

УДК. 004. 415. 25

## МНОГОАГЕНТНЫЙ БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ НАЗЕМНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕТАЮЩЕЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

В.А. Мочалов, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт космических исследований и распространения радиоволн» ДВО РАН, к.т.н.; sensorlife@mail.ru

Рассматриваются проблемы построения наземной структуры летающей сенсорной сети (ЛСС). Приведена упрощенная функциональная схема процесса построения ЛСС с блоком многоагентного биоинспирированного синтеза наземной структуры ЛСС. Предложен обобщенный алгоритм синтеза наземной структуры ЛСС. Результаты исследований показали возможность совместного использования различных моделей самоорганизации животных для решения некоторых задач, возникающих в процессе построения самоорганизующихся ЛСС.

**Ключевые слова:** летающие сенсорные сети, синтез сетей связи, биоинспирированные алгоритмы, самоорганизация.

**Введение.** Летающие сенсорные сети включают, по крайней мере, два сегмента сети: наземный и летающий [1]. Наземный сегмент (рис. 1) состоит из множества независимых территориально-распределенных беспроводных сенсорных сетей (БСС), информация с которых собирается мобильными роботами (в большинстве приложений беспилотными летающими аппаратами — БПЛА и иногда наземными, надводными и подводными аппаратами). Кроме функций сбора информации мобильные роботы могут осуществлять: управление работой наземной БСС; точечное размещение, разбрасывание над территорией, перемещение, удаление и перепрограммирование узлов БСС; зарядку и замену источников питания и др.

Успехи в развитии электроники позволяют уже сегодня иметь в составе ЛСС большое количество мобильных узлов, размеры которых сопоставимы с размерами некоторых узлов наземного сегмента ЛСС. Так, например, некоторые доступные к приобретению мобильные узлы ЛСС весят 27 г и помещаются в ладонь взрослого человека.

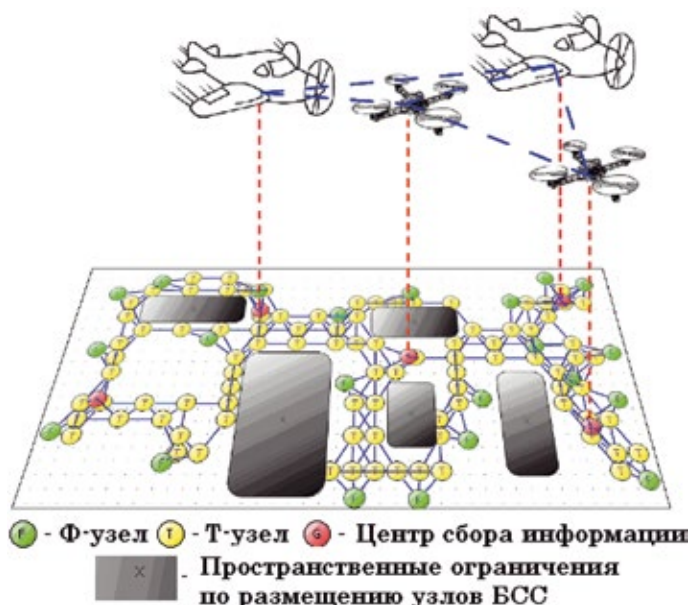


Рис. 1. Пример летающей сенсорной сети

Построение наземного сегмента ЛСС требует решения множества сложных проблем (рис. 2), относящихся к различным областям исследований [2]. В статье представлена модель наземной структуры ЛСС, в которой на функциональном уровне выделяются следующие виды узлов: функциональные узлы (Ф-узлы), осуществляющие сбор информации в некоторой окрестности точки размещения данного узла; транзитные узлы (Т-узлы), выполняющие управление маршрутизацией и передачу с помощью ретрансляции собранной Ф-узлами информации в центры сбора информации (ЦСИ) для ее дальнейшего использования; ЦСИ, осуществляющие управление БСС и обработку собранных БСС данных. В общем случае БСС может иметь несколько ЦСИ, и информация, поступившая в каждый из них, доступна для использования одним или несколькими пользователями для принятия решений и выполнения определенных действий [3].



Рис. 2. Некоторые проблемы, возникающие при построении наземной структуры ЛСС

**Построение летающей сенсорной сети.** Процесс построения ЛСС достаточно сложен. К настоящему времени разработан ряд методов и алгоритмов решения отдельных задач, возникающих в процессе построения ЛСС. Однако сам процесс не формализован в виде жесткого набора правил, алгоритмов и стандартов, выполнение которых гарантирует построение ЛСС, удовлетворяющей требованиям проектировщика.

На базе функциональной схемы процесса проектирования отказоустойчивых БСС [4] и исследований, проведенных в [3–8 и др.], на рис. 3 предлагается упрощенная

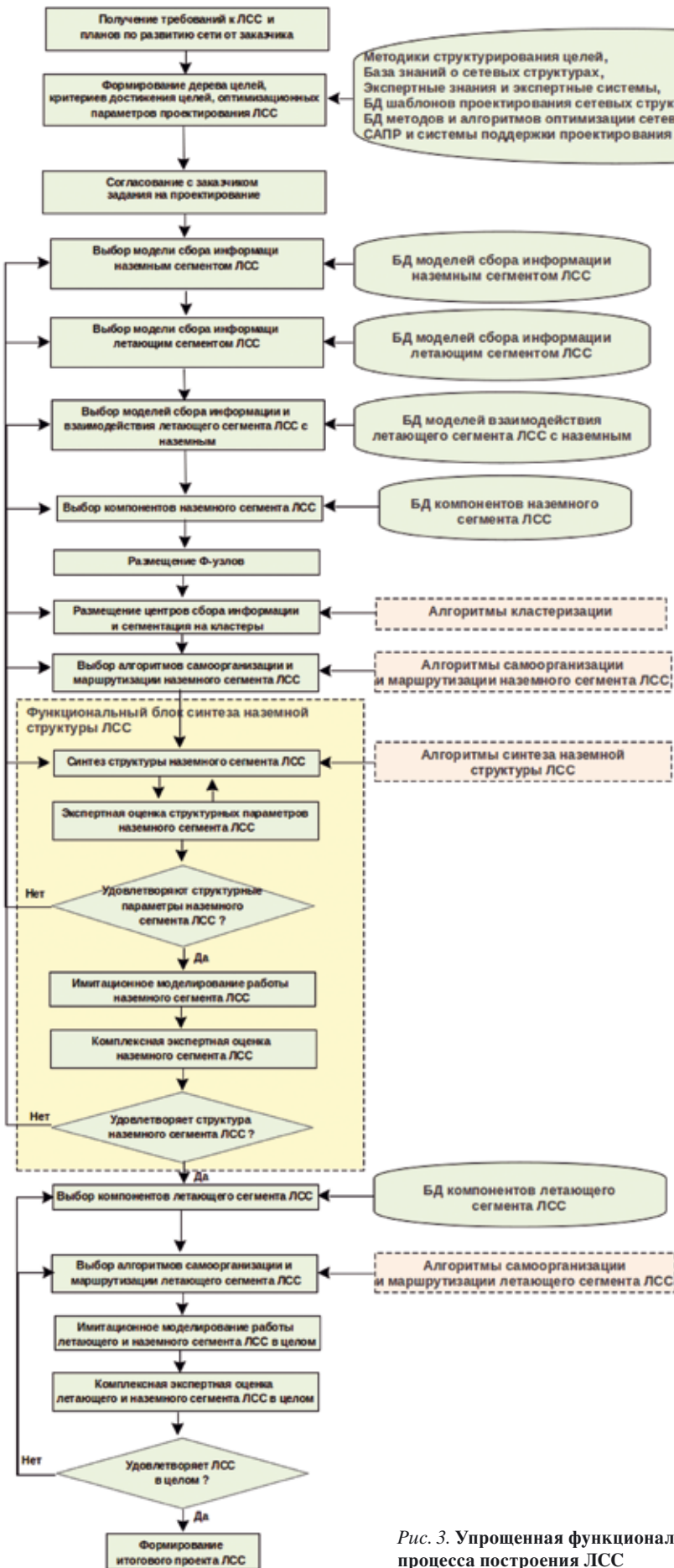


Рис. 3. Упрощенная функциональная схема процесса построения ЛСС

функциональная схема процесса построения ЛСС.

**Синтез наземной структуры ЛСС.**

На рис. 3 отмечен функциональный блок синтеза структуры наземного сегмента ЛСС (ФБ-ССНС-ЛСС), основной задачей которого является такое размещение Т-узлов, при котором синтезируемая структура сети удовлетворяла бы требованиям и целям проектирования, т.е. обладала бы «желаемыми свойствами» для проектировщика.

На основе полученных требований к ЛСС от заказчика и планов по развитию сети формируется дерево целей проектирования ЛСС, критерии достижения целей и оптимизационные параметры проектирования ЛСС. Концепция «дерева целей» впервые была предложена Ч. Черчменом и Р. Акоффом в 1957 г. На рис. 4 показано обобщенное дерево целей, в листовых узлах которого формируются простые задачи. При проектировании сетей связи очень часто простыми задачами становятся требования по достижению заданных порогов оптимизационных параметров.

В качестве примеров оптимизационных параметров можно привести [9]: вероятность связности Ф-узлов с ЦСИ; коэффициент готовности сети; параметры живучести (например, число и доля прерванных или действующих соединений, математическое ожидание и средняя доля числа погибших или выживших узлов после виртуальной атаки на дуги или узлы); общее время работы сети до момента ее отказа; потребляемая сетью/узлами энергия за фиксированный интервал времени; время доставки сообщений от Ф-узлов в ЦСИ; время доставки сообщений от ЦСИ узлам в произвольный момент времени; время самовосстановления сети после отказов узлов; коэффициент доверия собираемым сетью данным; коэффициент избыточности передаваемых данных; площадь покрытия и плотность размещения Т-узлов БСС; показатели защищенности сети (например, уязвимость сети/узлов к атакам, среднее время на устранение уязвимости, количество уязвимостей сети, критичность атакующих действий и угроз); денежная стоимость сети; денежные затраты на размещение и эксплуатацию сети и др.

Дерево формирований целей проектирования ЛСС строится на базе методик структурирования целей, баз знаний о сетевых структурах, экспертных знаний и экспертных систем, баз данных шаблонов проектирования се-



Рис. 4. Дерево целей

тевых структур, баз данных методов и алгоритмов оптимизации сетевых структур, специализированных САПР и систем поддержки проектирования ЛСС.

Исходные данные ФБ-ССНС-ЛСС: расположение и тип Ф-узлов и ЦСИ (рис. 5); описание объекта, на котором должен находиться наземный сегмент ЛСС (его размеры, схема, пространственные ограничения по размещению Т-узлов, препятствия для распространения электромагнитных волн и характеристики этих препятствий); типы доступных к использованию Т-узлов и их характеристики; применяемые алгоритмы самоорганизации и маршрутизации; модель сбора информации и взаимодействия летающего сегмента ЛСС с наземным; функциональные требования; оптимизационные параметры; нечеткие экспертные системы и др.

В последние годы активно развивается научное направление *Natural Computing* — «Природные вычисления», объединяющее математические методы, в которых заложены принципы природных механизмов принятия решений [10]. Для решения различных оптимизационных задач, для которых не существует точного решения, либо пространство их поиска очень велико и имеются сложные ограничения целевой функции и NP-полнота, ученые разработали био-

инспирированные алгоритмы (БА) [11–18 и др.], моделирующие поведение животных.

Описанные рекомендации по применению БА и доказательство в [19] того, что даже ограниченный вариант задачи минимального покрытия на плоскости является NP-полным позволяют сделать вывод о возможности применения самоорганизующихся БА для синтеза наземной структуры самоорганизующейся ЛСС.

Биоинспирированные алгоритмы рассматриваются как многоагентные системы, в которых каждый агент функционирует автономно по очень простым правилам [13]. К наиболее часто используемым биоинспирированным агентам (Б-агентам) относятся: муравьи, пчелы, термиты, светлячки, птицы, рыбы, летучие мыши, кошки, волки и др. (рис. 6).



Рис. 6. Примеры известных БА

Развитием работ [6, 7] стала предлагаемая на рис. 7 функциональная схема многоагентного биоинспирированного синтеза наземной структуры ЛСС, в основе которой лежит использование Б-агентами общей глобальной памяти хранимого феромона (ОГПХФ), т.е. ОГПХФ

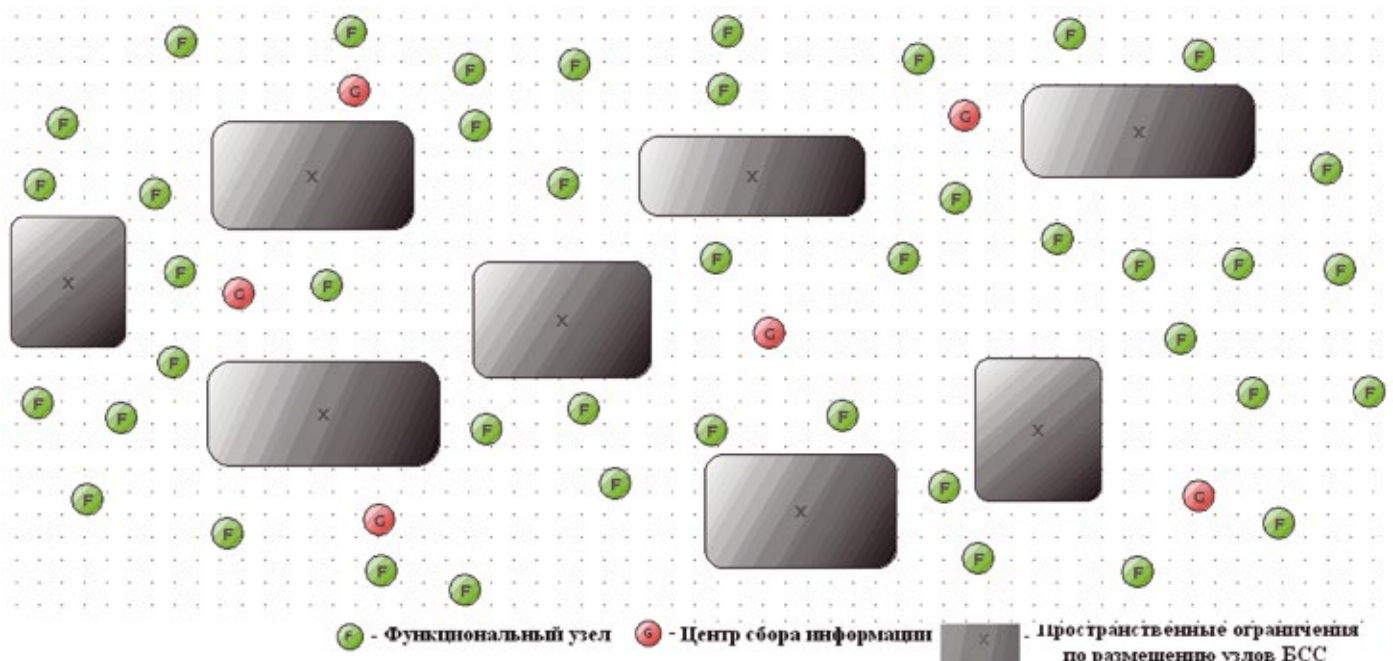


Рис. 5. Пример расположения Ф-узлов и ЦСИ

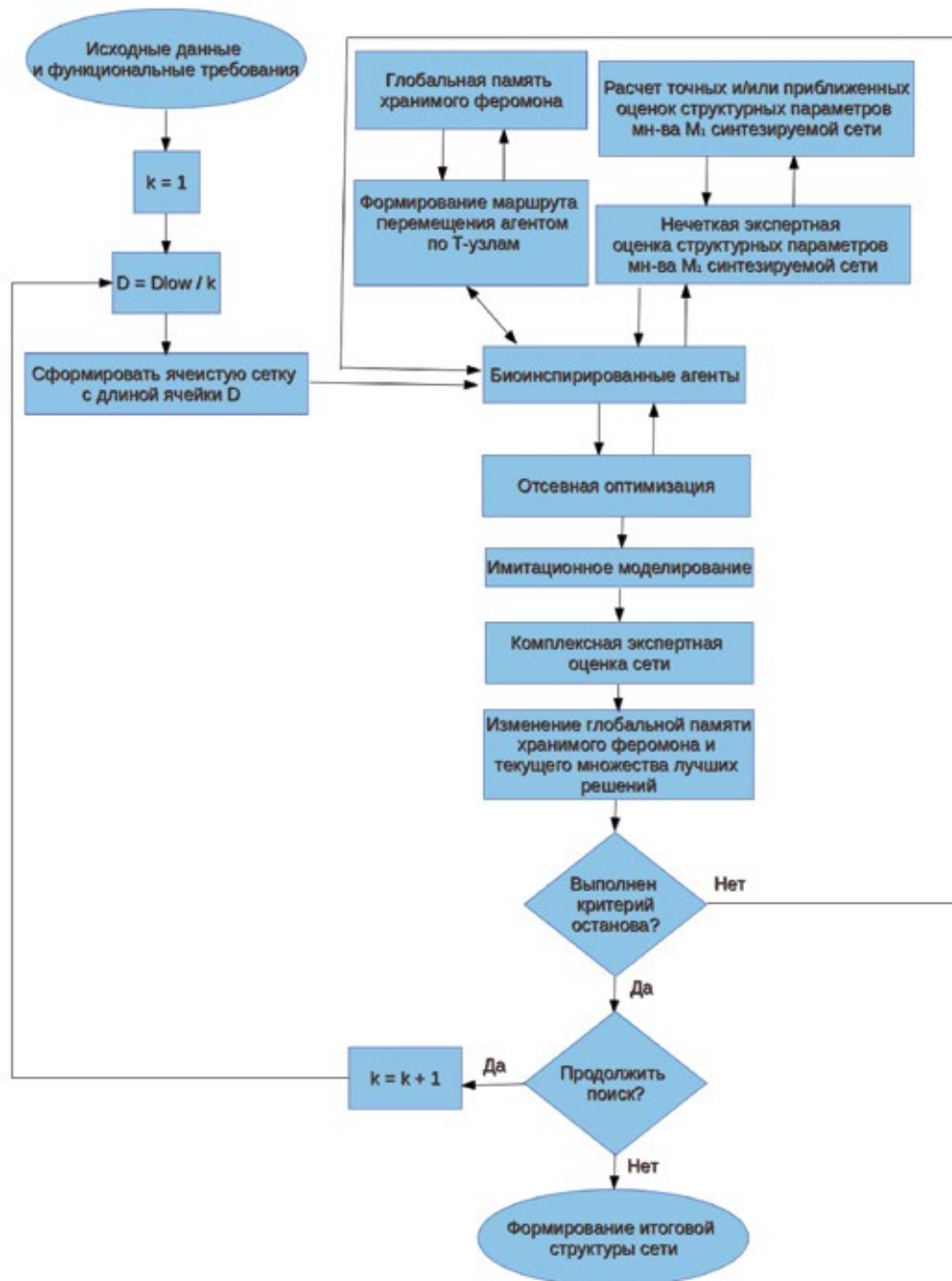


Рис. 7. Функциональная схема многоагентного биоинспирированного синтеза наземной структуры ЛСС

выступает хранилищем знаний (опыта) для всех Б-агентов. Для применения нижеприведенной схемы требуется для каждого типа Б-агента определить правила перемещения по Т-узлам и учесть в этих правилах использование ОГПХФ.

**Шаг 1.** В соответствии с методом синтеза в разнородном пространстве структуры БСС [5] выбрать: функцию оценки вероятности наличия беспроводного канала с требуемыми свойствами в разнородном пространстве между двумя произвольными Т-узлами, находящимися в произвольных точках А и В соответственно; множество  $M_{ALL}$  всех оптимизационных параметров; функции принадлежности нечетких множеств, характеризующих оптимизационные параметры  $M_{ALL}$ ; функции расчета параметров  $M_{ALL}$ ; подмножество оптимизационных параметров  $M_1 \subset M_{ALL}$ ; нечеткие экспертные системы, приведенные на рис. 7.

**Шаг 2.** Создать пустое множество лучших решений  $\Omega_{BEST}$ . Определить максимальное количество решений  $b_K$ , которые будут храниться в  $\Omega_{BEST}$ .

**Шаг 3.** Создать переменную  $k$  для изменения плотности размещения Т-узлов ячеистой сетки и инициализировать значением 1 ( $k = 1$ ); вычислить наименьшую дальность  $D_{LOW}$  уверенной передачи радиосигнала среди всех узлов (Ф-узлов, Т-узлов и ЦСИ).

**Шаг 4.** Установить стороны ячейки  $D = D_{LOW}/k$ . В оперативной памяти сформировать ячеистую сетку, покрывающую объект размещения БСС. В каждую ячейку сетки разместить по одному Т-узлу каждого типа. Могут быть использованы ячеистые сетки, показанные на рис. 8. Равносторонний треугольник является наиболее подходящей ячейкой для покрывающей сетки. Далее создать пустое множество  $\Omega_T$  и добавить в него все Т-узлы ячеистой сетки.

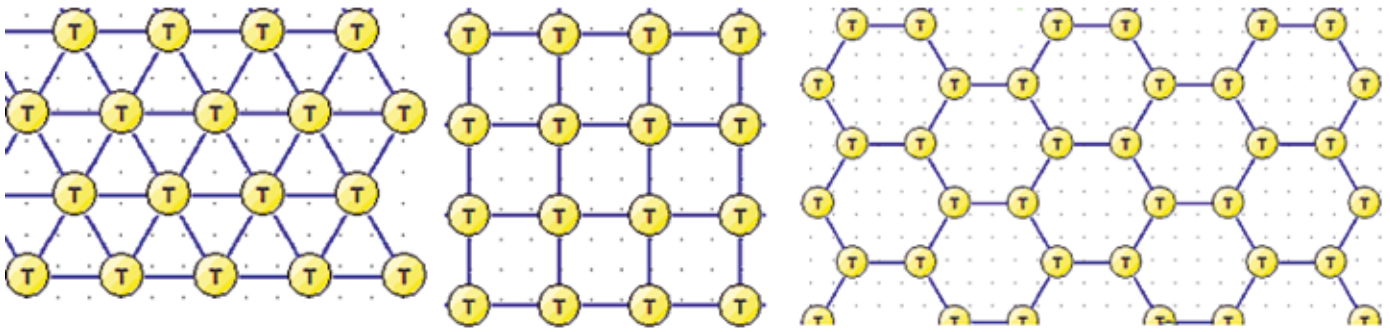


Рис. 8. Доступные к использованию ячеистые сетки

Лауреат Нобелевской премии по физиологии и медицине Карл фон Фриш анализировал причины выбора пчелами ячеек шестиугольной формы и отметил, что «при круглых, восьми- или пятиугольных ячейках остается неиспользованное пространство, кроме того, каждая ячейка должна была бы целиком или частично иметь собственные стенки, то есть потребовался бы лишний строительный материал (рис. 9). При трех-, четырех- или шестиугольных ячейках оба эти недостатка отпадают. Однако из всех трех равных по площади геометрических фигур шестиугольники имеют наименьший периметр. Поэтому для постройки шестиугольных ячеек при одной и той же вместимости требуется наименьшее количество строительного материала» [20].

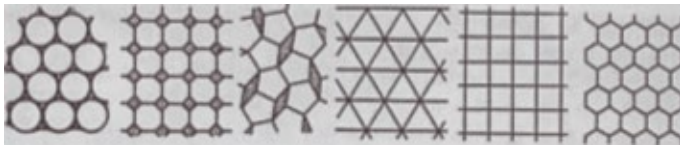


Рис. 9. Почему пчелы используют шестиугольные ячейки?

Создать глобальную память хранимого феромона. Феромон хранится на ребрах полносвязного неориентированного взвешенного графа (ПНВГ), узлами которого являются Т-узлы. Инициализировать значение следа феромона (массива *feromoneNetwork*) на всех ребрах графа константой [6].

**Шаг 5.** Выполнить многоагентные БА. Считаем, что имеется функция  $C(n)$  многокритериальной оценки в интервале  $[0, 1]$  пригодности Т-узла любого типа. Есть функция  $F_L(k)$  выбора для очередного  $k$ -го агента множества  $\Omega_{Lk}$  любимых типов Т-узлов.

**А.1.** Создать двумерный массив *feromoneDif* для хранения изменений феромона. Все значения *feromoneDif* инициализировать нулем.

Определить количество различных Б-агентов  $m$  и стратегию выбора начального расположения агента и другие параметры, необходимые для выполнения работы агентом.

**А.2.** Для каждого агента выполнить нижеприведенные шаги (программный код может быть распараллелен, т.е. для каждого агента выполняться в отдельном потоке).

**А.2.1.** Сформировать с помощью правил движения агента, ОГПХФ, функций  $C(n)$  и  $F_L(k)$  маршрут  $M_T$  (массив) перемещения агентом по Т-узлам  $\Omega_T$ .

**А.2.2.** Создать пустой расширяемый массив Т-узлов  $M_{STR}$ , в который будут помещаться Т-узлы синтезируемой структуры.

**А.2.3.** Выбрать стратегию синтеза:

а) последовательное добавление Т-узлов в сеть. Перейти к шагу А.2.4;

б) последовательное удаление Т-узлов из сети. Добавить в  $M_{STR}$  все узлы из массива  $M_T$  в таком же порядке следования. Перейти к шагу А.2.11.

**А.2.4.** Создать пустое множество  $H_p$ . В него будут помещаться кэши таких внутренних параметров функций вычисления оценок  $M_1$ , которые позволят увеличить скорость вычисления оценок  $M_1$  на следующей итерации. Создать переменную  $i$ , хранящую индекс текущего Т-узла из массива  $M_T$ , и инициализировать ее значением 0 ( $i = 0$ ). Принять текущим узел  $T_C$  ( $T_C = M_T[0]$ ),

**А.2.5.** Добавить в  $M_{STR}$  Т-узел  $T_C$ . Сформировать из Т-узлов  $M_{STR}$  структуру сети  $S_S$ .

**А.2.6.** Вычислить с применением кэшей  $H_p$  оценки значений оптимизационных параметров множества  $M_1$  структуры  $S_S$ . Очистить  $H_p$ . Кэши внутренних параметров функций вычисления оценок  $M_1$  текущей итерации сохранить в множестве  $H_p$ .

**А.2.7.** С помощью нечеткой экспертной системы вычислить коэффициент достоверности  $K_{D1}$  удовлетворения требований проектировщика к параметрам множества  $M_1$  структуры  $S_S$ .

**А.2.8.** Если  $K_{D1} > p_1$ , где  $p_1$  — установленный порог, то перейти к шагу А.2.11.

**А.2.9.** Если  $i < |M_T|$ , то положить  $i = i + 1$  и принять в качестве текущего следующий Т-узел  $T_C = M_T[i]$ . Повторять шаги А.2.5–А.2.9 пока  $i$  не станет равным  $|M_T|$ .

**А.2.10.** Выйти с уведомлением о неудаче из функции синтеза агентом структуры сети.

**А.2.11.** Шаги выполнения отсечной оптимизации.

**А.2.11.1.** Выбрать стратегию отсечной оптимизации:

а) пошаговая оптимизация с учетом оптимизационных параметров  $M_1$ . Используется нечеткая экспертная оценка структурных параметров  $M_1$ ;

б) пошаговая оптимизация с учетом всех оптимизационных параметров  $M_{ALL}$ . Используется блок имитационного моделирования и комплексной оценки сети.

**А.2.11.2.** Перевернуть массив  $M_{STR}$ .

**А.2.11.3.** В цикле каждый Т-узел  $T_O \in M_{STR}$  временно изъять из  $M_{STR}$ , после чего вычислить коэффициент достоверности  $K_D$  удовлетворения требований параметров стратегии отсечной оптимизации. Если без временно изъятго Т-узла  $T_O$  оценка структуры сети перестает удовлетворять требованиям проектировщика, то вернуть  $T_O$  в  $M_{STR}$  в место изъятия.

**А.2.11.4.** Перевернуть массив  $M_{STR}$ .

**А.2.12.** Осуществить имитационное моделирование работы сети. Результаты моделирования и структурно-параметрические оценки различных параметров поступают на вход комплексной экспертной системы оценки структуры сети, с помощью которой вычислить коэффициент досто-

верности  $K_{DALL}$  удовлетворения всех требований проектировщика.

А.2.13. Если  $K_{DALL} > 0$ , то в соответствии с одной из нижеприведенных стратегий увеличить феромон в массиве *feromoneDif*:

а) последовательное обновление — увеличить количество феромона на ребрах последовательного прохода агента по Т-узлам  $M_{STR}$  на величину равную  $\Delta\tau_{ij,k}(t) = Q_{agent}K_{DALL}$ , где  $Q_{agent}$  — количество феромона, выделяемое агентом на одном ребре;

б) полносвязное обновление — увеличить количество феромона на всех ребрах полносвязного графа, построенного на основе Т-узлов  $M_{STR}$  на величину равную  $\Delta\tau_{ij,k}(t) = Q_{agent}K_{DALL}$ .

А.2.14. Если  $K_{DALL}$  больше оценки самого худшего решения из  $\Omega_{BEST}$  или ( $|\Omega_{BEST}| < b_K$  и  $K_{DALL} > 0$ ), то добавить в  $\Omega_{BEST}$  текущее решение. Под решением понимается пара  $(M_{STR}, K_{DALL})$ . Если  $|\Omega_{BEST}| \geq b_K$ , то оставить в  $\Omega_{BEST}$  только  $b_K$  лучших решений.

А.3. После того как все агенты выполняют Шаг А.2 обновить ОГПХФ (массив *feromoneNetwork*) в соответствии с известным правилом [17]:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t),$$

где  $\Delta\tau_{ij}(t)$  — количество феромона на ребре  $(i, j)$  в массиве изменений феромона *feromoneDif*,  $p \in [0, 1]$  — коэффициент испарения феромона. Для усиления промежуточных лучших решений следует увеличивать количество феромона на ребрах маршрутов лучших решений  $\Omega_{BEST}$  (в качестве примера можно привести использование «элитных» муравьев [18]).

А.4. Если критерий останова не выполнен, то перейти к шагу А.1.

Шаг 6. Если требуется продолжить поиск, то увеличить  $k$  ( $k = k + 1$ ) и перейти к шагу 4.

Шаг 7. Вернуть лучшее решение из  $\Omega_{BEST}$ .

**Заключение.** Приведенная в работе обобщенная схема многоагентного биоинспирированного синтеза наземной структуры ЛСС программно реализована на языке *Java*. Результаты исследований показали возможность совместного использования различных моделей самоорганизации животных для решения некоторых задач, возникающих в процессе построения самоорганизующихся летающих сенсорных сетей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N15-07-09431a «Разработка принципов построения и методов самоорганизации для летающих сенсорных сетей».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В. и др. Летающие сенсорные сети // Электросвязь. — 2014. — № 9. — С. 2–5.
2. Мочалов В. А., Пшеничников А. П. Принципы построения и функционирования сенсорных сетей связи. Учебное пособие. — М.: МТУСИ, 2014. — 56 с.
3. Мочалов В. А., Турута Е. Н. Построение отказоустойчивой структуры беспроводной сенсорной сети с учетом отказов

- центров сбора информации / Труды IS&IT'12. Научное издание в 4-х томах. — М.: Физматлит, 2012. — Т. 2. — С. 214–222.
4. Мочалов В. А., Турута Е. Н. Функциональная схема процесса проектирования беспроводных сетей мониторинга // Датчики и системы. — 2010. — № 2. — С. 40–44.
5. Мочалов В. А. Метод синтеза отказоустойчивой структуры сенсорной сети при наличии ограничений по размещению узлов сети в разнородном пространстве // T-Comm. — 2012. — № 10. — С. 71–75.
6. Мочалов В. А. Гибридный бионический алгоритм синтеза структуры беспроводной сенсорной сети // T-Comm. — 2013. — № 10. — С. 72–77.
7. Мочалов В. А. Адаптация поведения «цветочное постоянство» пчел для синтеза гетерогенной структуры беспроводной сенсорной сети / Материалы 2-го междунар. Поспеловского симпозиума «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы». — Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2014. — С. 231–238.
8. Мочалов В. А. Алгоритмы увеличения общего времени работы сенсорной сети до момента ее отказа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2010. — № 7. — С. 12–19.
9. Мочалов В. А., Князев К. С. Некоторые оптимизационные параметры построения беспроводной сенсорной сети / Труды конф. «Телекоммуникационные вычислительные системы» (МФИ-2013). — 2013. — С. 136–137.
10. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. — 2003. — № 4. — С. 70–75.
11. Bonavear F., Dorigo M., Theraulaz G. Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems / New York, Oxford University Press. — 1999. — 320 p.
12. Teodorovic D. Bee Colony Optimization (BCO) / URL: <http://www.sf.bg.ac.rs/downloads/katedre/oi/1.BCO-Book-Chapter.pdf>
13. Кажаров А. А., Курейчик В. М. Биоинспирированные алгоритмы. Решение оптимизационных задач / LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 80 p.
14. Лебедев В. Б. Модели адаптивного поведения колонии пчел для решения задач на графах // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2012. — № 7. — С. 42–49.
15. Wong L., Low M. Y. H., Chong C. An Efficient Bee Colony Optimization Algorithm for Traveling Salesman Problem using Frequency-based Pruning / Industrial Informatics, 7th IEEE International Conference, 23–26 June 2009. — P. 775–782.
16. Карпенко А. П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых малоизвестных алгоритмов // ИТ: Приложение к журналу «Информационные технологии». — 2012. — № 7. — С. 1–32.
17. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms (in Italian) / PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, Italy. — 1992.
18. Кажаров А. А. Модификация муравьиного алгоритма и его применение к задаче коммивояжера // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. — 2007. — № 04 (32).
19. Fowler R. J., Paterson M. S., Tanimoto S. L. Optimal packing and covering in the plane are NP-complete // Inf. Process. Lett. — 1981. — 12 (3) — P. 133–137.
20. Фриш К. Из жизни пчел. — М.: Мир, 1980. — 216 с.

Получено 15.05.15