ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ РОТОРНОГО БПЛА ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ

A STUDY OF ROTARY-WING UAV TRAJECTORY PLANNING FOR PESTICIDE SPRAYING



УДК 632.98

Чжао Ци, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра СМ7, Москва, Россия

Zhao Qi, BMSTU, Department SM7, Moscow, Russia, qizhao46@gmail.com

Аннотация

В статье основное внимание уделяется изучению планирования траектории БПЛА с четырьмя роторами, распыляемого на сельскохозяйственных угодьях малого и среднего размера. Полностью учитывается форма сельскохозяйственной территории, и разрабатываются соответствующие траектории планирования с целью высокоэффективного покрытия территории для закона движения полета и ограничений четырёхроторного БПЛА. В соответствии со сложной средой на сельскохозяйственных угодьях, полагаясь на сенсорный принцип, на основе которого разрабатываются соответствующие алгоритмы, позволяющие БПЛА достичь автономности избегать препятствий и, в конечном итоге, осуществляться планирование траектории полного покрытия в районе сельскохозяйственных угодий.

Annotation

This article focuses on studying the trajectory planning of a quad-rotor UAV spraying a small to medium sized agricultural area. The shape of the agricultural area is fully considered and appropriate planning trajectories are developed in order to provide highly efficient area coverage for the flight law and limitations of the quad-rotor UAV. In accordance with the complex environment of the farmland, relying on the sensor principle, based on which appropriate algorithms are developed to enable the UAV to achieve autonomous avoidance of obstacles and eventually carry out full coverage trajectory planning in the farmland area.

Ключевые слова: Роторный БПЛА, планирование траектории, полное покрытие, возвратно-поступательное, сельскохозяйственное угодье.

Key words: Rotor UAV, trajectory planning, full coverage, reciprocating, farmland.

Введение

Дроны с ручным дистанционным управлением неизбежно будут сопровождаться многократным опрыскиванием и пропущенным опрыскиванием, а долгосрочные дистанционно управляемые БПЛА для защиты растений увеличат нагрузку на операторов, а вероятность повторного опрыскивания или пропущенного опрыскивания значительно возрастет. Таким образом, в данной статье предлагается метод планирования траектории БПЛА с четырьмя роторами, ориентированная на глобальный охват сельскохозяйственных угодий, что может достичь цели распыления БПЛА на всей территории, тем самым уменьшая человеческие ошибки и операционные нагрузки.

1. Выбор режима покрытия квадрокоптера БПЛА

1. Оценка планирования траектории

Для оценки траектории квадрокоптера БПЛА в литературе [1] определяется расчет качества полета с использованием улучшенного метода оценки серой кластеризации числового индекса, определяется метод оценки планирования траектории и предлагается понятие качества траектории, используемое для оценки рациональности планирования траектории. Используя его метод для справки в сочетании с исследовательским содержанием этой статьи, следующие факторы в основном используются для оценки качества траектории БПЛА, как показано на рисунке 1.

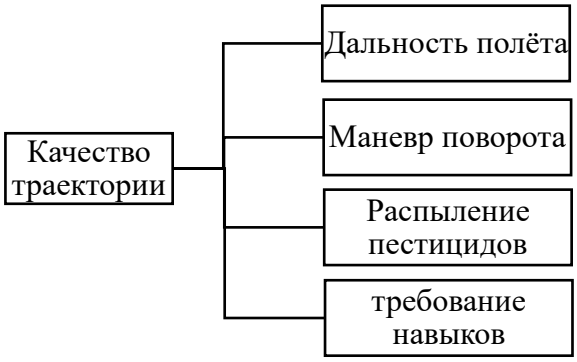


Рис.1 Качество траектории

Выражение функции стоимости качества траектории БПЛА выглядит следующим образом:

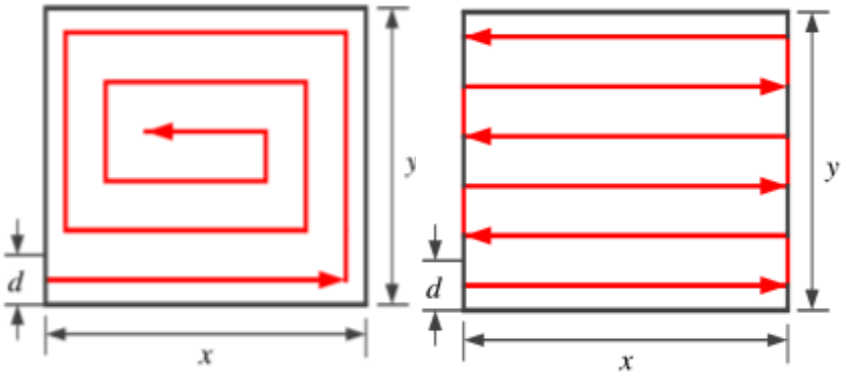
$$Z = \Sigma_n c_n p_n \tag{1}$$

Здесь p_n представляет собой n-й фактор; c_n представляет собой вес n-го фактора. О качестве трека можно судить по выражению функции качества трека.

2. Анализ трека

Просматривая соответствующую литературу, мы видим, что есть два основных

способа охвата всей территории в реальной работе[2]: один - спиральное покрытие, а другой - возвратно-поступательное покрытие полета. Здесь мы используем ранее представленный метод оценки планирования траектории, чтобы определить, какой метод больше подходит для полной зоны покрытия винтокрылого БПЛА. Предполагая, что рабочая зона БПЛА представляет собой прямоугольную область размером x × y, d представляет рабочую ширину распыления БПЛА. Упрощение двух закрытых путей показано на Рисунке 2.



а) Спиральное б) Возвратно-поступательное

Рис.2 Карта спирального и возвратно-поступательного движения

3. Техническое требование

Установите стоимость технических требований составляет p4, независимо от того, какой метод работы используется, необходимо достичь назначенного положения для маневра поворота. Как определить, достиг ли дрон заданного положения, обычно определяется дифференциальным спутником GPS для определения конкретного положения дрона[4]. Для метода работы по спирали БПЛА необходимы для более точного определения местоположения, в противном случае будет большое количество повторных и пропущенных операций опрыскивания. В возвратно-поступательном режиме беспилотный

летательный аппарат разворачивается на границе сельхозугодий. Даже если есть отклонение, пока ширина между гусеницами постоянна, утечка брызг будет происходить только на границе сельхозугодий. Поэтому с точки зрения технических требований спиральная технология более требовательна, а возвратно-поступательный режим работы относительно невелик.

$$D_{spi} > D_{cir} \tag{2}$$

В формуле $Dspi$ представляет собой коэффициент технических требований к спирали; $Dcir$ представляет собой коэффициент технических требований возвратно-поступательного движения.

Далее, рассчитав качество траектории, мы проанализируем, какой из двух методов работы больше подходит для операций опрыскивания сельскохозяйственных угодий с помощью четырехроторных БПЛА. Что касается ситуации с распылением пестицидов, ситуация с распылением пестицидов на прямой линии БПЛА является определенной, поэтому в основном анализируется ситуация с распылением пестицидов на повороте. Стоимость спирального рабочего пути[3]:

$$Z_{spi} = p_1 L_{spi} + p_2 T_{spi} + p_3 T_{spi} + p_4 D_{spi} \tag{3}$$

Стоимость возвратно-поступательного рабочего пути:

$$Z_{cir} = p_1 L_{cir} + p_2 T_{cir} + p_4 D_{cir} \tag{4}$$

Сравниваем анализ стоимости двух операционных методов, как показано в Таблице 1.

Таблица 1 Сравнение стоимости треков

Стоимости треков	Спиральное	Возвратно-

		поступательное
Дальность полёта	$L_{spi} = -d\left[\left(\frac{y}{d}\right)^2\right] + (x+y+2d)\left[\frac{y}{d}\right] - 2y$	$L_{cir} = (x+d)t\left[\frac{y}{d}\right]$
Поворотный маневр	Рассредоточенный	сосредоточенный
Распыление пестицидов	Наличие повторного и пропущенного опрыскивания	Без повторного и пропущенного опрыскивания
Техническое требование	Высокое	Низкое

Посредством расчета и сравнения в одной и той же зоне действия два метода работы с полным охватом БПЛА платят одинаковую цену с точки зрения дальности и поворота, но при спиральном методе работы есть повторяющиеся области и недостающие области для распыления пестицидов. По мере расширения рабочей зоны и увеличения количества витков недостатки этого метода работы станут более значительными. Кроме того, пестициды дороже электричества, поэтому удельный вес распыления пестицидов должен быть самым большим. Возвратно-поступательный метод работы может более полно и разумно распылять пестициды в рабочей зоне, а точность координат, когда дрон достигает границы сельскохозяйственных угодий, ниже, чем на сельскохозяйственных угодьях. Принимая во внимание все вышеперечисленные факторы, для метода планирования траектории четырехроторного БПЛА при опрыскивании сельскохозяйственных угодий более научно и разумно выбирать возвратно-поступательный режим работы.

2. Оптимизация граничного поворота квадрокоптера БПЛА

Поворот квадрокоптера можно разделить на режим головы и без головы[5].

Направление движения БПЛА с четырьмя роторами в режиме головы всегда соответствует направлению маршрута при планировании траектории.На границе сельхозугодий дрону нужно повернуть нос, чтобы выйти на следующий маршрут, и его поворот можно выполнить рысканием или круговым движением. В безголовом режиме поворот квадрокоптера можно осуществлять панорамированием влево и вправо.

В таблице показано сравнение трех различных методов управления.

Таблица 2 Сравнение методов поворота

Метод поворота	Затрата времени	Сложность управления
Поворот с помощью рыскания	$T_{\text{yaw}} = 2\frac{V}{a} + 2t + 2t'$	Более сложно
Круговой поворот	$T_{cir} = 2\frac{V - V'}{a} + \frac{\pi r}{V'}$	умеренная
Поворот панорамирования влево и вправо	$T_{\text{pan}} = 2\frac{V}{a} + 2t$	Менее сложно

Поскольку при планировании траектории БПЛА с четырьмя винтами для опрыскивания сельскохозяйственных угодий в этой статье не использовался винтокрылый аппарат с головным режимом, путем анализа и сравнения трех методов поворота четырехвинтового БПЛА мы, наконец, решили изменить маршрут, повернув налево и направо. Этот метод не только занимает самое короткое время, но и не требует регулировки направления носовой части четырехроторного БПЛА во время полета. Управление простое и легкое в реализации.

3. Планирование маршрута полетов БПЛА

Требование к эксплуатации квадрокоптера для опрыскивания

сельскохозяйственных угодий состоит в том, чтобы покрыть всю площадь сельскохозяйственных угодий. Цель этого планирования маршрута - сделать так, чтобы дрон опрыскивал всю площадь сельскохозяйственных угодий как можно больше, чтобы сделать работу беспилотника более эффективной и минимизировать отходы пестицидов и топлива [40-41]. Когда рабочая зона представляет собой правильный прямоугольник, одна из сторон используется для создания его параллельных линий по очереди, интервал составляет половину ширины распыления пестицидов d, маршрут представляет собой толстую сплошную линию, пунктирная линия представляет собой границу распыления пестицидов дроном, а стрелка – направление маршрута дронов, таким образом, получается маршрут возвратно-поступательного движения. Когда рабочая зона нерегулярна, вышеупомянутый метод не может удовлетворить требованиям планирования траектории. Здесь мы используем сеточный метод для улучшения летных характеристик четырехвинтового БПЛА для получения маршрута.

1. Сеточный метод

Метод сетки разбивает всю область планирования на несколько ячеек сети, и каждой ячейке назначается значение состояния, чтобы отметить, содержит ли ячейка препятствия или свободное пространство для планирования[6]. Это значение может быть двоичным числом. Сеточный метод является одним из наиболее часто используемых методов планирования траектории. Он имеет множество преимуществ, таких как простота, интуитивность и простая структура. Он очень подходит для планирования траектории с полным покрытием площади. Сетку можно рассматривать как приблизительное описание

окружающей среды, а размер деления сетки может напрямую влиять на качество планирования траектории. Разделение сетки велико, и его описание окружающей среды особенно приблизительное, и планирование траектории не приведет к идеальному состоянию [42]. Разделение сетки слишком мало. Хотя описание среды более подробное, а планирование маршрута также очень подробное, это приведет к слишком большому количеству информации на карте и увеличению времени поиска. Однако, если среда является известным планом, это не приведет к слишком большому увеличению объема большой загрузки и времени расчета компьютера. Следовательно, в этом методе исследования сетка определяется как ширина распыления пестицидов, которая теоретически достигает минимального значения для улучшения качества запланированной траектории. Сеточный метод показан на рисунке 3.

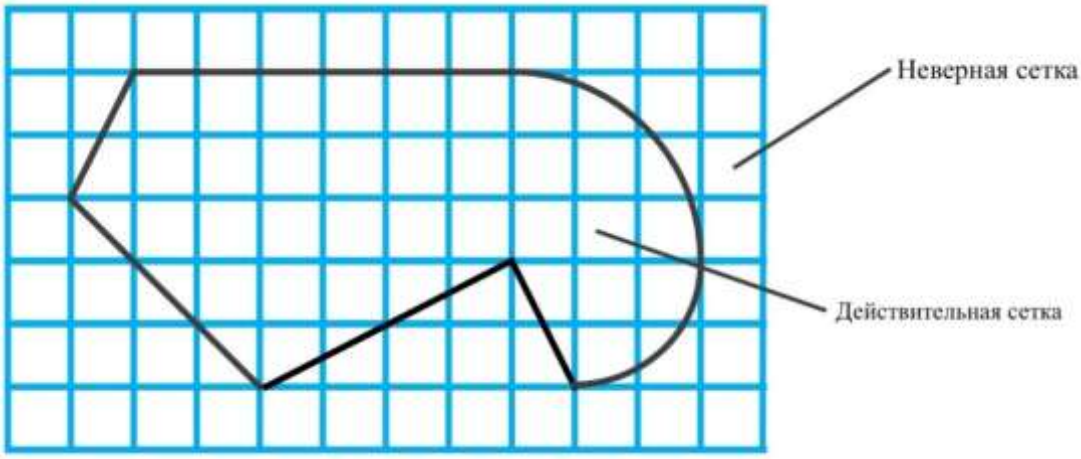


Рис.3 Отображение растеризации рабочей области

2. Улучшенный метод сетки

Общий метод сетки заключается в поиске всех действительных сеток. Как показано на рисунке 4, БПЛА использует возвратно-поступательный метод полного покрытия, чтобы охватить все допустимые сетки в этой строке от

средней точки первой указанной сетки. Когда будет достигнута последняя допустимая сетка, перейдите к следующей действительной сетке, ближайшей к следующей строке, и накройте в направлении, противоположном предыдущему ряду, повторяя, и наконец, покрывая все допустимые сетки.

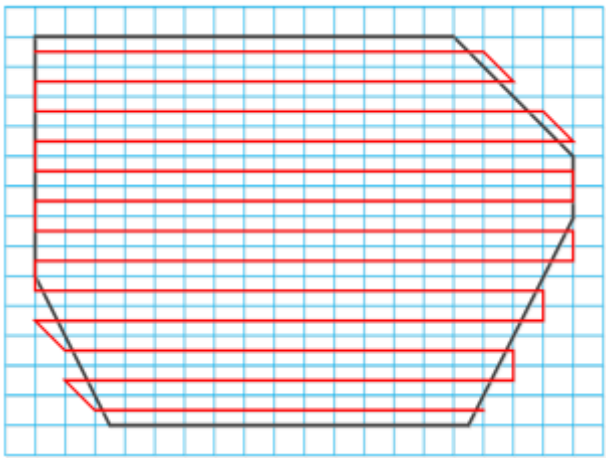


Рис.4 Схема немодифицированного сеточного метода планирования маршрута

Из рисунка 4 видно, что, хотя такое планирование траектории гарантирует полное покрытие всей территории, оно не подходит для четырехроторных БПЛА в точке поворота траектории. Чтобы достичь этого угла поворота, БПЛА должен зависать в точке поворота, чтобы отрегулировать угол навигации, требуется много времени и топлива, и такой вид покрытия неизбежно будет иметь определенный диапазон избыточного покрытия и отходов пестицидов. Исходя из этого, мы предлагаем план улучшения. На краю каждых двух соседних маршрутов, называемых сеткой, в которой поворачивает дрон. Перемещаются по горизонтали между действующей сеткой и недопустимой сеткой для входа в следующий маршрут. Как показано на Рисунке 5.

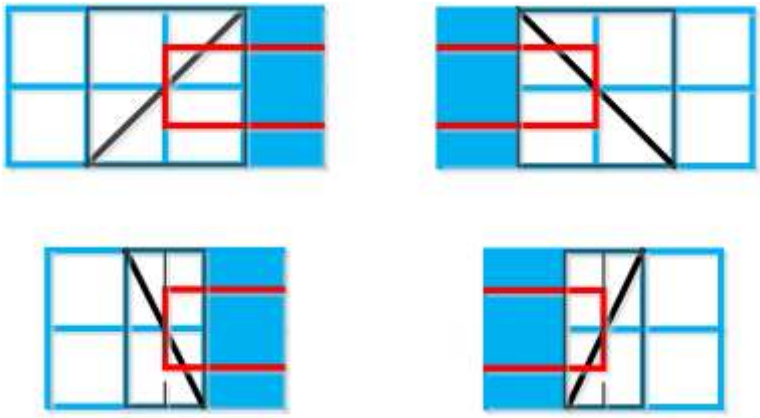


Рис.5 Схема улучшения разворота маршрута

По сравнению с неулучшенным методом сетки, этот улучшенный метод позволил оптимизировать траекторию поворота, и четырехроторному БПЛА не нужно тратить слишком много времени и топлива для регулировки угла. Маршрут полета изменяется перемещением влево и вправо, управление упрощается, а избыточный охват пестицидов уменьшается, но площадь недостающего распыления увеличивается, что также находится в допустимом диапазоне. Улучшенный метод сетки показан на рис.6.

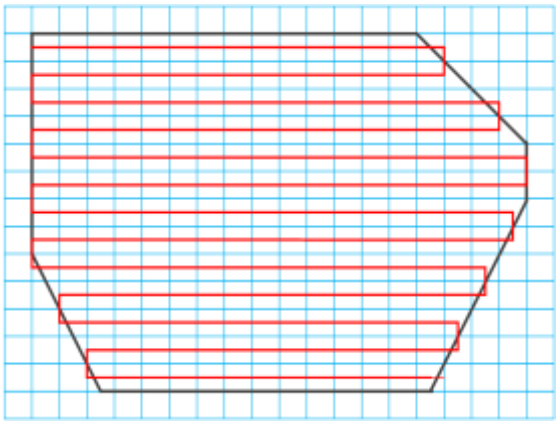


Рис.6 Улучшенный метод сетки для планирования маршрута

Предполагая, что время, необходимое БПЛА для корректировки направления каждого поворота, составляет t, после расчета улучшенный метод сетки теоретически уменьшает избыточное покрытие на 53,33% по сравнению с

неулучшенным методом сетки. Каждый поворот БПЛА на гипотенузе уменьшает время регулировки угла на 2t, что достаточно показывает, что усовершенствованный сеточный метод больше подходит для опрыскивания сельскохозяйственных угодий с четырехроторных БПЛА. Однако усовершенствованный метод сетки будет иметь небольшое количество пропущенных опрыскиваний пестицидов на границе сельскохозяйственных угодий, и он не подходит для полей, где надо пестициды полностью распылены.

4. Моделирование работы беспилотников по защите растений

В качестве программного обеспечения для моделирования используется Microsoft Visual Studio (VS), которая представляет собой среду разработки от Microsoft с комплексными средствами разработки, включая разработку программного обеспечения, средства управления кодом, базу данных, функциональную отладку и так далее.

На платформе Visual Studio мы можем использовать объектно-ориентированное программирование C++, создать сельскохозяйственные угодья для установления границ сельскохозяйственных угодий, создания БПЛА в соответствии с характеристиками квадроторного БПЛА, установления общего радиуса действия БПЛА, ширины распыления пестицида, рабочей скорости, режима поворота, а также создания различных форм препятствий и т.д.

Таблица 3 Основные параметры модели квадрокоптера для защиты растений

Diagonal Wheelbase	1520 mm
Frame Arm Length	625 mm
Dimensions	1471mm x 1471mm x 482mm (arm unfolded, without propellers)

	780mm x 780mm x 482mm (arm folded)
Motor	Stator Size 60mm x 10 mm KV 130 rpm/V
Flight Parameters	Total Weight(without batteries)8.8 kg Standard Takeoff Weight 22.5 kg
Volume	10 L
Standard Operating Payload	10 kg
Max Battery Size	151mm x 195mm x 70mm
Model	XR11001
Quantity	4
Max Spray Speed	0.43 L/min (per nozzle, for water)
Spray Width	4 - 6 m (4 nozzles, 1.5 – 3 m above the crops)
Droplet Size*	XR11001: 130~250 μm Droplet size may vary according to operation environment and spraying speed.

Согласно основным параметрам модели четырехроторного беспилотника для защиты растений в таблице 3, дальность полета беспилотника при моделировании составляет 3 км при полной мощности, нагрузка пестицида - 10 кг, ширина опрыскивания - 4 м, скорость полета - 4 м/с во время опрыскивания, и опрыскивание не осуществляется во время поворота, а дальность одиночного опрыскивания - 2 км с полным баком.

Для облегчения расчетов устанавливают границу в районе сельскохозяйственных угодий в виде прямой линии, дрон к ней как к одной стороне поворотного края, другой стороны неправильной кривой, так что только изучение этой границы может знать алгоритм защиты растений дрон распыления покрытия ситуации.

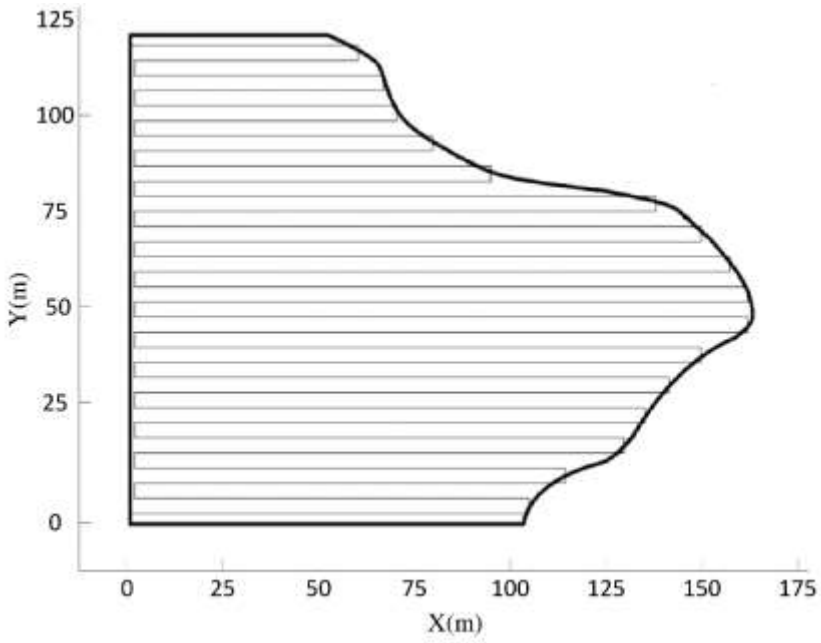


Рис. 7 Моделирование траектории движения беспилотного летательного аппарата для распыления

Маршрут моделирования работы беспилотника по защите растений показан на рисунке 7, и определено, что маршрут самого нижнего беспилотника, начинающего работу, является первым маршрутом, и он увеличивается вверх по порядку, и всего в моделировании 32 маршрута, и избыточное покрытие или отсутствующее покрытие применения беспилотника по защите растений рассчитывается для каждого маршрута с помощью уравнения (5).

$$P = \frac{S_{mis}}{S} \tag{5}$$

где $Smis$ - случай, когда площадь распыления пестицида беспилотным летательным аппаратом для защиты растений не соответствует площади культуры, и указывается, что избыточная площадь распыления положительна, а недостаточная площадь распыления отрицательна; S - площадь распыления пестицида беспилотным летательным аппаратом для данного маршрута.

Как показано на рисунке 8, рассчитывается избыточное покрытие и

отсутствующее покрытие при нанесении пестицидов по маршруту, пролетаемому беспилотным летательным аппаратом для защиты растений в ходе моделирования.

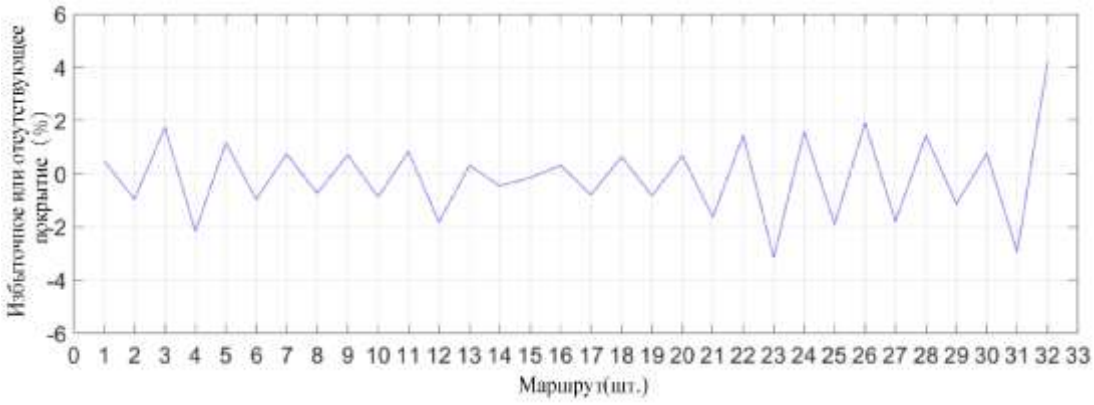


Рис. 8 Избыточное и недостаточное применение дронов для защиты растений

Из результатов расчета видно, что избыточное покрытие и коэффициент пропуска при применении беспилотников для защиты растений в основном остаются в пределах 2%, а избыточное покрытие и коэффициент пропуска при применении беспилотников для защиты растений больше на границе и угол маршрута меньше или короче, но они также находятся в пределах 4%. Поэтому данный метод планирования маршрута квадрокоптера БПЛА для опрыскивания сельскохозяйственных угодий больше подходит для плоских и протяженных сельскохозяйственных угодий с пологими границами.

Заключение

В данной работе в основном исследован метод планирования траектории полного покрытия квадрокоптера БПЛА, определен метод покрытия и метод поворота, применено программное обеспечение для моделирования этого метода, рассчитан теоретический коэффициент избыточного покрытия и коэффициент пропущенного покрытия при распылении пестицидов, который в основном

держится в пределах 4%, доказана рациональность этого метода планирования, а также указываемы более подходящие сельскохозяйственные угодья для планирования траектории полного покрытия квадрокоптера БПЛА.

Список литературы

1. [1] Да-цяо Z, Цзю-фен Z, Минг-хай W, и др. Серая оценка и оптимизация метода планирования пути БПЛА[C]//2010 2-я Международная конференция по электронным компьютерным технологиям. IEEE, 2010: 85-88.
2. [2] Ли J, Ли X, Ю L. Мульти-UAV кооперативное планирование пути покрытия в условиях плато и гор[C]//2018 33-я Молодежная академическая ежегодная конференция Китайской ассоциации автоматизации (YAC). IEEE, 2018: 820-824.
3. [3] Чэнь R, Сюй N, Ли J. Самоорганизованный взаимный подход к принятию решений для зондирования покрытия с помощью роев Multi-UAV[J]. Сенсоры, 2018, 18(6): 1864.
4. [4] Харвин C., Люсьер A. Оценка точности привязанных облаков точек, полученных с помощью многоракурсного стереопсиса на основе снимков, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)[J]. Дистанционное зондирование, 2012, 4(6): 1573-1599.
5. [5] Пури B., Найяр A., Раджа Л. Сельскохозяйственные дроны: Современный прорыв в точном сельском хозяйстве[J]. Журнал статистики и систем управления, 2017, 20(4): 507-518.
6. [6] Деламатер P L, Мессина J P, Шортридж A M, и др. Измерение

географического доступа к здравоохранению: растровые и сетевые методы[J]. Международный журнал по географии здравоохранения, 2012, 11(1): 1-18.

7. [7] Пауэрс Л, Снелл М. Microsoft Visual Studio 2008[J]. 2009.

Literature

1. [1] Da-qiao Z, Jiu-fen Z, Ming-hai W, et al. Grey evaluation and optimization of UAV's path planning method[C]//2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology. IEEE, 2010: 85-88.
2. [2] Li J, Li X, Yu L. Multi-UAV cooperative coverage path planning in plateau and mountain environment[C]//2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). IEEE, 2018: 820-824.
3. [3] Chen R, Xu N, Li J. A self-organized reciprocal decision approach for sensing coverage with multi-UAV swarms[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1864.
4. [4] Harwin S, Lucieer A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery[J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1573-1599.
5. [5] Puri V, Nayyar A, Raja L. Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture[J]. Journal of Statistics and Management Systems, 2017, 20(4): 507-518.
6. [6] Delamater P L, Messina J P, Shortridge A M, et al. Measuring geographic access to health care: raster and network-based methods[J]. International journal of health geographics, 2012, 11(1): 1-18.
7. [7] Powers L, Snell M. Microsoft Visual Studio 2008[J]. 2009.