

ЛИТЕРАТУРА

1. Laghari A. A., Jumanı A. K., Laghari R. A., Nawaz H. Unmanned aerial vehicles: A review // Cognitive Robotics, Vol. 3, 2023, P. 8-22.
2. Гринюк Д. А. , Жарский С. Е. , Оробей И.О., Бирюкова Н.Н. Решение задач обнаружения, сопровождения и построения их траекторий //Химическая технология и техника: тезисы 82-й науч.-техн. конф. – Минск: БГТУ, 2018. с. 112-113.

УДК 62.52

АЛГОРИТМЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА

Д.А. ГРИНЮК, Н.М. ОЛИФЕРОВИЧ,
И.О. ОРОБЕЙ, Д.Ю. ЕЖИКОВ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Динамика БПЛА очень часто характеризуется большой сложностью, и по этой причине в системах управления можно встретить различные алгоритмы. Нельзя сказать, что описанные прикладные алгоритмы являются единственными для применения в том или ином случае. На выбор влияет много факторов: качество управления, сложность, устойчивость, наследственность и т.д. Каждый принцип регулирования имеет свои преимущества и недостатки. Традиционно их делят на линейные и нелинейные алгоритмы.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) ПИД-регулятор является самым традиционным и изученным применяется в широком спектре задач стабилизации [1]. Классический линейный ПИД-регулятор обладает преимуществом в виде простоты настройки коэффициентов усиления параметров, простоты проектирования и высокой надежности. В тоже время имеются ряд ограничений по качеству, динамике, особенно если БПЛА характеризуются существенными нелинейными свойствами и нестационарностью. В литературе указываются недостатки применения ПИД-регулятора для квадрокоптеров, которые характеризуются относятся нелинейностью. Поэтому применение ПИД-регулятора к квадрокоптеру ограничивает его возможностями. Одна даже для таких объектов они находят свое ограниченное применение. Например, для управления положением квадрокоптера

использовался ПИД-регулятор, в то время как для управления высотой — динамический поверхностный контроль (DSC). ПИД-регулятор показал лучшие результаты при отслеживании угла тангажа, тогда как при отслеживании угла крена наблюдались большие установившиеся ошибки.

Настройка ПИД-регулятора может вызвать некоторые трудности, поскольку для обеспечения хорошей производительности ее необходимо проводить около точки равновесия, которая является точкой зависания.

Алгоритм оптимального управления LQR (линейно-квадратичный регулятор) управляет динамической системой, минимизируя подходящую функцию стоимости. Сравнение LQR и PID показало средние результаты, однако алгоритм LQR имел лучшую производительность.

В сочетании с линейно-квадратической оценкой (LQE) и фильтром Калмана алгоритм LQR преобразуется в линейно-квадратический гауссовский алгоритм (LQG). Этот алгоритм предназначен для систем с гауссовым шумом и неполной информацией о состоянии. Преимущество этого регулятора LQG заключается в том, что для его реализации не требуется полная информация о состоянии.

Управление скользящим режимом (SMC) — это нелинейный алгоритм управления, работающий путем подачи на систему прерывистого управляющего сигнала для управления скольжением по заданной траектории. Его главное преимущество заключается в том, что он не упрощает динамику за счёт линеаризации и обеспечивает хорошее слежение. Регулятор SMC обеспечивал стабильное перемещение БПЛА в заданное положение и рыскание. Отслеживание было одинаково хорошим при наличии введённого шума, что показало хорошую надёжность регулятора SMC.

Менее традиционным алгоритмом для построения технических систем является бэкстеппинговое управление. Данный рекурсивный алгоритм, который разбивает регулятор на этапы и постепенно стабилизирует каждую подсистему. Его преимущество заключается в быстрой сходимости алгоритма, что приводит к экономии вычислительных ресурсов и хорошей обработке возмущений. Основным ограничением алгоритма является его невысокая робастность. Для повышения устойчивости (к внешним возмущениям) общего алгоритма обратного шага добавляется интегратор, и алгоритм становится интегратором обратного шага. Было показано, что интегральный подход устраняет стационарные ошибки системы, сокращает время отклика и ограничивает перерегулирование параметров управления.

В связи с повышением доступности по цене и производительности микропроцессорной техники ширится применение для БПЛА адаптивного управления. В большинстве своем БПЛА характеризуются в той или иной степени нестационарностью своих динамических характеристик,

что часто вынуждает применение различных вариантов адаптации. Принципов адаптации широкое множество. В процессе построения систем требуется искать компромисс между эффективностью управления и устойчивостью.

Еще одним подходом к синтезу алгоритмов управления является использование принципов робастности. Это гарантирует устойчивость системы в пределах допустимых диапазонов возмущений или не моделируемых параметров системы. Однако следует отметить, что этот подход не способствует качественным характеристикам как, например, точности и быстродействию. Для повышения качественных характеристик робастного управления иногда применяют наблюдатели, функциональные аппроксимации или адаптивную законов в реальном времени.

Более высокое качество функционирования систем БПЛА обеспечивает применение оптимального управления. В основе алгоритмов оптимального управления обычно лежит задача комплексного управления с использованием минимизации или максимизации целевой функции путем изменения нескольких параметров. К распространенным оптимальным алгоритмам относятся LQR, L1, H_∞ и фильтр Калмана. Основным ограничением алгоритмов оптимизации, является их низкая надёжность и высокая вычислительная стоимость. Однако алгоритмы оптимального управления потенциально могут продемонстрировать превосходное качество в отношении подавления возмущений даже в условиях насыщения возмущений.

В литературе много вариантов использования нечёткой логики, машинное обучение, генетические алгоритмы и искусственных нейронных сетей как для настройки и оптимизации классических методов программирования, так и для непосредственно управления. Эти системы относительно сложны и имеют высокие требования к вычислительным ресурсам. Интеллектуальное управление не ограничивается нечёткой логикой и нейронными сетями, но эти два метода являются наиболее широко используемыми.

Весьма перспективным видится использование гибридных алгоритмов управления [1]. Как было сказано выше, системы управления БПЛА состоят из нескольких подсистем, и как правило, они обладают разной степенью нелинейности, нестационарности и шумовых составляющих на выходе датчика. Для каждой из систем можно подобрать свой алгоритм или комбинацию нескольких принципов. В литературе можно найти примеры: классического ПИД-регулятора с адаптацией настроек с помощью нечеткого алгоритма; гибридные нечеткие регуляторы с алгоритмом управления в режиме скольжения; регулятор скользящего режима использовался в качестве наблюдателя и оценщика внешних возмущений; нейронные сети использовались для компенсации не моделированной динамики.

Следует отметить развитие отдельных классов алгоритмов по подавлению возмущений, которые действуют на системы управления БПЛА и на алгоритмы фильтрации измерительных каналов. Управление подавлением возмущений направлено на активную компенсацию или ослабление влияния внешних возмущений, действующих на динамику БПЛА и на его измерительные каналы. Основным принципом управления подавлением возмущений заключается в первоначальной разработке наблюдателя для оценки вклада возмущения в неустойчивость параметров стабилизации и управления. Существует различные варианты наблюдателей: наблюдатели Калмана, наблюдатели возмущений, наблюдатели пространства состояния и наблюдатели скользящего режима.

За последние годы принципы управления полетом БПЛА были хорошо изучены. Коммерческие разработки и усилия сообщества разработчиков ПО с открытым исходным кодом обеспечивают хороший уровень управления полетами различных платформ БПЛА. Основные неопределенности вносят часто неопределенная динамика и внешние условия эксплуатации.

Развитие основных методов управления полетом привело к повышению ожиданий пользователей относительно их применения в более широком общественном и гражданском воздушном пространстве. С одной стороны, БПЛА обладают значительным потенциалом для использования в городских условиях, включая мониторинг инфраструктуры, наблюдение за дорожным движением, реагирование на чрезвычайные ситуации и доставку медицинских грузов. С другой стороны, сложность и разнообразие задач, а также неопределенность эксплуатационных условий создают дополнительные вызовы в области автономности, интеллектуальности и безопасности БПЛА, что может превышать возможности существующих методов управления полетом на основе моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zuo Z., Liu C., Han Q.-L., J. Song. Unmanned Aerial Vehicles: Control Methods and Future Challenges // J. of automatica sinica, vol. 9, no. 4, april 2022, P. 601–612
2. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Влияние условий фильтрации и сглаживания в информационных каналах на критерий серий // Труды БГТУ. 2016. № 6: С. 117–121.
3. Гринюк Д. А., Дубиковская Е. В., Олиферович Н. М. и др. Эффективность работы комбинированных систем регулирования. I. Общий анализ // Труды БГТУ. Сер. 3, 2025. № 2 (296). С.
4. Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г. и др. Уменьшение влияния помех измерительного канала на замкнутую систему регулирования // Труды БГТУ. Сер. 3. 2023. № 2 (261). С. .