

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ

Ключевые слова: *метод пчелиной колонии, оптимизация, коллективный интеллект.*

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач комбинаторной оптимизации весьма перспективным является использование методов, основанных на моделировании интеллектуального поведения колоний агентов (Swarm Intelligence) [1, 2].

Один из новейших методов данного направления — метод пчелиной колонии. Он представляет собой эвристический итеративный метод случайного поиска и применяется для решения различных задач оптимизации, относящихся как к дискретной [3, 4], так и непрерывной [5] оптимизации.

Цель данной работы — формализация биологических основ и анализ различных моделей метода пчелиной колонии, предназначенных для решения задач оптимизации.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ

Для описания поведения пчел в природе используются три основных понятия: источник нектара (цветок), занятые фуражиры, незанятые фуражиры.

Источник нектара характеризуется значимостью, определяемой различными факторами: удаленность от улья, концентрация нектара, удобство его добычи.

Занятые фуражиры закреплены за отдельным источником, в котором они добывают нектар, т.е. «заняты» им. Занятые фуражиры владеют такой информацией о данном источнике нектара, как: расстояние и направление от улья, полезность источника.

Незанятые фуражиры продолжают искать источники нектара для их использования. Существует два типа незанятых фуражиров: разведчики, которые ищут новые источники нектара, и наблюдатели, которые ждут в улье и могут там выполнять другие действия.

Каждая незанятая пчела может полететь к источнику нектара, следуя за пчелой-разведчиком, которая нашла путь к цветку. Это достигается за счет того, что каждый улей имеет так называемую закрытую площадку для танца, на которой пчелы, обнаружившие источники нектара, выполняют «виляющий танец», тем самым пытаясь привлечь других незанятых пчел последовать за ними. Если пчела решает оставить улей, чтобы получить нектар, она следует за одной из пчел-разведчиков к области с нектаром. Таким образом, незанятая пчела становится занятой. Механизмы, в соответствии с которыми она решает следовать за другой пчелой, исследованы недостаточно хорошо, но предполагается, что вербовка среди пчел с математической точки зрения всегда является функцией качества источника нектара [6].

По достижении области с нектаром занятый фуражир добывает нектар и возвращается в улей, оставляя нектар там. После того как пчела оставляет нектар, она может выполнить одно из следующих трех действий: покинуть источник нектара и снова стать незанятым фуражиром; продолжить фуражировку к тому же источнику нектара, не вербуя других особей своего улья; выполнить танец и таким образом осуществить вербовку. Пчела выбирает одну из альтернатив с некоторой вероятностью.

Таким образом, выполняется разделение функций между занятыми фуражирами и разведчиками на улучшенное изучение найденных областей с нектаром и на-

хождение новых областей с нектаром соответственно. За счет такого разделения труда достигается эффективная работа всего роя пчел.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПЧЕЛ В ПРОЦЕССЕ ФУРАЖИРОВКИ

В [7] предложена поведенческая модель самоорганизации колонии пчел, в которой пчелы-фуражиры, перемещающиеся к цветкам (источникам нектара), возвращаются в улей, а также обладают информацией о полезности соответствующего источника нектара. Собранный нектар обеспечивает обратную связь с текущим состоянием потока нектара в улье. Полезность — функция качества нектара, количества нектара и расстояния от улья. Обратная связь устанавливает ответный порог для сигнала вербовки, также известного как виляющий танец, длина которого зависит и от порога, и от полезности. Виляющий танец выполняется на специальной площадке для танцев. Фуражиры могут случайным образом выбирать танец для наблюдения и в соответствии с танцем определить место расположения участка цветка и покинуть улей для фуражировки.

В [4, 8] описан подход, представленный в [7], в терминах исчисления взаимодействующих систем (Calculus of Communicating Systems, CCS).

CCS — математическая модель (формальный язык), предназначенная для описания процессов, обычно применяемая при изучении параллелизма. Она содержит набор термов, операторов и аксиом, которые используются для описания и управления составленными выражениями. Выражения характеризуют элементы параллельной системы, а управление этими выражениями показывает, как ведет себя система. Центральным элементом в CCS является уникально именованный агент, который обладает специфическим поведением. Поведение агента определяется множеством событий и действий, которые он может выполнять. Множество действий, выполняемых агентом, описываются с помощью оператора «действие», который обозначается как «.». Другой важный оператор в CCS — оператор «+», который является оператором выбора. Он используется в случае, если описывается участие агента в одном из нескольких альтернативных действий.

Модель CCS в [4, 8] работает с агентами, которые описывают состояние пчелы или группы пчел, и с действиями, которые представляют собой возможность перехода из одного состояния в другое. Таким образом, колония может быть представлена в виде связанного графа, вершинами которого являются агенты, а ребра — действиями. Например, агент может быть представлен в следующем виде:

Разведчик b = хороший $b(s)$. Поиск $b(s)$ + плохой b . Незанятый b .

Агент b является разведчиком, который ищет источник нектара. В случае если он будет плохо искать нектар, то станет незанятым фуражиром, если хорошо, то продолжит Поиск $b(s)$ некоторого источника s .

Моделируемое поведение пчел в терминах CCS представлено на рис. 1.

Процесс фуражировки можно формализовать с помощью CCS в следующем виде:

Использовать $b(s) = \kappa_{b,s} \cdot \text{Поиск } b(s)$,
 Поиск $b(s) = \text{нектар}_{b,s} \cdot \text{Удачно } b(s) + \text{ничего}_s \cdot \text{Неудачно } b(s)$,
 Удачно $b(s) = \text{из}_{b,s} \cdot \text{Вербовка } b(s)$,
 Неудачно $b(s) = \text{из}_{b,s} \cdot \text{Незанятый } b$,
 Вербовка $b(s) = \text{танец}(b,s) \cdot \text{Вербовка } b(s) + \text{покинуть}_b \cdot \text{Использовать } b(s)$,
 Незанятый $b = \text{танец}(b',s) \cdot \text{Использовать } b(s) + \text{исследовать}_b \cdot \text{Разведчик } b$,
 Разведчик $b = \text{хороший } b(s) \cdot \text{Поиск } b(s) + \text{плохой } b \cdot \text{Незанятый } b$.

В данном описании b — уникальный идентификатор одного агента, b' — идентификатор другого агента, s — источник нектара.

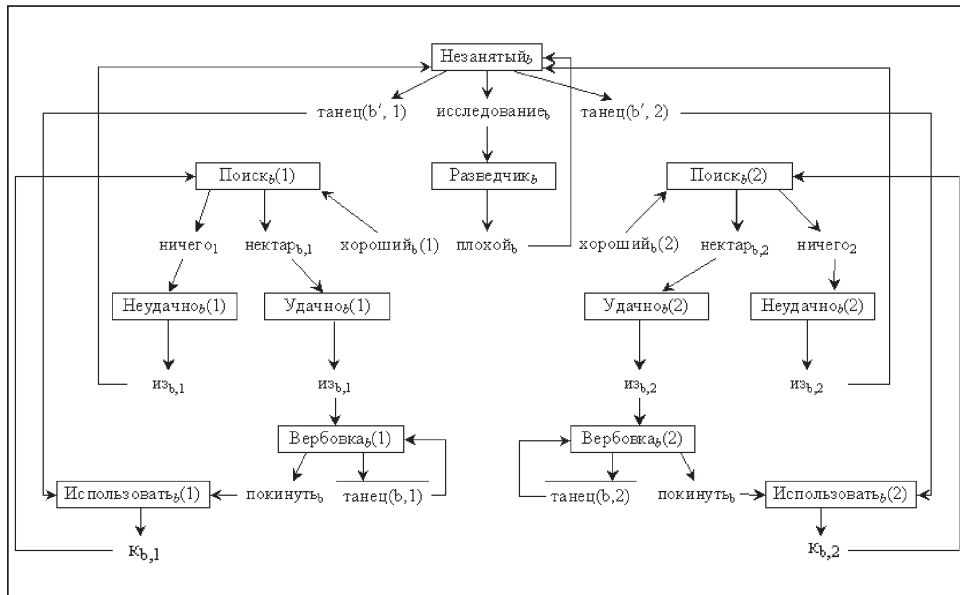


Рис. 1

МЕТОДЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

На основе предложенного в [7] подхода в [9] разработан метод пчелиной колонии для решения задачи календарного планирования (BCO-JSSP).

В аспекте решения этой задачи используется аналогия источника нектара — путь, который может рассматриваться как решение задачи календарного планирования.

После возвращения в улей агент выполняет виляющий танец с вероятностью p . Продолжительность D_i виляющего танца i -го агента рассчитывается по формуле $D_i = d_i A$, где A — масштабирующий коэффициент; d_i — относительная полезность источника нектара, найденного i -м агентом.

Абсолютная полезность источника нектара i -го агента Pf_i для задачи календарного планирования рассчитывается по формуле $Pf_i = \frac{1}{C_i}$, где C_i — целевая функция для пути i -го агента. В данном случае она представляет собой продолжительность выполнения всех операций всех работ для пути.

Рассчитав абсолютную полезность каждого агента, можно получить среднюю полезность всей колонии Pf_{col} :

$$Pf_{col} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Pf_j,$$

где n — количество виляющих танцев, исполняемых в момент времени t .

Таким образом, можно рассчитать относительную полезность d_i i -го фуражира:

$$d_i = \frac{Pf_i}{Pf_{col}}.$$

Вероятность p_i того, что за i -м агентом после выполнения им танца последуют другие незаятыле фуражиры, определяется по следующей формуле [10]:

$$p_i = \begin{cases} 0,60, & \text{если } Pf_i < 0,9 \cdot Pf_{col}; \\ 0,20, & \text{если } 0,9 \cdot Pf_{col} \leq Pf_i < 0,95 \cdot Pf_{col}; \\ 0,02, & \text{если } 0,95 \cdot Pf_{col} \leq Pf_i < 1,15 \cdot Pf_{col}; \\ 0,00, & \text{если } 1,15 \leq Pf_i. \end{cases}$$

Вероятность P_{ij} того, что агент выберет следующим j -й узел, находясь в i -м узле, рассчитывается по формуле

$$P_{ij} = \frac{\rho_{ij}^{\alpha} d_{ij}^{-\beta}}{\sum_{j \in J^k} \rho_{ij}^{\alpha} d_{ij}^{-\beta}},$$

где ρ_{ij} — стоимость дуги между j -м и i -м узлами; d_{ij} — эвристическое расстояние между j -м и i -м узлами; $\alpha, \beta \in [0; 1]$ — коэффициенты, выбираемые экспериментально; J^k — множество узлов, в которые можно переместиться из i -го узла.

Оценка ρ_{ij} определяется с помощью формулы

$$\rho_{ij} = \frac{1 - m\alpha}{k - m},$$

где k — количество узлов, в которые можно переместиться из i -го узла; m — число предпочтения пути, которое может быть равно 1 или 0. Предпочтительным считается путь, который на какой-либо итерации пригоден для выполнения танца. При этом количество таких, так называемых элитных, путей ограничено. Таким образом, на начальной итерации все ребра имеют число $m = 0$, что делает равными шансы выбора любого ребра.

Данный метод сравнивался с методом муравьиных колоний и табуированным поиском. Эксперименты [9] показали, что результаты, полученные с помощью метода пчелиной колонии, почти не отличаются от результатов, полученных с помощью метода муравьиных колоний, и незначительно хуже результатов, полученных с помощью поиска с табу.

Lučić и Teodorović [11, 12] первыми использовали основные принципы коллективного интеллекта пчел для решения задач комбинаторной оптимизации. Они разработали так называемый метод системы пчел (Bee System, BS) и проверили его при решении задачи коммивояжера. На основе BS в [13] предложен метаэвристический метод пчелиной колонии (Bee Colony Optimization Metaheuristic, BCO) и метод нечеткой пчелиной системы (Fuzzy Bee System, FBS).

В методе BCO в начале процесса поиска все агенты расположены в улье. Каждый агент делает ряд локальных перемещений и таким образом постепенно составляет решение задачи. Процесс поиска состоит из итераций. Первая итерация считается законченной, когда агенты создадут хотя бы одно допустимое решение. Лучшее решение сохраняется, а затем происходит переход к следующей итерации. Далее процесс составления решений повторяется. Общее количество итераций ограничивается исходя из задачи оптимизации.

При перемещении в пространстве поиска агенты могут следовать в прямом направлении или обратном. При перемещении в прямом направлении агенты формируют различные частные решения, что достигается за счет индивидуального исследования пространства поиска и коллективного опыта, полученного на предыдущих итерациях.

После создания частного решения агенты перемещаются в обратном направлении, т.е. возвращаются в улей, где могут участвовать в процессе вербовки путем выполнения танца, тем самым обмениваясь информацией о различных созданных частных решениях. После посещения улья агенты опять следуют в прямом направлении и продолжают создавать частные решения. Итерация заканчивается тогда, когда создается хотя бы одно допустимое решение. Таким образом, BCO, как и методы динамического программирования, решает комбинаторные задачи оптимизации поэтапно.

Метод FBS предназначен для решения задач, характеризующихся неопределенностью, агенты при решении задачи используют правила нечеткой логики [14, 15] для организации связи между ними и их действиями.

В соответствии с FBS при добавлении компонента решения к частному решению агент может рассматривать компонент решения как: «менее полезный», «полезный» или «более полезный».

При выборе следующего компонента решения для определения его полезности используется правило вида

ЕСЛИ свойства компонента решения «очень хорошие», ТО рассматриваемый компонент решения «очень полезный».

Вероятность P_j того, что j -й компонент будет добавлен к частному решению, рассчитывается по формуле

$$P_j = \frac{f_j}{\sum_{i \in J^k} f_i},$$

где f_j — полезность j -го компонента решения; J^k — множество компонентов решения, которые могут быть добавлены.

В FBS для сравнения частных решений агентов используется концепция непригодности частных решений [13]. Непригодность частного решения определяется следующим образом:

$$L_k = \frac{L^{(k)} - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}.$$

Здесь L_k — непригодность частного решения, полученного k -м агентом; $L^{(k)}$ — целевая функция, полученная с помощью частного решения k -го агента; L_{\min} — целевая функция, полученная на основании лучшего частного решения, найденного с начала поиска; L_{\max} — целевая функция, полученная на основании худшего частного решения, найденного с начала поиска.

Определение пригодности частного решения основывается на приблизительных рассуждениях:

ЕСЛИ полученное частное решение «плохое», ТО его пригодность «низкая».

Для определения количества агентов, которые покинут найденные ими пути и присоединятся к другим агентам, также существуют определенные правила. Каждое частное решение, которое предлагается в области для танца, обладает двумя характеристиками: значение целевой функции и количество агентов, предлагающих это решение.

Для определения полезности частного решения используются правила вида

ЕСЛИ предлагаемый путь «короткий» и количество предлагающих агентов «маленькое», ТО полезность пути «средняя».

Для определения количества агентов, меняющих свой путь, используются следующие правила:

ЕСЛИ пригодность частного решения i -го агента «низкая» и полезность частного решения j -го агента «высокая», ТО количество агентов, меняющих свой путь на путь j -го агента, «велико».

Таким образом, используя коллективные знания и обмен информацией, агенты сосредотачивают поиск на наиболее перспективных направлениях.

Метод FBS был применен к решению задачи о составлении пар [13]. Проведенные эксперименты [13] показали, что его использование характеризуется достаточной точностью и быстрой сходимостью.

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ ДЛЯ ОТБОРА ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

В [3, 16] описано применение метода пчелиной колонии для решения задач, основанных на распределении ресурсов (например, транспортной задачи). В соответствии с предложенными математическими моделями поведения пчел [3, 16] в настоящей статье разработана модификация метода пчелиной колонии для отбора информативных признаков при построении классифицирующих моделей

в задачах диагностики и распознавания образов по признакам, состоящая из следующих шагов.

Шаг 1. Инициализация. Задаются основные параметры метода пчелиной колонии: количество агентов B , максимальное количество итераций T_{\max} , начальное количество агентов-разведчиков Ex_{start} , ограничение максимального количества агентов-разведчиков Ex_{\max} , пороговое значение полезности s_{\min} . Также задается общее количество признаков M и количество признаков N , которое следует оставить. После чего создается пространство поиска порядка $N \times M$.

Шаг 2. Запуск разведчиков. Разведчики случайным образом размещаются в пространстве поиска. При этом выбранное расположение (точка в пространстве поиска) должно быть таким, чтобы не было одинаковых значений координат:

$$z_i^k = \text{rand}(M), \quad i = \overline{1, N}, \quad \forall i \neq j: z_i^k \neq z_j^k,$$

где z_i^k — i -я координата размещения k -го разведчика в пространстве поиска; $\text{rand}(M)$ — случайное число, выбранное в диапазоне от 1 до M .

Шаг 3. Отправка занятых фуражиров. Занятые фуражиры прикреплены к определенным источникам ресурса. Начальное значение занятых фуражиров $B_e = 0$, поскольку в начале работы метода еще нет источников ресурсов, за которыми могут быть закреплены занятые фуражиры.

Полезность пребывания агента в источнике h на итерации t , при условии, что в этом источнике находится x_h агентов, рассчитывается по формуле

$$s_h(t) = \frac{a_h}{x_h(t)}, \quad h = \overline{1, N \times M},$$

где a_h — количество полезного вещества, вырабатываемое источником в единицу времени.

Количество полезного вещества a_h определяется после построения модели. Она строится исходя из положения соответствующего источника. Модель синтезируется, например, на основе регрессии или с использованием нейронных сетей [17]. Ошибка модели рассчитывается в зависимости от целевой функции; например, может рассчитываться среднеквадратическая ошибка.

В аспекте задачи отбора признаков количество полезного вещества a_h предлагается рассчитывать как обратное значение ошибки модели ε_h :

$$a_h = \frac{E}{\varepsilon_h}.$$

Здесь E — коэффициент, понижающий степень влияния ошибки ε_h . Если $\varepsilon_h = 0$, происходит переход к шагу 9.

Если полезность пребывания $s_h(t)$ достигает порогового значения ($s_h < s_{\min}$), то агент помещается в близлежащую точку от точки h пространства поиска. Новое положение определяется путем изменения значения одной из координат текущего положения агента. За счет этого выполняется исследование области, в которой находится ранее выявленный источник ресурсов.

Шаг 4. Расчет полезности полученного ресурса. Суммарная полезность фуражировки занятого фуражира или разведчика i рассчитывается по формуле

$$F^i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } J_f(h^i(t)) + w_f^i(t) > 1, \\ J_f(h^i(t)) + w_f^i(t), & \text{если } e_n < J_f(h^i(t)) + w_f^i(t) < 1, \\ 0, & \text{если } 0 < J_f(h^i(t)) + w_f^i(t) < e_n, \end{cases}$$

где $F^i(t)$ — полезность фуражировки i -го агента; $w_j^i(t)$ — шум в суммарной полезности. Шум равномерно распределен в пределах $(-w_f; +w_f)$. Значение w_f выбирается экспериментально (предлагается $w_f = 0,1$), e_n — минимальный порог полезности. Минимальный порог выбирается экспериментально (предлагается $e_n = 0,1$); $J_f(h^i(t))$ — полезность источника h^i , в котором побывал i -й агент на итерации t .

Полезность источника h рассчитывается по формуле

$$J_f(h) = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_h},$$

где ε^* — заданная (требуемая) точность решения.

Устанавливается полезность незанятых фуражиров и отдыхающих: $F^i(t) = 0$.

Шаг 5. Выбор лучшего результата и проверка, достигается ли заданная точность ε^* . Если точность достигается, то выполняется переход к шагу 9, в противном случае — переход к шагу 6.

Шаг 6. Моделирование выполнения танца, за счет чего достигается обмен информацией. Каждый агент принимает решение, выполнять или не выполнять танец. При этом вероятность выполнения влияющего танца i -м агентом на итерации t рассчитывается по формуле

$$p(i,t) = \frac{1}{\beta} L_f^i(t),$$

где $\beta > 0$ — коэффициент, понижающий влияние преимущества пути на вероятность выполнения танца; $L_f^i(t)$ — достоинство танца i -го агента на итерации t .

Величина $L_f^i(t)$ рассчитывается по формуле

$$L_f^i(t) = \max\{(F^i(t) - \alpha \bar{F}(t)), 0\},$$

где $\bar{F}(t)$ — среднее значение полезности всех источников; α — коэффициент, управляющий влиянием величины $\bar{F}(t)$ на $L_f^i(t)$.

Шаг 7. Выделение новых разведчиков и вербовка. Каждый незанятый фуражир может стать разведчиком или последовать за другим агентом.

Вероятность того, что незанятый фуражир станет разведчиком, рассчитывается по формуле

$$p_e(t) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{L_t^2(t)}{\sigma^2}\right),$$

где σ — коэффициент, необходимый для моделирования поведения фуражировки; $L_t(t)$ — сумма преимуществ танцев разных агентов:

$$L_t(t) = \sum_{i=1}^B L_f^i(t).$$

Кроме того, незанятый фуражир может быть подвергнут вербовке, т.е. последовать за i -м агентом. Вероятность того, что незанятый фуражир последует за i -м агентом, рассчитывается по формуле

$$p_i(t) = \frac{L_f^i(t)}{\sum_{j=1, j \neq i}^B L_f^j(t)}.$$

Шаг 8. Увеличение счетчика итераций: $t = t + 1$. Если $t < T_{\max}$, то выполнить переход к шагу 2, в противном случае — к шагу 9.

Шаг 9. Останов.

Модификация метода пчелиной колонии программно реализована в среде пакета Matlab 7.0. С помощью предложенной модификации решена [18] задача отбора информативных признаков для расчета коэффициентов упрочнения лопаток авиадвигателей после алмазного выглаживания. В работе [18] на основе экспериментальных данных построены регрессионные модели коэффициента упрочнения с использованием теории подобия и анализа размерности, которые допускали погрешность при расчете β^y порядка 5–7%, показано, что такая погрешность допустима.

С помощью разработанного программного обеспечения выполнено 20 запусков модификации метода пчелиной колонии со следующими значениями параметров работы метода: $B = 10$, $Ex_{\text{start}} = 5$, $Ex_{\text{max}} = 8$, $w_f = 0,1$, $e_n = 0,1$, $E = 0,5$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\sigma = 0,5$, $\varepsilon^* = 0,01$, $T_{\text{max}} = 30$. В обучающей выборке было 58 экземпляров, которые характеризовались 16 признаками, отбиралось девять наиболее информативных признаков.

Среднее значение среднеквадратической ошибки модели, полученной на основе отобранных с помощью модификации метода пчелиной колонии признаков, составляет 0,0478. Среднеквадратическое отклонение ошибок моделей на протяжении 20 запусков составило $4,83 \cdot 10^{-5}$.

Для сравнения работы модификации метода пчелиной колонии с работой метода анализа главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) [19] с помощью последнего выделено девять факторов, на основе которых построена модель.

Полученная модель характеризуется ошибкой, равной 0,0514, что больше, чем ошибка модели, построенной на основе признаков, отобранных с помощью модификации метода пчелиной колонии. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модификация обеспечивает более высокую точность решений.

Работа модификации метода пчелиной колонии для отбора информативных признаков также сравнивалась с канонической моделью генетического поиска [20]. График, отображающий динамику работы

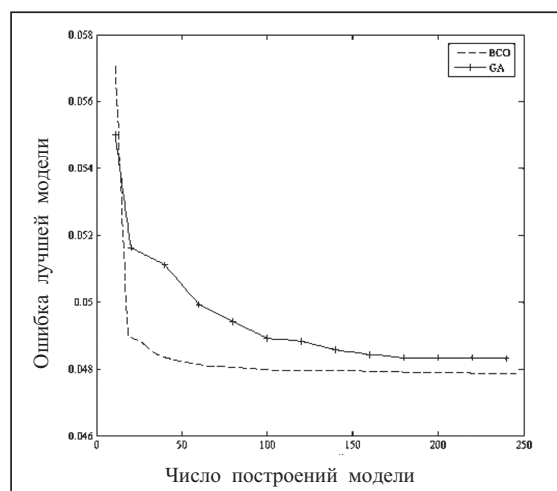


Рис. 2

модификации метода пчелиной колонии и генетического поиска, представлен на рис. 2.

Как видно из рисунка, модификация метода пчелиной колонии характеризуется более высокой точностью полученных результатов и более быстрой степенью сходимости по сравнению с канонической моделью генетического поиска.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов показали, что применение разработанной модификации метода пчелиной колонии для отбора информативных признаков является эффективным при решении практических задач диагностики.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НЕПРЕРЫВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ

В [5, 21] описано применение метода пчелиной оптимизации для решения задач непрерывной оптимизации. В данных работах предложен метод колонии искусственных пчел (Artificial Bee Colony, ABC).

В методе ABC все агенты делятся на три группы: занятые фуражиры, наблюдатели и разведчики. В начале процесса моделирования поведения пчел половина колонии состоит из занятых фуражиров, остальные агенты — наблюдатели. За каждым источником нектара закреплен только один занятый фуражир. Таким образом, количество занятых

фуражиров равно количеству источников нектара, расположенных вокруг улья.

Процесс поиска в методе ABC заключается в итеративном повторении следующих действий:

- 1) перемещение занятых фуражиров к своим источникам нектара и расчет соответствующего количества нектара;
- 2) расчет предпочтительности источников нектара для наблюдателей;
- 3) окончание процесса исследования источников нектара, которые были оставлены агентами;
- 4) отправка разведчиков на поиск новых источников нектара случайным образом;
- 5) сохранение лучшего источника нектара.

Итерации повторяются до тех пор, пока не будет найдено решение, удовлетворяющее заданным требованиям. Агенты-разведчики случайным образом выбираются из занятых фуражиров. Количество создаваемых таким образом разведчиков ограничивается специальным параметром работы метода — Limit. Если решение, определяющееся соответствующим источником нектара, не улучшается в течение некоторого заданного количества итераций, то занятый фуражир, закрепленный за этим источником, становится разведчиком, данный источник нектара покидается и не исследуется дальше. Процесс вербовки агентов зависит от скорости, с которой находится допустимое решение

Результаты экспериментов [5, 21] свидетельствуют о целесообразности применения метода пчелиной колонии для решения задач непрерывной оптимизации, поскольку полученные оптимумы несущественно отличаются от действительных оптимумов тестовых функций.

Особенности рассмотренных модификаций метода пчелиной колонии и различия между ними представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерий сравнения	BCO-JSSP	BCO	FBS	ABC
Процедура выполнения влияющего танца	Моделируется продолжительность выполнения танца	Выполняется в зависимости от качества составленного решения	Как таковой процедуры влияющего танца нет. Моделируется путем выполнения вербовки	Моделируется путем выполнения вербовки
Выбор агентов-разведчиков	Начальное количество агентов-разведчиков равно общему количеству агентов. После вербовки количество разведчиков уменьшается	Все незанятые фуражиры являются разведчиками	Все незанятые фуражиры являются разведчиками	Минимальное и максимальное количество агентов-разведчиков ограничено
Особенности выбора решений разведчиками	Разведчики находят решения случайным образом	Разведчики создают случайные решения	Используется информация, оставленная предыдущими агентами	Разведчики выбирают решения случайным образом
Использование методов локальной оптимизации	Не используются	Не используются	Не используются	Используются методы многомерной градиентной оптимизации
Исследование решений за счет других агентов	Выполняется за счет того, что вербовка осуществляется фактически в каждом узле	Завербованные агенты следуют по выбранному решению	Не происходит. Занятые фуражиры следуют по выбранному решению	Выполняется путем незначительных изменений в решениях
Класс решаемых задач	Задача календарного планирования	Задачи комбинаторной оптимизации	Задача о составлении пар	Задачи многомерной оптимизации
Вербовка	Осуществляется при выборе агентом следующего пункта в графе решений	Осуществляется после создания частного решения	Вербовка происходит исходя из полезности решения	Зависит от скорости, с которой находится допустимое решение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор методов пчелиной колонии для решения оптимизационных задач показал, что они обладают следующими преимуществами:

- не приводят к заикливанию в локальных оптимумах, поскольку основаны на случайном поиске;
- поиск лучшего решения основывается на решениях агентов всей колонии пчел;
- применяются в динамических приложениях, поскольку способны адаптироваться к изменениям окружающей среды;
- используются для решения как дискретных, так и непрерывных задач оптимизации.

К недостаткам методов пчелиной колонии можно отнести:

- достаточно высокую итеративность;
- трудности теоретического анализа процесса получения решений, обусловленные тем, что поиск решения имеет стохастическую природу;
- априорную неопределенность времени сходимости, хотя сходимость гарантируется;
- зависимость метода от настройки параметров, подбираемых экспериментально.

Исходя из результатов анализа методов пчелиной колонии, можно сделать вывод, что, несмотря на различные особенности их применения для решения задач оптимизации, предложенным методам присущи три основные характеристики, обусловленные свойствами поведения пчел.

1. Все агенты делятся на различные типы в соответствии с действиями, которые они выполняют в процессе решения задачи:

- занятые фуражиры обеспечивают использование уже найденных источников нектара, т.е. незначительно изменяют найденные ранее решения задачи;
- незанятые фуражиры обеспечивают продолжение поиска новых источников нектара, т.е. агенты такого типа выполняют поиск новых допустимых решений задачи; незанятые фуражиры, в свою очередь, бывают двух типов: наблюдатели (ожидают в улье других агентов и не выполняют никаких действий — фактически ожидают момента, когда им нужно будет начать поиск решений) и разведчики (обеспечивают поиск новых источников нектара, который осуществляется случайным образом, т.е. они случайно выбирают в пространстве поиска возможное решение).

2. Связь между решениями агентов осуществляется путем моделирования выполнения пчелами виляющего танца. При этом выполнение танца обеспечивает образование двух типов обратной связи:

- положительная обратная связь заключается в том, что агенты, основываясь на информации о решениях других агентов, могут начать исследовать решение, полученное другим агентом;
- отрицательная обратная связь состоит в том, что агенты, получив информацию о найденных решениях другими агентами, могут принять решение о прекращении рассмотрения своего решения в связи с худшими характеристиками по сравнению с другими полученными решениями.

3. Процесс поиска решения обеспечивается двумя процедурами:

- поиск новых источников нектара во всем пространстве поиска, который достигается с помощью агентов-разведчиков; таким образом, обеспечивается исследование всего пространства поиска;
- углубленное использование областей, в которых находятся уже найденные источники нектара (достигается с помощью занятых фуражиров), т.е. решения, находящиеся в пространстве поиска вблизи от рассматриваемого решения.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Beni G., Wang J. Swarm intelligence // Ann. Meeting of the Robotics Society: Proc. of Seventh Intern. Conf. — Tokyo: RSJ Press, 1989. — P. 425–428.
2. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. Swarm intelligence: From natural to artificial systems. — New York: Oxford Univ. Press, 1999. — 320 p.
3. Quijano N., Passino K.M. Honey bee social foraging algorithms for resource allocation: Theory and application. — Columbus: Publ. House of the Ohio State Univ., 2007. — 39 p.
4. Sumpter D.J.T., Broomhead D.S. Formalising the link between worker and society in honey bee colonies // Lect. Notes Comp. Sci.: Proc. of the First Intern. Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation (MABS'98). — Paris: Springer-Verlag, 1998. — P. 95–110.
5. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: Techn. rep. — TR06. — Erciyes: Erciyes Univ. Press, 2005. — 10 p.
6. Camazine S., Sneyd J. A model of collective nectar source by honey bees: Self-organization through simple rules // J. Theoret. Biol. — 1991. — N 149. — P. 547–571.
7. Seeley T.D. The wisdom of the hive. — Cambridge: Harvard Univ. Press, 1995. — 265 p.
8. Milner R. Communication and Concurrency. — Edinburgh: Prentice Hall, 1989. — 272 p.
9. Chong S.C., Low M.Y.H. A bee colony optimization algorithm to job shop scheduling // Proc. of the 38th conf. on winter simulation. — Monterey: Monterey Press, 2006. — P. 1954–1961.
10. Nakrani S., Tovey C. On honey bees and dynamic allocation in an internet server colony // Adaptive Behavior. — 2004. — N 12. — P. 223–240.
11. Lučić P., Teodorović D. Bee system: Modeling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence // Transp. Analysis: Proc. of the Triennial Symp. TRISTAN IV. — Sao Miguel: Azores Press, 2001. — P. 441–445.
12. Lučić P., Teodorović D. Computing with bees: Attacking complex transportation engineering problems // Intern. J. Artif. Intellig. Tools. — 2003. — N 12. — P. 375–394.
13. Teodorović D., Dell'Orco M. Bee colony optimization — a cooperative learning approach to complex transportation problems // Advanced OR and AI Methods in Transportation: Proc. of 16th Mini-EURO Conf. and 10th Meeting of EWGT (13-16 Sept. 2005). — Poznan: Publ. House of the Polish Oper. and System Res., 2005. — P. 51–60.
14. Zadeh L. Fuzzy sets // Inform. and Control. — 1965. — N 8. — P. 338–353.
15. Zadeh L. From computing with numbers to computing with words—from manipulation of measurements to manipulation of perceptions // IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications. — 1999. — N 45. — P. 105–119.
16. Passino K.M., Seeley T.D. Modeling and analysis of nest-site selection by honey bee swarms: The speed and accuracy trade-off // Behavioral Ecology and Sociobiology. — 2006. — N 59. — P. 427–442.
17. Дубровін В.І., Субботін С.О. Методи оптимізації та їх застосування в задачах навчання нейронних мереж: Навч. посіб. — Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. — 136 с.
18. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности дегаей ГТД. — К.: Манускрипт, 1993. — 333 с.
19. Jolliffe I.T. Principal component analysis. — Berlin: Springer, 2002. — 502 p.
20. Gen M., Cheng R. Genetic algorithms and engineering design. — Princeton: John Wiley & Sons, 1997. — 352 p.
21. Basturk B., Karaboga D. An artificial bee colony (ABC) algorithm for numeric function optimization // IEEE Swarm Intelligence Symp. (12–14 May 2006). — Indianapolis: Indiana Press, 2006. — P. 58–63.

Поступила 05.10.2007