

ГИБКИЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ШЕСТИУГОЛЬНЫХ СЕТОК ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСОВ

Хабаров С.П.

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: мониторинг лесных территорий, оптимизация покрытия, генерация регулярных сеток, аэрофотосъемка, планирование маршрутов БПЛА, сенсорные сети.

Аннотация. В работе рассматривается задача равномерного покрытия лесных территорий для их мониторинга с использованием БПЛА. Предложен модифицированный алгоритм генерации шестиугольной сетки, обеспечивающий полное покрытие. Приведены результаты тестирования, подтверждающие его преимущества перед традиционными методами. Отмечена возможность его использования при построении сенсорных сетей и планировании маршрутов БПЛА.

FLEXIBLE ALGORITHM FOR CONSTRUCTING HEXAGONAL GRIDS FOR FOREST MONITORING

Khabarov S.P.

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg

Keywords: forest area monitoring, coverage optimization, regular grid generation, aerial photography, UAV route planning, sensor networks.

Abstract. The paper considers the problem of uniform coverage of forest areas for their monitoring using UAVs. A modified algorithm for generating a hexagonal grid is proposed, providing full coverage. Test results are presented, confirming its advantages over traditional methods. The possibility of its use in the construction of sensor networks and planning UAV routes was noted.

Введение. Изучение и мониторинг лесных территорий играют ключевую роль в современных экологических исследованиях и управлении природными ресурсами. Аэрофотосъемка позволяет получать детальную информацию о состоянии лесных массивов, включая их структуру, плотность, здоровье растительности и динамику изменений во времени. Однако для эффективного сбора данных надо обеспечить полный и равномерный обзор исследуемой территории при минимизации затрат на съемку (энергопотребление БПЛА или объем обрабатываемых данных). Поэтому выбор стратегии планирования точек съемки является критически важным аспектом организации таких операций.

Камеры БПЛА имеют ограниченную ширину захвата, которая зависит как от высоты полета, так и от характеристик самой камеры. Чтобы обеспечить непрерывное обследование всей площади, территория разбивается на равномерно распределенные точки, для которых формируются круги радиусом R . Эти круги соответствуют областям, которые будут захвачены камерой при каждой точке съемки. В первом приближении можно считать, что:

$$R = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2),$$

где h – высота полета БПЛА, а γ – угол обзора камеры в радианах. Важно отметить, что при мониторинге лесных территорий применяются различные

методы генерации регулярных сеток. Эти методы определяют расположение центров съемочных областей таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность обзора при минимальном количестве задействованных ресурсов [1]. Наиболее часто используются два типа конфигураций: прямоугольная (регулярная) и шестиугольная (гексагональная) решетки.

Прямоугольная решетка – это наиболее простой и интуитивно понятный метод. В ней расстояние между центрами соседних кругов одинаково как по горизонтали, так и по вертикали: $\Delta x = \Delta y = 2R$. При этом расстояние между диагонально расположенными кругами существенно больше:

$$\sqrt{(2R)^2 + (2R)^2} \approx 2,828R.$$

В результате круги, расположенные по диагонали, имеют меньшее перекрытие, что создает большие зазоры. Для компенсации этого эффекта шаг решетки уменьшают, что приводит к увеличению общего числа точек съемки и степени перекрытия между ними. Это повышает надежность покрытия, но при этом существенно увеличивает затраты времени и ресурсов.

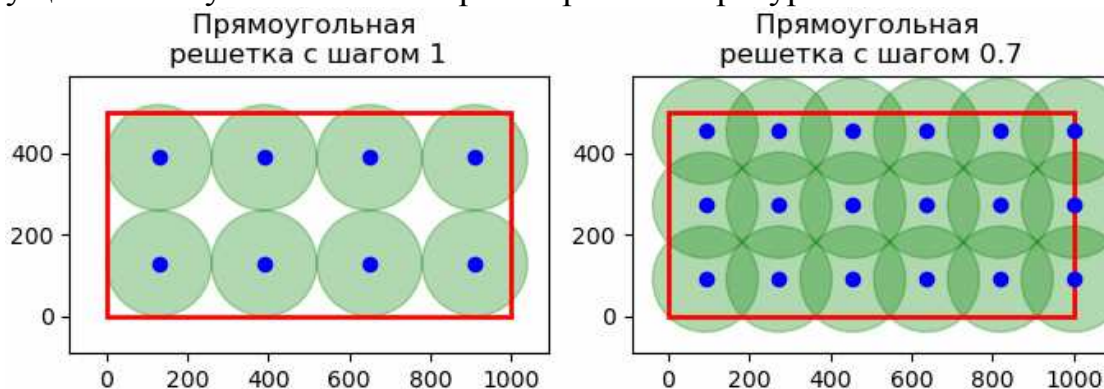


Рис. 1. Заполнение плоскости 1000×500 прямоугольной решеткой с $R = 130$

Как видно на рисунке 1, выбор шага играет ключевую роль в обеспечении качественного покрытия территории. Если шаг слишком велик, возникают зазоры, что приводит к неполному покрытию и снижению качества мозаики изображений. Если шаг слишком мал, то это вызывает избыточное перекрытие между соседними снимками, увеличивая объем собираемых данных и время их обработки. Важен баланс между шагом решетки и степенью перекрытия.

Наиболее предпочтительной для мониторинга лесных участков является шестиугольная решетка [2], так как она обеспечивает максимальную плотность покрытия и минимизирует перекрытие окружностей. Простейший метод генерации шестиугольной решетки, основанный на алгоритме "грубой силы", предполагает последовательное размещение точек в соответствии с геометрией шестиугольника. Для каждой строки решетки вычисляются координаты центров шестиугольников, учитывая смещение между четными и нечетными строками. Расстояние между соседними точками в строке принимается равным $\Delta x = R\sqrt{3}$, а расстояние между строками $\Delta y = 1,5R$, где R – радиус описанной окружности вокруг шестиугольника.

Точки решетки размещаются по всей плоскости, начиная с нижнего левого угла области. Каждая точка проверяется на принадлежность заданному

прямоугольника размером $W \times H$. Если точка удовлетворяет этому условию, то она добавляется в итоговый набор. При таком подходе шестиугольная решетка дает плотность покрытия не менее 90,7%, что значительно выше, чем у прямоугольной решетки, где этот показатель составляет около 78,5% [3].

Шестиугольная решетка, благодаря своей симметрии и равномерности, может использоваться для покрытия участков с нерегулярными формами. Шестиугольники заполняют пространство более эффективно, даже при наличии неровных границ и сложных формах лесных участков.

Однако традиционные методы, включая метод "грубой силы", обладают существенным недостатком: они не гарантируют полного покрытия участка, особенно в случаях, когда его размеры не кратны шагам решетки. Это приводит к образованию зазоров на границах, что может существенно исказить результаты анализа и снизить достоверность данных (рис. 2, слева).

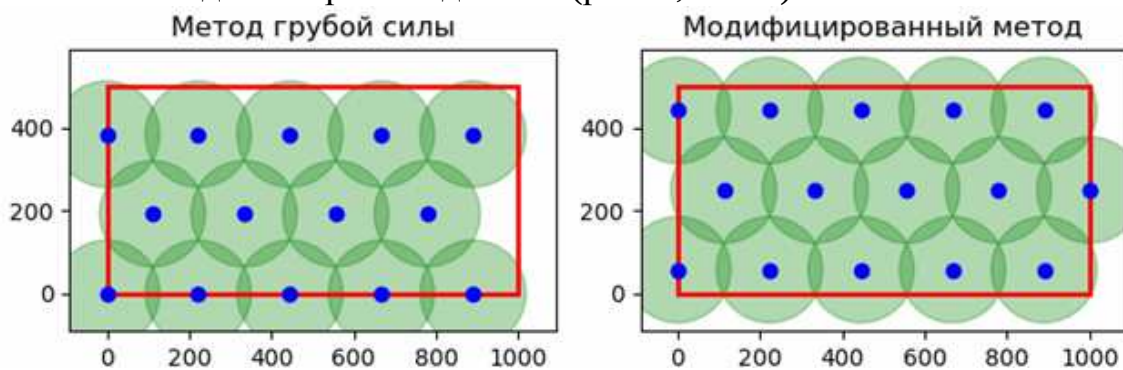


Рис. 2. Шестиугольная решетка на плоскости 1000×500 при $R = 130$

В условиях, когда требуется 100% обследование лесного участка, такие ограничения становятся критичными. Например, при оценке состояния лесного массива, мониторинге биоразнообразия или планировании природоохранных мероприятий даже незначительные пропуски в покрытии могут привести к недостоверным выводам.

Постановка задачи. Для устранения указанных недостатков в рамках данного исследования был разработан модифицированный алгоритм генерации шестиугольной решетки, который адаптируется к особенностям размеров исследуемой территории. Его целью является обеспечение полного покрытия лесного участка без зазоров, что позволит повысить точность и надежность данных, получаемых в результате мониторинга.

В основе предлагаемого алгоритма лежит допущение о возможности выхода части точек решетки за границы исследуемой области. При этом их количество должно быть минимальным, что обеспечивается за счет оптимизации распределения строк, при котором распределение полных и неполных строк должно быть максимально равномерным (рис. 2, справа).

Краткое описание алгоритма. Структура предлагаемого алгоритма включает три основных этапа:

- На первом этапе вычисляется величина вертикального сдвига всей шестиугольной решетки для ее вертикального центрирования внутри исходного прямоугольника, что позволяет тем самым избавиться от возможных зазоров в верхней части исследуемой области.

– На втором этапе вычисляется величина начального горизонтального смещения центра первого шестиугольника первой строки в зависимости от наличия или отсутствия зазора в этой строки на правой границе исследуемого прямоугольника. Найденное значение будет при формировании точек решетки справедливо и для всех нечетных строк шестиугольников.

– На третьем этапе построчно формируется массив точек из координат центров шестиугольников, которые и представляют собой шестиугольную решетку. При этом в строки с обнаруженным правым зазором будет еще добавляться по одной точке за границей исследуемой области. Это позволит выполнить 100% покрытие исследуемой области с минимальным числом точек вне исследуемого диапазона.

Результаты тестирования. Для оценки качества работы предложенного алгоритма был разработан тестовый пример. Он при разных W , H и R позволял для метода "грубой силы" и модифицированного метода вычислять количество точек шестиугольной решетки и процент покрытия исследуемой области. При этом основная функция, реализованная на Python, имела следующий вид:

```
import numpy as np
def Create_Hexagonal_Ggrid(width, height, R):
    dx = R * np.sqrt(3) # Горизонтальный шаг
    dy = 1.5 * R # Вертикальный шаг
    # 1. Вычисление вертикального смещения для центрирования
    # шестиугольной решетки внутри прямоугольника по вертикали
    hexagon_rows = int(height // dy)
    h_empty = height % dy
    y_offset = h_empty / 2 if h_empty > 0 else 0
    # 2. Вычисление начального горизонтально смещения для первой строки
    hexagon_columns = int(width // dx)
    a = 0 if (hexagon_columns * dx + dx/2) > width else dx/2
    # 3. Построчное построение шестиугольной решетки
    points = []
    for row in range(hexagon_rows + 1):
        y = row * dy + y_offset
        if row % 2 == 0:
            x = a
        else:
            x = dx/2 if a==0 else 0
        # Добавление в массив точек центров шестиугольников текущей
        # строки, включая точки, выходящие за пределы плоскости
        while x <= width + dx/2:
            points.append((x, y))
            x += dx
    return np.array(points)
```

Тестирование было выполнено для двух областей, близких по размеру и площади к принятым в России размерам лесных кварталов. Для каждого из них расчет выполнялся с 5 радиусами покрытия. При этом значения этих радиусов выбирались так, чтобы исключить возможность кратного их совпадении с размерами исследуемых областей. Результаты тестов представлены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение методов покрытия прямоугольных областей

Размер области	Радиус круга	Модифицированный метод		Метод “грубой силы”		% внешних точек
		Точек	% Покрытия	Точек	% Покрытия	
1000x500	66	57	100,0%	54	99,25%	5,5%
	99	26	100,0%	24	98,40%	8,3%
	133	15	100,0%	14	97,35%	7,1%
	150	13	100,0%	12	96,63%	8,3%
	200	7	100,0%	6	91,87%	16,6%
1000x1000	66	104	100,0%	99	99,24%	5,0%
	99	45	100,0%	42	95,64%	7,1%
	133	30	100,0%	27	97,50%	11,1%
	150	22	100,0%	20	96,42%	10,0%
	200	14	100,0%	12	95,89%	16,6%

Как следует из приведенной таблицы, модифицированный метод во всех случаях обеспечивал 100% покрытие области, независимо от размера области и радиуса круга. Метод “грубой силы” не достигает полного покрытия. Процент покрытия варьируется от 91,87% до 99,25%. Результат вполне неплохой, но остаются области непокрытых участков.

В общем случае модифицированный метод использует больше точек, чем метод “грубой силы”. Что вполне очевидно. Однако разница в количестве точек незначительна (от 1 до 5 точек), что делает модифицированный метод более предпочтительным, учитывая его полное покрытие.

Следует отметить, что процент внешних точек мало зависит от площади исследуемой области и определяется в первую очередь радиусом круга. Таким образом, при фиксированном радиусе можно прогнозировать процент внешних точек независимо от размеров области.

Выводы и заключение. Модифицированный алгоритм обеспечивает 100% покрытие при минимальном увеличении числа контрольных точек, эффективен для мониторинга лесных территорий, где важна полнота охвата исследуемой области. Полученные результаты подтверждают практическую применимость и преимущество предложенного алгоритма перед традиционным подходом. Он имеет широкий спектр практических применений в различных отраслях.

С его помощью можно оптимально размещать сенсоры в беспроводных сетях, гарантируя полное покрытие территории при минимальном количестве узлов [4, 5]. Благодаря равномерному распределению датчиков и отсутствию зазоров, метод особенно эффективен для мониторинга окружающей среды, промышленных объектов и умных городов, где важно избежать “слепых зон” при сохранении энергоэффективности сети.

Этот метод может быть исходным для планирования маршрутов БПЛА при мониторинге лесных территорий. В частности, имея шестиугольную сетку, у нас появляется возможность определить количество БПЛА с ограниченным запасом автономности для проведения обследования заданной территории.

На рисунке 3 представлен один из вариантов решения логистической задачи группой из четырех БПЛА на заданной шестиугольной сетки с использованием алгоритма муравьиной колонии [6].

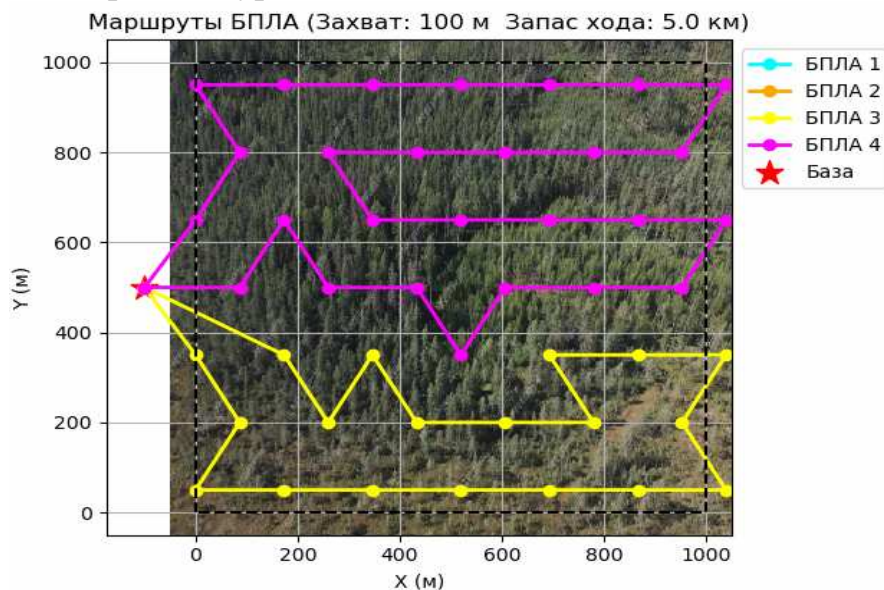


Рис. 3. Решение задачи Vehicle Routing Problem (VRP) для группы из 4-х БПЛА

Из рисунка 3 видно, что для обследования этого участка достаточно всего 2 БПЛА с запасом хода на 5 километров.

Список литературы

1. Franco C.D., Buttazzo G.G. Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2016, vol. 83, iss. 3-4, pp. 445-462.
2. Шестиугольный паркет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Шестиугольный_паркет.
3. Circle packing. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Circle_packing.
4. Заяц А.М., Хабаров С.П. Организация доступа к беспроводным Ad Hoc сетям информационных систем мониторинга лесных территорий из среды ОС Windows 10 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2018. – № 223. – С. 285-299.
5. Заяц А.М., Хабаров С.П. Настройка беспроводных соединений в системах мониторинга лесных территорий // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Том 1. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2018. – С. 80-83.
6. Хабаров С.П. Анализ возможности применения муравьиных алгоритмов для решения логистических задач // Естественные и технические науки: обсуждение проблем, пути совершенствования: Сборник научных статей. – Ульяновск: Зебра, 2024. – С. 40-45.

Сведения об авторе:

Хабаров Сергей Петрович – к.т.н., доцент, с.н.с.