

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ (Вычислительные системы)

1999 год

Выпуск 166

УДК 519.7+681.513

РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ НА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ¹

П.Г.Загоруйко, А.Г.Пичуева, Ю.А.Устюгов

В в е д е н и е

При изучении сложных систем с помощью имитационных моделей имеют дело с тремя наборами характеристик: X_1 — начальные параметры системы, X_2 — управляющие воздействия и X_3 — наблюдаемые характеристики поведения системы. Обычно решается прямая задача или задача анализа: анализируются характеристики X_3 при разных сочетаниях характеристик X_1 и X_2 . В строго детерминированных моделях отношения между парой наборов (X_1, X_2) и набором X_3 имеют характер гомоморфных отображений: каждому набору характеристик $X_1(i)$ и $X_2(j)$ соответствует один набор характеристик $X_3(ij)$.

Обратное отображение не однозначно: одно и то же поведение модели (X_3) может быть вызвано разными сочетаниями свойств системы (X_1) и стратегии управления (X_2). Этим объясняются трудности решения задачи синтеза, обратной по отношению к предыдущей: найти сочетание (X_1, X_2) , которое порождало бы заранее заданное поведение X_3 .

Будем называть "допустимой" тройку характеристик (X_1, X_2, X_3) , если характеристики X_3 порождаются характеристиками X_1 и X_2 . При некоторых фиксированных парах (X_2, X_3)

¹Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 97-06-80312 и Гранта МинВУЗа РФ № ЗН-228-98.

может оказаться, что не существует такого набора параметров модели X_1 , при которых она реагировала бы на воздействие X_2 способом X_3 . В этом случае мы имеем дело с недопустимой тройкой. Недопустимой может оказаться тройка и в том случае, если среди всех возможных сочетаниях характеристик (X_1, X_2) заданное поведение X_3 не достигается.

Ставя обратную задачу обнаружения допустимой тройки при фиксированном X_3 , мы не знаем, существует ли ее решение. Даже если оно существует, то может оказаться, что решение не единственно. В этом случае возникает задача поиска среди допустимых троек наилучшего решения по критерию $Q = f(X_1, X_2)$. Вид функции Q может оказаться сколь угодно сложным. С учетом этого задача сводится к хорошо известной проблеме поиска главного экстремума на многоэкстремальном функционале. Эффективных алгоритмов точного решения таких задач не существует. Решения, более или менее близкие к оптимальным, находятся с помощью эвристических методов направленного перебора.

В данной работе предлагается метод направленного перебора для решения обратных задач, возникающих при исследовании сложных моделей. В качестве конкретного примера рассматривается имитационная модель, разработанная для изучения проблем устойчивого развития ноосферы [1]. Приведем краткое описание структуры этой модели [2].

§1. Структура модели

Блок-схема основного (популяционного) ядра модели, предназначенной для исследования процессов развития ноосферы, приведена на рис.1.

В ядре выделяется три сектора: N — природный сектор, отвечающий за репродуктивные свойства (сохранение и рост численности) популяции, T — техносфера, отвечающая за производственно-трудовые функции популяции, и S — социальная сфера, связанная с социально-информационными функциями популяции.

В каждом из трех секторов имеются индивиды, в разной степени способные к выполнению своих функций. Пусть F — "функциональная" часть сектора, состоящая из индивидов, способных

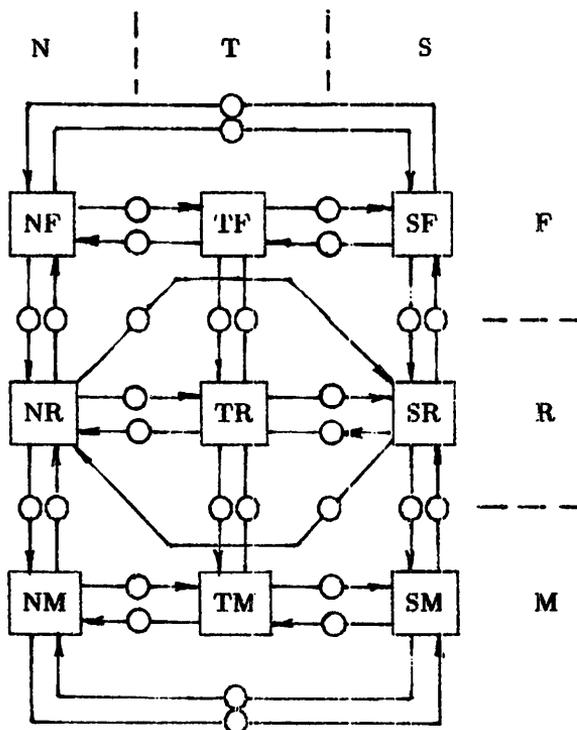


Рис.1. Блок-схема модели популяции

наилучшим образом взаимодействовать с природой, техносферой и социальной средой. Вторая часть *R* — "группа риска", репродуктивные способности которой снижены, а трудовые и социальные перспективы неопределены. Наконец, третья часть *M* — группа "маргиналов", выведенных из созидательной зоны биологического, трудового и социального воспроизводства.

Общий ресурс системы *W* делится на две части: рабочая часть (*WR*) и управляющая часть (*WU*). Рабочая часть ресурса распределена между 9 функциональными блоками системы ($WR = wr_1 + wr_2 + \dots + wr_8 + \dots + wr_9$). Эффективность (f_i) единицы ресурса (т.е. индивида) зависит от того, в каком функциональном блоке он находится. Значения эффективностей для каждого блока считаются заданными и неизменными. Ресурс

блока t (wr_t) определяется числом индивидов (n_t) в этом блоке и их эффективностью: $wr_t = n_t * f_t$.

Количество людей в каждом блоке первоначально задается и в процессе эволюции системы меняется в результате управляющих воздействий. Управление системой осуществляется блоками (окружности на схеме), регулируемыми перетоки ресурса из одного блока в другой. Стрелки показывают направления переток популяционного потенциала или ресурса системы. В системе управления задействован ресурс WU , который разделен между 30 управляющими блоками ($WU = wu_1 + wu_2 + \dots + wu_k + \dots + wu_{30}$). Эффективность (f_k) единицы ресурса WU k го блока управления измеряется количеством ресурса WR , перетекающего через этот блок в единицу времени, если движение имеет направление "снизу-вверх", или задержанного этим блоком, если движение направлено "сверху-вниз". Значения этих эффективностей задаются и в процессе работы системы не меняются.

Общая эффективность системы равна сумме эффективностей только ее рабочих блоков: $P = wr_1 * f_1 + wr_2 * f_2 + \dots + wr_t * f_t + \dots + wr_9 * f_9$.

Задача синтеза системы состоит в поиске оптимального разделения общего ресурса на две части WR и WU и оптимального распределения управляющего ресурса WU между 30 блоками системы управления.

§2. Алгоритм SPAdd

2.1. *Алгоритм Случайного Поиска с Адаптацией (SPA)* [3]. Приведем краткое описание известного алгоритма SPA. Пусть задача состоит в выборе наилучшего по некоторому критерию сочетания n элементов из исходного множества, состоящего из q элементов. Вещественная ось на участке от 0 до 1 делится на q равных частей, и каждый участок шириной $1/q$ сопоставляется своему элементу.

Запускается датчик случайных чисел с равномерным распределением в диапазоне (0-1). Если число попадает в j -й участок, то j й элемент включается в испытываемый набор элементов. После n шагов работы датчика выбранными оказываются n элементов. Качество этой случайно выбранной подсистемы оценивается по заданному критерию и получает оценку Q_1 .

Описанная процедура случайного выбора n -мерных подсистем элементов и оценки их качества повторяется g раз. Рассмотрение полученного списка оценок $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_g$ позволяет выбрать наилучшую и наихудшую из этих подсистем и выполнить процедуру адаптации, т.е. "поощрения" и "наказания". Участки, соответствующие элементам, попавшим в наилучшую подсистему, "поощряются" путем расширения их границ на величину h , а участки, соответствующие элементам из самой худшей подсистемы, "наказываются" тем, что их ширина уменьшается на величину h , $h < 1/g$. Суммарная длина всех участков по-прежнему равна 1.

После этого случайным образом выбираются и испытываются g новых подсистем. Но теперь вероятность попадания элементов в эти подсистемы будет не одинаковой: поощренные элементы, представленные более широкими отрезками, имеют больше шансов войти в очередную подсистему, чем наказанные. По результатам испытания этой партии подсистем процедура адаптации повторяется.

После некоторого количества (K) циклов поиска и адаптации процесс стабилизируется: участки удачливых элементов занимают практически весь отрезок (0-1) и в испытываемую подсистему выбираются одни и те же элементы. Этот факт служит сигналом к окончанию процесса выбора наилучшей n -мерной подсистемы элементов.

С уменьшением величины h качество получаемого решения растет, но одновременно растет и требуемое машинное время.

2.2. Метод последовательного добавления элементов (Add метод) [4]. Вначале все q элементов по отдельности оцениваются по некоторому заданному критерию качества, и выбирается один, самый лучший элемент. Затем к нему по очереди добавляются все $(q - 1)$ элементов по одному. Получающиеся пары элементов оцениваются по тому же критерию, в результате чего выбирается самое удачное сочетание из двух элементов. К нему таким же путем подбирается наилучший третий элемент из оставшихся $(q - 2)$, и так продолжается до получения системы из n элементов.

Оба описанных алгоритма дают оптимальное решение на каждом шаге, но это не обеспечивает глобального оптимума.

2.3. *Метод аддитивного наращивания элементов* (алгоритм SPAdd). В рассматриваемой нами модели фиксируется набор начальных характеристик X_1 и желательная траектория ее развития X_3 , оцениваемая критерием качества Q . Требуется найти такое сочетание значений управляющих параметров X_2 , при котором тройка $\langle X_1, X_2, X_3 \rangle$ была бы допустимой (см. §1). Это означает, что критерий качества системы при таком управлении превышает некоторый порог Q_0 .

Для точного решения этой задачи нужно было бы перебрать сочетания всех возможных значений 30 управляющих параметров при всех вариантах деления ресурса W системы на две части WR и WU . Если каждый параметр и вариант деления может принимать только 5 различных значений, то нужно было бы испытать 5^{31} вариантов. При скорости проверки 1 вариант в секунду на это потребовалось бы 10^{14} лет непрерывной работы компьютера. Эвристический алгоритм направленного перебора SPAdd, предложенный для решения этой задачи, поясним на примере выбора допустимого сочетания значений $q(=30)$ параметров, каждый из которых принимает $n(=5)$ возможных значений, при 5 разных вариантах распределения общего ресурса на две части.

1. Зафиксируем возможные варианты деления ресурса W . Пусть ресурс WU будет поочередно равен 5, 10, 15, 20 и 25% общего ресурса системы. На первом шаге примем, что $WU = 0,05W$.

2. Зафиксируем q отрезков $x_i (i = 1, 2, \dots, q)$ вещественной оси единичной длины. Разделим эти отрезки на n равных частей $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in})$ и каждой части x_{ij} поставим в соответствие j -е значение i -го параметра.

3. Установим некоторое начальное состояние вектора управляющих параметров, придав, например, всем им одинаковое значение $x_{ij} = 3$. Это означает, что каждый управляющий блок получает ресурс $w_i = WU/30$. Проследим за эволюцией системы при такой стратегии управления и определим величину критерия качества Q_1 .

4. Значение j одного (любого i -го) параметра изменяем, перебирая все n его возможных состояний, а значения всех остальных параметров сохраняем прежними. Оцениваем качество системы для этих n вариантов и фиксируем два состояния, при которых была получена наибольшая ($Q_{i_{\max}}$) и наименьшая ($Q_{i_{\min}}$) оценки качества. Разность $b_i = Q_{i_{\max}} - Q_{i_{\min}}$ примем в качестве оценки степени влияния (индивидуальной значимости) i -го параметра на работу системы.

5. Повторим процедуры п.3 для всех параметров по отдельности.

6. Выберем параметр i , степень влияния которого (b_i) на систему оказалась максимальной и зафиксируем его значение (x_{i_j}), при котором была получена оценка $Q_{i_{\max}}$.

7. Присоединим к выбранному параметру любой (k -й) из остальных параметров и для полученной пары (ik) проверим сочетания значения x_{i_j} со всеми n значениями параметра x_k , сохраняя равными значения остальных 28 параметров.

Оценим качество работы системы при этих сочетаниях и выберем два варианта с самым высоким и самым низким значениями критерия качества, разность между которыми $b_{ik} = Q_{ik_{\max}} - Q_{ik_{\min}}$ будет характеризовать степень влияния на систему этих двух параметров.

8. Повторим операции п.7, присоединяя к i -му параметру по очереди все остальные параметры.

9. Выберем пару с максимальным значением оценки β_{ik} и зафиксируем их значения при $\beta_{ik_{\max}}$.

10. Путем присоединения к этой паре всех 28 остальных параметров по одному, найдем самую influentialную тройку параметров и наилучшее сочетание их значений.

11. Процесс наращивания числа наиболее влиятельных параметров продолжается до выполнения одного из двух условий: либо на некотором шаге выполняется условие $Q_{\max} > Q_0$, либо все параметры оказались включенными в состав наиболее влиятельных, а удовлетворительного решения не найдено. При выполнении первого условия задача считается успешно решенной. При выполнении второго делается вывод, что при данном значении

ресурса WU , выделенного для системы управления, задача синтеза не имеет решения.

12. В этом случае выбирается следующее значение доли WU , и пп. 2-12 повторяются.

13. Если после исчерпания всех вариантов условие $Q_{\max} > Q_0$ остается невыполненным, то делается вывод о недостижимости заданного качества эволюции системы. В нашем случае это будет, например, означать, что при данных исходных условиях переход на траекторию устойчивого развития невозможен.

Описанный процесс последовательного присоединения новых параметров к группе наиболее влиятельных и выбора их наиболее подходящих значений аналогичен процессу последовательных мутаций в генетических алгоритмах. Если одинаково хорошие результаты дает присоединение к родительской группе влиятельных параметров не одного, а нескольких новых параметров, то дальше можно вести не один, а несколько генетических процессов параллельно.

Вполне возможно, что при добавлении каждого нового параметра значения предыдущих параметров требуют пересмотра: в новом наборе параметров оптимальное сочетание их значений может оказаться другим. Для того, чтобы после добавления s -го параметра найти оптимальное сочетание, нужно было бы сделать полный перебор всех 5 в s -й степени вариантов. Для сокращения перебора здесь можно использовать следующую направленную процедуру:

14. На каждый из s отрезков вещественной оси $(0-1)$ датчиком случайных чисел бросается число, которое попадает в одну из n частей i , тем самым, выбирает одно из n значений каждого параметра.

15. При этом сочетании значений запускается модель системы и находится оценка качества ее работы Q_1 .

16. Такая процедура выбора и проверки случайных сочетаний значений выполняется P раз.

17. Из серии оценок $Q_1, Q_2, \dots, Q_n, \dots, Q_P$ выбирается самая высокая и самая низкая. Значения параметров, обеспечившие наилучший результат, поощряются путем расширения границ соответствующих им участков на оси $(0-1)$, а значения, приведшие

к самому плохому результату, — наказываются путем сокращения длины их участков.

В нашем случае, в отличие от рассматриваемых в методе SPA, вполне можно допустить предположение о гладкости изменения функции качества при небольших изменениях значений параметров. Исходя из этого, стратегия поощрения и наказания модифицируется следующим образом: если участок, соответствующий самому лучшему значению параметра, при поощрении расширяется на величину $h \ll 1/n$, то ближайшие соседние участки также поощряются расширением на величину $g * h$, где g может принимать значение от 0 до 1. Аналогично, при наказании границы "самого плохого" участка сближаются на h , а границы ближайших к ним соседей (одного или двух, если они есть) — на $g * h$. После каждого акта поощрения или наказания суммарная длина всех участков для каждого параметра нормируется до 1.

18. Процедуры по пп.14–17 повторяются до выполнения одного из следующих условий: пройдено заданное число циклов 14–17 или на нескольких шагах подряд выбирается одно и то же сочетание значений параметров.

Трудоёмкость описанного алгоритма регулируется несколькими путями: выбором числа возможных значений параметров (n), заданием числа циклов и величины поощрения h . Это позволяет адаптировать задачу к возможностям имеющейся вычислительной техники.

§4. Двухкомпонентный комплекс

На базе описанных выше имитационной модели и алгоритма SPAdd разработан макет двухкомпонентного программного комплекса "СИНТЕЗ" (см. рис. 2).

Он состоит из блоков модели (M), выбора параметров (P) и супервизора (S). Блок выбора P передает на вход модели M вектор значений управляющих параметров. Модель имитирует эволюцию системы при этих параметрах и сообщает результат супервизору S . Если результат не удовлетворяет заданному критерию качества, то супервизор передает блоку P сигнал на продолжение работы. Работа комплекса завершается при выполнении

нии условий, описанных в п.11 §3.

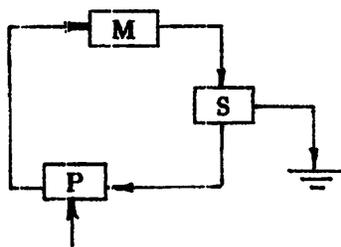


Рис.2. Блок-схема комплекса "СИНТЕЗ"

Определенную техническую трудность представляла проблема стыковки двух сложных и разнородных программных блоков *М* и *Р*. Сейчас комплекс проходит стадию отладки, после завершения которой появится программное средство для решения задач синтеза стратегии управления сложными системами. По своему прямому назначению этот вариант системы СИНТЕЗ ориентирован на исследовательские и учебные цели, связанные с проблемами устойчивого развития ноосферы.

Л и т е р а т у р а

1. ЗАГОРУЙКО Н.Г. Исследование проблем, связанных с моделированием процессов развития ноосферы // Искусственный интеллект и экспертные системы. — Новосибирск, 1997. — Вып. 160: Вычислительные системы. — С. 3-17.
2. ДЕМИН Д.В., ПИЧУЕВА А.Г. Разработка модели развития популяции в рамках системы "человек-среда" // Технический отчет №11, РосНИИ Искусственного Интеллекта, Институт Математики СО РАН, 1998. — С. 3-11.
3. ЛБОВ Г.С. Выбор эффективной системы зависимых признаков. — Новосибирск, 1985. — Вычислительные системы. Вып.19. — С. 21-35.
4. БАРАБАШ и др. Автоматическое распознавание образов. Киев: изд-во КВАИУ, 1963.

Поступила в редакцию
29 ноября 1999 года