отметить, что для 3% примеров относительное отклонение значения целевой функции от оптимального достигало 15%. В связи с этим требуется дальнейшее изучение семейств трудных задач.

Таким образом, в работе продолжены построение и исследование иммунных алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации на примере вариантной задачи размещения телекоммуникационных центров. Выполнена реализация на ЭВМ предложенных алгоритмов, созданы и опробированы серии тестовых примеров. Полученные результаты вычислительного эксперимента указывают на конкурентоспособность предложенных алгоритмов. Представляется перспективным продолжение исследований в данном направлении.

Список литературы

1. Алгоритм искусственной иммунной системы для задачи размещения центров телекоммуникаций / А. А. Колоколов, Т. В. Леванова, Л. А. Заозерская, Ю. С. Поздняков // Динамика систем, механизмов и машин : материалы VIII Междунар. науч. конф. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – Кн. 3. – С. 49–51.

2. Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М. : Мир, 1982. – 416 с.
3. Еремеев А. В. Методы дискретной оптимизации в эволюционных алгоритмах / А. В. Еремеев // Проблемы оптимизации и экономические приложения : материалы V Всерос. конф. – Омск : Изд-во Ом. гос. ун-та, 2012. – С. 17–21.
4. Заозерская Л. А. Исследование и решение двухкритериальной задачи о покрытии множества / Л. А. Заозерская, А. А. Колоколов // Проблемы информатики. – 2009. – № 2. – С. 14–23.
5. Искусственные иммунные системы и их применение / под ред. Д. Дасгупты. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 344 с.
6. Колоколов А. А. Алгоритмы муравьиной колонии для задач оптимального размещения предприятий / А. А. Колоколов, Т. В. Леванова, М. А. Лореш // Ом. науч. вестн. – N4(38). – 2006. – С. 62–67.
7. Колоколов А. А. Разработка одного иммунного алгоритма для решения задачи о p -медиане / А. А. Колоколов, Т. В. Леванова, Ю. С. Поздняков // Статистика. Моделирование. Оптимизация : сб. тр. Всерос. конф. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – С. 137–140.
8. Кочетов Ю. А. Методы локального поиска для дискретных задач размещения Модели и алгоритмы / Ю. А. Кочетов. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2011. – 259 с.
9. Ройт А. Иммунология : пер. с англ. / А. Ройт, Дж. Бростофф, Д. Мейл. – М. : Мир, 2000. – 592 с.
10. Стил Э. Что, если Ламарк прав? Иммуногенетика и эволюция / Э. Стил, Р. Линдли, Р. Бландэн. – М. : Мир, 2002. – 237 с.
11. Coello C. A. Use of an artificial immune system for job shop scheduling / C. A. Coello, Cortés Rivera D. and Cruz Cortés N. // ICARIS. – 2003. – P. 1–10.
12. Gendreau M. Handbook of Metaheuristics / M. Gendreau, J.-Y. Potvin. – 2nd ed. – Springer, 2010. – 668 p.
13. A parallel immune algorithm for traveling salesman problem and its application on cold rolling scheduling / Zhao Jun, Liu Quanli, Wang Wei , Wei Zhuoqun, Shi Peng // Information Sciences: an I. J. – Vol. 181. – 2011. – P. 1212–1223.
14. Kitrinou E. The location choice for telecenters in remote areas. The case of the Aegean islands / E. Kitrinou, A. A. Kolokolov, L. A. Zaozerskaya // Proc. of the 2nd Intern. workshop on discrete optimization methods in production and logistics. – Омск : S.n., 2004. – P. 61–65.
15. L. N. de Castro. Immune, swarm, and evolutionary algorithms part I: Basic Models / L. N. de Castro // Proc. of the ICONIP Conference (International Conference on Neural Information Processing), Workshop on Artificial Immune Systems. – 2002. – Vol. 3. – P. 1464–1468.
16. Niels K. Jerne. The Generative Grammar of the Immune System / Niels K. Jerne // Nobel Lecture. In Nobel Lectures: Physiology or Medicine. – 1984. – P. 1981–1990.

A. A. Kolokolov, T. V. Levanova, Y. S. Pozdnyakov
Artificial immune system algorithms for the multivariant problem of the telecommunications centers location

Abstract. A variant location problem, which is a generalization of the dominating set problem, is considered in the paper. Integer linear programming model for the problem is

constructed. Artificial immune system algorithm is suggested and two implementations of this algorithm are studied. The results of experimental investigation on series of test problems are provided.

Keywords: discrete optimization; integer programming; multivariant location problem; artificial immune system algorithm; telecenter.

Александр Александрович Колоколов, доктор физико-математических наук, профессор, Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 644099, Омск, ул. Певцова, 13, тел.: +7(3812)236739 (kolo@ofim.oscsbras.ru)

Татьяна Валентиновна Леванова, кандидат физико-математических наук, доцент, Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 644099, Омск, ул. Певцова, 13, тел.: +7(3812)236739 (levanova@ofim.oscsbras.ru)

Юрий Сергеевич Поздняков, аспирант, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, 644077 Омск, проспект Мира, 55а, тел.: +7(3812)644238 (yura.pozdnyakov@gmail.com)

Kolokolov Alexandr, Omsk Division of Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the RAS, 13, Pevtsova St., Omsk, 644099, professor, Phone: +7(3812)236739 (kolo@ofim.oscsbras.ru)

Levanova Tatiana, Omsk Division of Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the RAS, 13, Pevtsova St., Omsk, 644099, senior researcher, Phone: +7(3812)236739 (levanova@ofim.oscsbras.ru)

Pozdnyakov Yury, Omsk F.M. Dostoevsky State University, 55a Prospect Mira, Omsk 644077, Post-Graduate Student, Phone: +7(3812)644238 (yura.pozdnyakov@gmail.com)