

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАРШРУТИЗАЦИИ В КЛАСТЕРИЗОВАН- НОМ РОЕ БПЛА с использованием генетического алгоритма

Навар Мохаммад, аспирант МТУСИ / nawar.info@gmail.com,
Л.И.Воронова, д.ф.-м.н., заведующая кафедрой МТУСИ / voronova.lilia@ya.ru,
В.И.Воронов, к.т.н., доцент МТУСИ / vorvi@mail.ru

УДК 621.391, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.114.6.46.52

Исследование посвящено проблеме маршрутизации данных, полученных от наземной беспроводной сенсорной сети, через рой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на базовую станцию. Используются генетические методы для реализации быстрого и надежного статического и динамического алгоритма маршрутизации. Алгоритм маршрутизации данных обеспечивает моделирование в трехмерной среде роя БПЛА, предварительно кластеризованного с использованием алгоритма К-средних в среде Anaconda. В качестве показателей эффективности используются зона покрытия, радиовидимость и местоположение БПЛА.

ВВЕДЕНИЕ

Рой БПЛА является типом летающей Ad-Hoc-сети (англ. Flying Ad-Hoc Network – FANET), состоящей из летающих узлов, таких как дроны, или БПЛА [1, 2]. Сеть роя БПЛА характеризуется динамической топологией, ограниченными дальностью связи и пропускной способностью. Информационная связь в рое дронов осуществляется беспроводным способом.

Маршрутизация в составе роя БПЛА относится к процессу определения оптимального маршрута для передачи данных между дронами в рое. Эффективная маршрутизация важна для успешной работы роя, позволяя БПЛА в рое общаться и передавать данные между собой [3].

Динамический характер топологии сети, связанный с постоянным движением дронов в рое и ограниченностью используемых ресурсов, таких как зона покрытия отдельного узла, делает рассматриваемую маршрутизацию сложной задачей. Проблеме маршрутизации данных в рое беспилотных летательных аппаратов и беспроводных сенсорных сетей посвящено много исследований, проведенных на кафедре ИСУиА в МТУСИ [4, 5, 6, 7, 8] и в других организациях [9, 10, 11, 12, 13, 14].

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

В горной местности, не входящей в зону покрытия БПЛА, на площади 25 кв. км распределены датчики

Таблица 1. Сравнение типов БПЛА

Модель	Радиус действия	Цена, руб.
3DR Solo	До 1 км	25 000
GoPro Karma	До 1 км	90 000
Xiro Xplorer	До 1 км	36 000
JJRC X19 pro	До 1 км	19 599
JJRC X12 Pro Aurora	До 3 км	18 990
Xiaomi Fimi X8 SE 2022 v2	До 1 км	39 990
WL Toys V383	До 500 м	18 200
SJRC F11 Pro 2K	До 1,2 км	17 730

наземной сенсорной сети, считывающие данные, связанные с характеристиками погоды и почвы, такими как температура воздуха, атмосферное давление, влажность, интенсивность света, pH почвы, влажность почвы, а также обнаруживающие углекислый газ и дым. Информация, собранная в наземной сети, передается через источник/базовую станцию к рою БПЛА, в котором происходит маршрутизация и дальнейшая передача данных к шлюзу/базовой станции.

Для покрытия территории 5×5 кв. км случайным образом распределяется 25 БПЛА на высоте от 500 до 600 м, при этом БПЛА перемещаются в фиксированных непересекающихся областях размером 1000×1000×100 м. Каждый БПЛА оснащен блоком GPS (Global Positioning System) для определения своего местоположения во время полета и имеет радиус радиовидимости 2000 м [17].

В табл.1 приведена информация о дальности действия и цене БПЛА нескольких типов. Анализ данных таблицы показывает, что лучшим выбором будет дрон JJRC X12 Pro Aurora, поскольку он может подниматься на высоту 500 м и его цена приемлема.

Для передачи данных между сенсорами наземной сети на расстояние до 100 м используется технология стандарта IEEE 802.14 (ZigBee). Этот стандарт характеризуется низким энергопотреблением и высокой надежностью.

Для передачи данных между роем БПЛА и базовыми станциями (источником и шлюзом) на расстояние до 5 км применяется технология стандарта IEEE 802.16e (WiMax).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Имеется m БПЛА с координатами $(X_{\text{бпла}}, Y_{\text{бпла}}, Z_{\text{бпла}})$, распределенных в заданной области. Выполняется кластеризация с использованием алгоритма К-средних, в результате формируется N кластеров, в каждом из которых определяется головной кластерный узел (ГКУ) БПЛА с координатами $(X_{\text{гку}}, Y_{\text{гку}}, Z_{\text{гку}})$. В полученном массиве ГКУ необходимо определить последовательность БПЛА, с помощью которой будет формироваться оптимальный путь для передачи данных от источника с координатами $(X_{\text{источник}}, Y_{\text{источник}}, Z_{\text{источник}})$ до шлюза с координатами $(X_{\text{шлюз}}, Y_{\text{шлюз}}, Z_{\text{шлюз}})$ с использованием генетического алгоритма [23, 24]. Первоначально, для нахождения кратчайшего пути должно быть сформировано потенциальное решение "хромосома", на основании которого строится начальная популяция, содержащая все возможные пути/хромосомы из ГКУ БПЛА.

Метод К-средних

Метод К-средних основан на вычислении евклидовых расстояний между парами БПЛА и формированием кластеров, с последующим определением ГКУ каждого кластера.

В качестве меры близости используется евклидово расстояние:

$$P(x, y) = |x - y| = \sqrt{(x_p - y_p)^2}, p = 1 \dots n, x, y \in R^n, \quad (1)$$

$$(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(i)}, \dots, x^{(m)}), x^{(i)} \in R^n.$$

Алгоритм К-средних реализуется следующим образом:

- инициализировать K-центры кластеров;
- повторить
 {For i = 1 to m
 $c^{(i)}$ = индекс (от 1 до K) центра кластера, ближайшего к $x^{(i)}$.
 For k = 1 to K
 μ_k = среднее количество точек, отнесенных к кластеру K};
- определить значение функции стоимости J как сумму квадратов расстояний между текущей точкой и ближайшими центрами кластеров. Минимизация функции стоимости выполняется путем поиска нового набора центров кластеров на каждой итерации:

$$J(c^{(1)}, \dots, c^{(m)}, \mu_1, \mu_k) = 1/m \sum |x^{(i)} - \mu_{c(i)}|^2, i=1...m; \quad (2)$$

- выбрать кластеризацию с наименьшей стоимостью J;
- алгоритм завершается, когда центры кластеров не изменяются.

Генетический алгоритм

Для работы с генетическим алгоритмом необходимо учитывать три матрицы: радиовидимости, расстояний, стоимости.

Матрица радиовидимости P должна иметь размерность (N x N), где N – количество головных кластерных узлов (ГКУ), и может быть представлена в виде:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 0 & \dots & P_{2j} & \dots & d_{2n} \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & 0 & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nj} & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $P_{ij} = 1$ означает, что между двумя узлами (i и j) есть соединение,

$P_{ij} = 0$ означает, что соединения нет.

Матрица расстояний также должна иметь размерность (N x N), которая рассчитывается с использованием евклидова расстояния по формуле (1). Эта матрица может быть представлена следующим образом:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2j} & \dots & d_{2n} \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & 0 & \dots & d_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где d_{ij} – расстояние между узлом i и соответствующим узлом j.

Для отбора наилучших маршрутов в методе используется функция пригодности G, которая определяет способность маршрута конкурировать с другими маршрутами. Это так называемая "фитнес-оценка" или "стоимость" каждого маршрута. Вероятность того, что маршрут будет выбран для размножения, зависит от его фитнес-оценки.

Функцию пригодности G можно построить на основе матрицы стоимости F, которая является произведением матрицы радиовидимости на матрицу расстояний. F содержит ненулевые значения только в тех ячейках, где записаны расстояния между узлами (ГКУ БПЛА), имеющими связь. Матрица стоимости F может быть представлена следующим образом:

$$F = D \times P. \quad (5)$$

Поскольку лучший путь в популяции выбирается по наименьшему значению функции пригодности, то используется классический прием увеличения стоимости для "негодных" маршрутов. К таким относятся маршруты/хромосомы, включающие нулевые элементы, то есть такие, где между узлами i, j нет связи или это ячейка с индексами i, j. В этом случае в матрице стоимости применяют штрафы с целью увеличения значений функций пригодности. В итоге матрица стоимости может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} F &= F_{ij}, \text{ если } P_{ij} \neq 0, \\ F &= F_{ij} + \text{штраф}, \text{ если } P_{ij} = 0, \\ F &= 0, \text{ в случае } i = j, \end{aligned} \quad (6)$$

где штраф применяется к любым двум ГКУ БПЛА, которые не имеют связи или связаны "сами с собой", и должен быть большим.

Кодирование хромосомы

Код хромосомы представляют в виде последовательности генов, где каждый ген – это целое число, которое указывает на ГКУ БПЛА, участвующий в построении пути. Таким образом, длина последовательности – это количество ГКУ БПЛА, составляющих кратчайший путь от источника до шлюза.

На рис.1 для примера показан путь, сформированный при маршрутизации. В этом примере

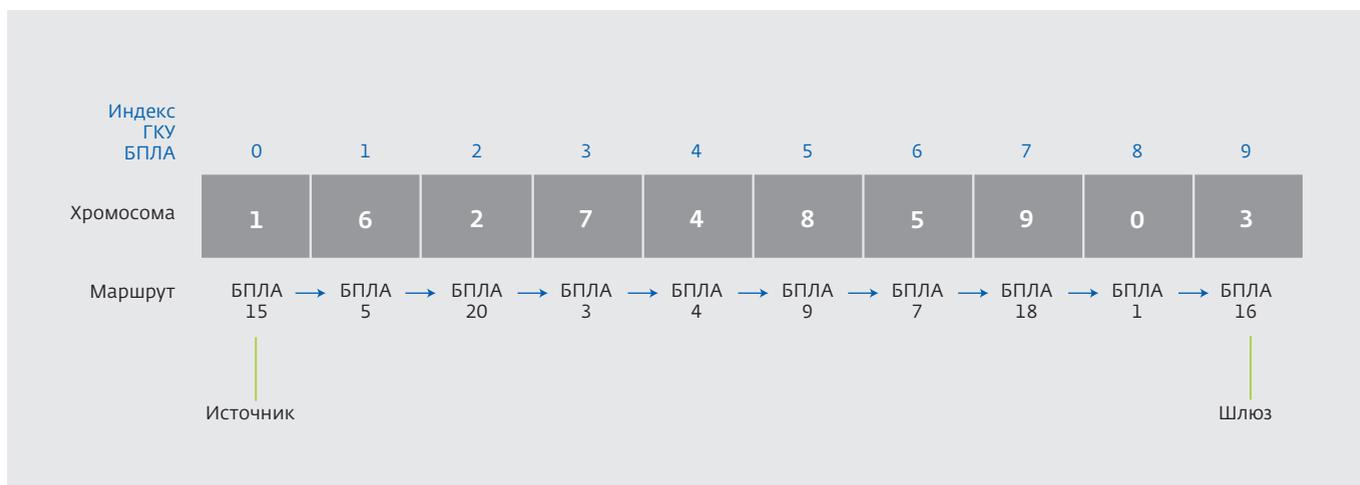


Рис.1. Пример результата формирования маршрута в "хромосоме"

значения гена в позициях от 0 до 1 – это ГКУ БПЛА, формирующие путь от источника в позиции 0 (БПЛА 15) до шлюза в позиции 9 (БПЛА 16) [15].

В зависимости от набора и позиции генов в хромосоме устанавливается маршрутизация в сети БПЛА. С помощью такого представления можно генерировать различные маршруты случайным образом для начальной популяции путем выбора нескольких возможных путей между источником и шлюзом. Количество путей, которые можно получить перебором, очень велико, и поэтому для выбора кратчайшего пути за короткое время предлагается использовать генетический алгоритм [16].

В данной работе используется турнирный метод для отбора родительских особей при формировании новых путей, который включает скрещивания, мутации и отбор наилучших путей с помощью функции пригодности.

Скрещивания

Для улучшения качества отбора кратчайшего пути используется скрещивание для формирования нового пути. В этом случае у каждой пары маршрутов случайным образом выбирается одна точка скрещивания (фактор одноточечного скрещивания), в которой между ними происходит обмен генами. Повторяющиеся гены удаляются.

Мутации

Этот процесс используется для изменения значения гена в хромосоме на случайно выбранное значение от 0 до N-1, где N – количество ГКУ БПЛА,

образующих путь. Мутация позволяет включить новый ГКУ БПЛА в маршрут, а другой ГКУ БПЛА удалить с пути.

Функция пригодности

Функция пригодности G – это критерий, определяющий качество сформированного пути. В этой работе $G_{(m)}$ зависит от радиовидимости каждого ГКУ БПЛА и его зоны покрытия относительно остальных ГКУ БПЛА, а также расстояния между каждыми двумя узлами ГКУ БПЛА.

$$G_{(m)} = \sum F_{ij}, \quad (7)$$

i, j узлы \in маршруту m ,

где $G_{(m)}$ – пригодность маршрута m ,
 F_{ij} – стоимость ячеек между узлом i и узлом j .

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Авторами проведено исследование маршрутизации в рою 25 БПЛА, случайно распределенных в трехмерном пространстве заданного объема с ограничениями, описанными в статье [5].

Эксперименты проводились в два последовательных момента времени t_0, t_1 , во время которых БПЛА изменили свое местоположение. В результате кластеризации роя БПЛА с помощью алгоритма K-средних в каждый момент времени формируется массив из 10 кластеров, содержащий информацию о номерах и координатах (x, y, z) БПЛА, являющихся ГКУ.

На основании этой информации рассчитывается матрица расстояний между БПЛА,

Начальная популяция:		Начальная популяция:	
Хромосома 0:	[1, 6, 2, 7, 4, 8, 5, 9, 0, 3] Пригодность: 506.47	Хромосома 0:	[7, 5, 0, 2, 4, 3, 9, 8, 1, 6] Пригодность: 603.97
Хромосома 1:	[1, 6, 8, 0, 2, 4, 9, 7, 5, 3] Пригодность: 703.55	Хромосома 1:	[7, 1, 8, 9, 2, 0, 3, 5, 4, 6] Пригодность: 604.20
Хромосома 2:	[1, 7, 5, 8, 2, 6, 0, 4, 9, 3] Пригодность: 605.40	Хромосома 2:	[7, 3, 2, 4, 1, 9, 8, 0, 5, 6] Пригодность: 506.62
Хромосома 3:	[1, 5, 0, 2, 4, 7, 6, 9, 8, 3] Пригодность: 506.39	Хромосома 3:	[7, 3, 4, 0, 9, 2, 8, 5, 1, 6] Пригодность: 604.88
Хромосома 4:	[1, 8, 6, 0, 9, 5, 4, 7, 2, 3] Пригодность: 702.55	Хромосома 4:	[7, 1, 4, 5, 0, 9, 2, 8, 3, 6] Пригодность: 702.48
Хромосома 5:	[1, 7, 6, 4, 8, 9, 2, 5, 0, 3] Пригодность: 407.39	Хромосома 5:	[7, 1, 5, 2, 9, 4, 8, 0, 3, 6] Пригодность: 605.08
Хромосома 6:	[1, 8, 2, 6, 0, 7, 5, 4, 9, 3] Пригодность: 703.06	Хромосома 6:	[7, 0, 2, 8, 5, 4, 9, 1, 3, 6] Пригодность: 505.13
Хромосома 7:	[1, 2, 0, 7, 8, 4, 9, 5, 6, 3] Пригодность: 801.31	Хромосома 7:	[7, 2, 9, 5, 1, 3, 4, 0, 8, 6] Пригодность: 604.82
Хромосома 8:	[1, 0, 9, 4, 5, 2, 7, 6, 8, 3] Пригодность: 505.65	Хромосома 8:	[7, 4, 8, 0, 9, 1, 2, 5, 3, 6] Пригодность: 605.28
Хромосома 9:	[1, 8, 6, 2, 0, 5, 4, 9, 7, 3] Пригодность: 604.44	Хромосома 9:	[7, 4, 9, 0, 3, 2, 8, 1, 5, 6] Пригодность: 408.05
Хромосома 10:	[1, 2, 7, 8, 0, 5, 4, 6, 9, 3] Пригодность: 604.36	Хромосома 10:	[7, 8, 3, 0, 9, 1, 5, 4, 2, 6] Пригодность: 407.94
Хромосома 11:	[1, 9, 8, 7, 0, 5, 6, 2, 4, 3] Пригодность: 506.50	Хромосома 11:	[7, 1, 9, 4, 5, 0, 2, 8, 3, 6] Пригодность: 406.41
Хромосома 12:	[1, 5, 6, 8, 0, 2, 4, 7, 9, 3] Пригодность: 605.49	Хромосома 12:	[7, 4, 9, 0, 2, 8, 1, 5, 3, 6] Пригодность: 505.10
Хромосома 13:	[1, 5, 9, 2, 0, 6, 4, 8, 7, 3] Пригодность: 703.25	Хромосома 13:	[7, 4, 8, 9, 2, 3, 5, 0, 1, 6] Пригодность: 605.47
Хромосома 14:	[1, 2, 5, 4, 0, 8, 9, 6, 7, 3] Пригодность: 506.08	Хромосома 14:	[7, 4, 9, 3, 8, 0, 2, 1, 5, 6] Пригодность: 406.93
Хромосома 15:	[1, 9, 4, 2, 0, 5, 8, 7, 6, 3] Пригодность: 506.39	Хромосома 15:	[7, 2, 4, 0, 1, 9, 3, 8, 5, 6] Пригодность: 506.11
Хромосома 16:	[1, 4, 8, 0, 9, 5, 2, 7, 6, 3] Пригодность: 407.55	Хромосома 16:	[7, 3, 8, 1, 0, 4, 5, 2, 9, 6] Пригодность: 702.99
Хромосома 17:	[1, 0, 8, 9, 7, 2, 5, 6, 4, 3] Пригодность: 605.06	Хромосома 17:	[7, 5, 4, 3, 1, 8, 0, 2, 9, 6] Пригодность: 702.43
Хромосома 18:	[1, 5, 2, 4, 6, 9, 0, 7, 8, 3] Пригодность: 506.85	Хромосома 18:	[7, 1, 3, 9, 5, 8, 0, 4, 2, 6] Пригодность: 407.83
Хромосома 19:	[1, 6, 4, 7, 9, 0, 8, 5, 2, 3] Пригодность: 506.86	Хромосома 19:	[7, 1, 2, 8, 5, 9, 3, 4, 0, 6] Пригодность: 505.59

Рис.2. Формирование начальной популяции из 20 хромосом: а – начальная популяция при t_0 ; б – начальная популяция при t_1

являющихся центрами кластеров (ГКУ), содержащая 40 неповторяющихся значений.

Затем рассчитывается матрица стоимости, используемая в функции пригодности после применения штрафа, указанного в формуле (6), где штраф составляет 100.

Для нахождения кратчайшего пути между источником и шлюзом применен генетический алгоритм, работающий в течение 100 поколений, а используемая начальная популяция состоит из 20 хромосом. Поскольку рабочая среда является динамичной и изменяющейся,

формирование хромосом вручную нецелесообразно. Авторами разработана программа, формирующая хромосомы автоматически. На рис.2. приведены последовательности генов в каждой из 20 хромосом, а также рассчитана функция пригодности для каждой хромосомы в начальных популяциях в момент времени t_0 и t_1 .

В процессе работы алгоритма в каждом поколении получены функции пригодности маршрутов и на их основе найдены лучшие хромосомы в популяциях. В результате работы алгоритма в момент времени t_0 получена лучшая хромосома/кратчайший путь {1, 5, 4, 3}, которая состоит из последовательности индексов ГКУ БПЛА, составляющих путь, то есть 1 – индекс ГКУ БПЛА, который равен UAV 15, и 5 – индекс БПЛА ГКУ, который равен UAV 7 и т.д. UAV15 – это ближайший ГКУ к источнику, а UAV16 – ближайший ГКУ к шлюзу. Также в момент времени t_1 получена лучшая хромосома/кратчайший путь {7, 4, 0, 6} (см. рис.3).

Маршрут интегрированного пакета с данными, полученными от наземной сети, начинается от источника (0, 0, 0), который передает данные в ближайший кластер главному узлу (UAV15 в момент времени t_0 и t_1) и последовательно до узла (UAV16 в момент времени

Решение: [1, 5, 4, 3]	Решение: [7, 4, 0, 6]
Пригодность: 4.63	Пригодность: 4.79
Маршрут: UAV15 -> UAV7 -> UAV4 -> UAV16	Маршрут: UAV15 -> UAV21 -> UAV20 -> UAV19

Рис.3. Результаты генетического алгоритма и получение кратчайшего пути: а – кратчайший маршрут при t_0 ; б – кратчайший маршрут при t_1

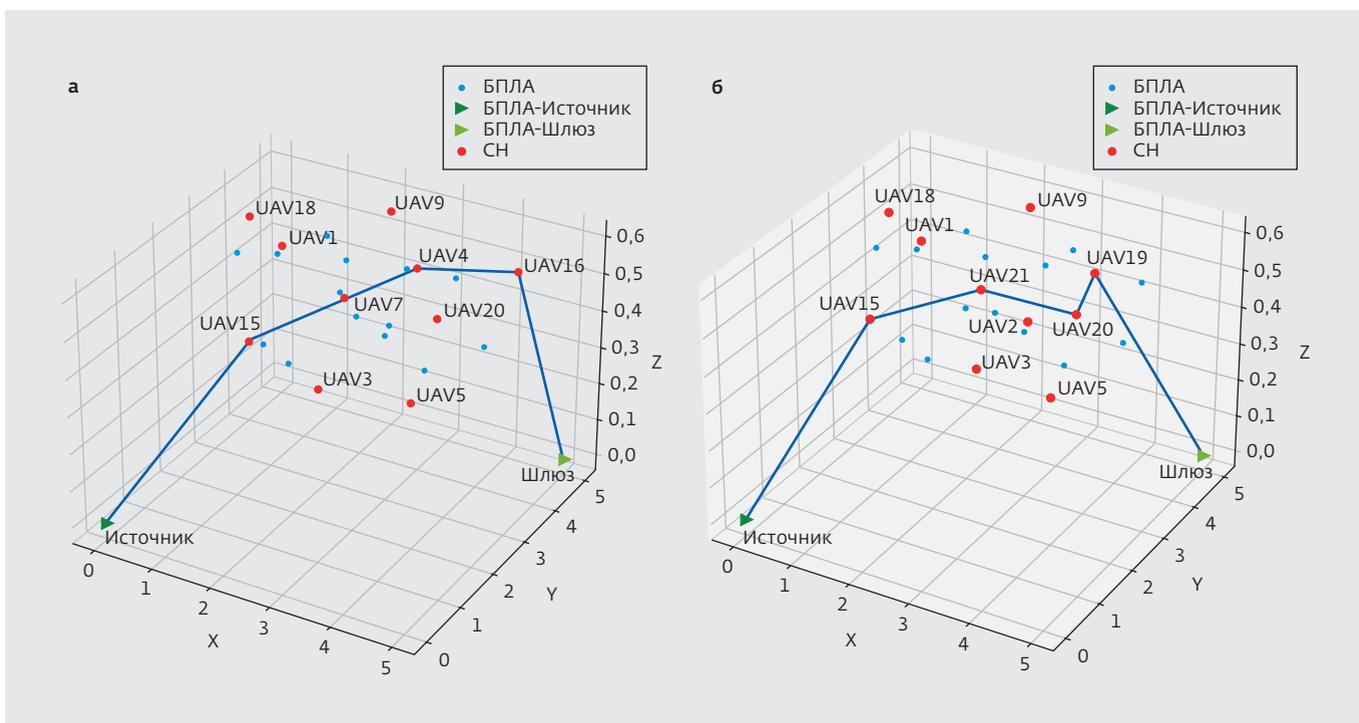


Рис.4. Визуализация результатов маршрутизации в 3D-пространстве: а – маршрут про t_0 ; б – маршрут про t_1

t_0 и UAV19 в момент времени t_1), который передает данные на шлюз (5, 5, 0), как показано на рис.4.

На рис.5 можно наблюдать изменение эффективности функции пригодности популяции, с довольно быстрым уменьшением при изменении поколений и выходом на плато фиксированного значения, которое не меняется и при котором формируется кратчайший путь в момент времени t_0 и t_1 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью методов интеллектуального анализа проведено компьютерное моделирование маршрутизации данных, полученных от наземной беспроводной сенсорной сети, через рой БПЛА на базовую станцию. По результатам кластеризации с помощью генетического алгоритма идентифицированы БПЛА, играющие роль главных кластерных узлов, участвующих в процессе формирования кратчайшего пути при маршрутизации в рое дронов.

В качестве показателей эффективности использовались зона покрытия, радиус радиовидимости и местонахождение БПЛА в процессе кластеризации и маршрутизации. Путем расчета эффективности функции пригодности для начальной популяции в два разных периода времени

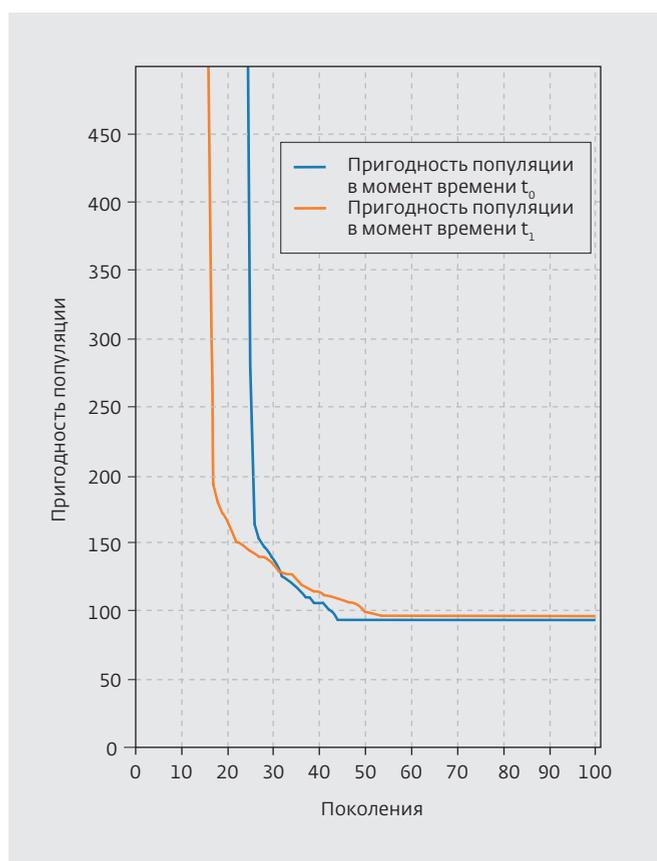


Рис.5. Эффективность функции пригодности популяции

t_0 и t_1 обнаружено, что поиск или формирование кратчайшего пути выполнено менее чем за 100 поколений.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о хорошей применимости генетического алгоритма для решения задачи маршрутизации в меняющейся динамической среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аблец А.А., Стребков А.Н., Завгородняя Е.В.** Опыт создания роя БПЛА в вооруженных силах иностранных государств // Военная мысль. 2022. № 6. С. 137–146.
2. **Киричек Р.В.** Разработка и исследование комплекса моделей и методов для летающих сенсорных сетей: дисс. ... докт. техн. наук: 05.12.13. Самара, 2018. 316 с.
3. **Леонов А.В.** Разработка адаптивного алгоритма маршрутизации на основе роевого интеллекта пчелиной колонии для самоорганизующихся сетей беспилотных летательных аппаратов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.13. Омск, 2020. 186 с.
4. **Mohammad N., Voronova L.I. and Voronov V.I.** Development of a simulation model for using a swarm of UAVs in agriculture // Proc. SPIE 12296, International Conference on Remote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology and Agriculture (RSE 2022). 2022. PP. 174–180.
5. **Воронова Л.И., Мохаммад Н.** Беспроводные Сенсорные Сети Как Основа Интернета Вещей // Сборник материалов XI Молодежного научного форума МТУСИ, 2020. С. 155–161.
6. **Мохаммад Н., Воронова Л.И.** Моделирование кластеризации беспроводной сенсорной сети нейросетевым конструктивным методом // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. № 12 (3). С. 4–19.
7. **Voronova L.I. et al.** Modeling the Clustering of Wireless Sensor Networks Using the K-means Method // 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). PP. 740–745.
8. **Мохаммад Н., Воронова Л.И., Воронов В.И.** Разработка имитационной модели использования роя беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 3. С. 55–61.
9. **Wei Xing, Hua Yang and Wentao Huang.** A Genetic-Algorithm-Based Optimization Routing for FANETs // Frontiers in Neurorobotics. 2021. No. 15. P. 81.
10. **Федина А.А., Нургалиев А.И., Скворцова Д.А.** Сравнение результатов применения различных эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимизации маршрута беспилотных аппаратов // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. № 1. С. 45–62.
11. **Иванов С.В.** Методика построения субоптимальных маршрутов для группы беспилотных летательных аппаратов на основе биоинспирированных алгоритмов при наличии препятствий // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 1–23.
12. **Rajab A.** Genetic Algorithm-Based Multi-Hop Routing to Improve the Lifetime of Wireless Sensor Networks // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2021. Vol. 11. No. 6. PP. 7770–7775.
13. **Хазиев Н.Н., Волков В.В., Зятинин А.А., Чекалина Е.А.** Оптимизация алгоритмов гибкой маршрутизации в сети передачи данных БПЛА // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2021): Материалы XII Санкт-Петербургской межрегиональной конференции. СПб.: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2021. С. 203–205.
14. **Ефремова А.Е., Парашинец А.В.** Протокол маршрутизации RASER для беспроводных самоорганизующихся сенсорных сетей // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2020. Т. 23. № 1. С. 40–46.
15. **Кудр Л.А., Скобцов Ю.А.** Генетический алгоритм маршрутизации беспроводных сенсорных сетей // ПИ. Т. 2014. № 1. С. 85–91.
16. **Chakraborty A., Mitra S.K., Naskar M.K.** A genetic algorithm inspired routing protocol for wireless sensor networks // International Journal of Computer Intelligence – Theory and Practice. 2011. No. 6.
17. Лучшие квадрокоптеры с большим радиусом действия и камерой. [Электронный ресурс]. URL: <https://mirquadroptero.ru/blog/top-luchshih/luchshie-kvadrokoptyery-s-bolshim-radiusom-dejstviya-i-kameroj> (дата обращения: 23.01.2023).



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



*А. Н. Дементьев, А.О. Жуков,
В.К. Ильков, В.Р. Скрынский*

Метаматериалы в радиоэлектронике: от исследований к разработкам

Под ред. П.П. Мальцева

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 248 с.
ISBN: 978-5-94836-674-6

Цена 975 руб.

В книге представлен обзор результатов разработок и исследований метаматериалов в радиоэлектронике, который сведен в следующие разделы:

- функциональные элементы СВЧ систем;
- метаматериалы в антенной технике;
- методы улучшения цифровой антенной решетки;
- разработка электрически малых антенн с применением метаматериала;
- дилемма «невидимости» и метаматериалы;
- радиопоглощающие системы на основе метаматериалов;
- инновационный стелс-метаматериал.

Обзор представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и магистров, студентов и бакалавров, специализирующихся в области радиоэлектроники и микросистемной техники.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphaera.ru
sales@technosphaera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphaera.ru