

Децентрализованное управление строем квадрокоптеров

Хасан Хафизов

20 июня 2017 г.

Содержание

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Введение | 2 |
| 1.1 | Спектр задач | 3 |
| 1.2 | Техническое устройство | 4 |
| 1.3 | Алгоритмы управления одиночным роботом | 6 |
| 1.4 | Групповое управление | 7 |
| 1.4.1 | Централизованное управление | 8 |
| 2 | Постановка задачи | 9 |
| 2.1 | Описание | 9 |
| 2.2 | Формальная постановка | 11 |
| 3 | Алгоритм управления | 11 |
| 3.1 | Мастер | 12 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.1 | Оценка движения мастера по траектории | 13 |
| 3.1.2 | Выводы | 16 |
| 3.2 | Миньон | 17 |
| 3.2.1 | Воздействие на агента-лидера функцией Хеви- сайда | 18 |
| 3.2.2 | Выводы | 19 |
| 4 | Строй | 21 |
| 4.1 | Моделирование движения строя | 24 |

1 Введение

Одной из основных целей мехатроники является создание автоматических устройств, которые могут заменить человека-оператора в опасных для жизни условиях. В связи с этим существенно возрастает роль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это связано с успешностью их внедрения для выполнения сложных технологических процессов и операций, для реализации которых необходимо управлять полетом. В настоящее время, в большинстве случаев, управление полетом осуществляется в полуавтоматическом режиме по командам оператора с использованием навигации по опорным точкам или в дистанционном режиме с помощью пульта управления. Наряду с этим существенно возрастает роль программного управления БПЛА на базе интеллектуальных автопилотов. Это связано с сильным расширением спектра задач, которые сможет выполнить БПЛА при полном отсутствии ручного управления.

1.1 Спектр задач

Существует большое количество БПЛА различных видов, типоразмеров и функционального назначения. Каждый из этих типов обладает своими преимуществами и недостатками, из которых вытекают специфичные для каждого типа БПЛА области задач. В этой работе в качестве объекта управления будут рассмотрены квадрокоптеры — летательные аппараты, относящиеся к вертолётному типу, имеющие шесть степеней свободы, осуществляющие полет путем изменения скорости вращения роторов, работающих по парам. Это позволяет квадрокоптеру двигаться в трехмерном пространстве с помощью четырех режимов: нависание, крен, тангаж и рыскание. Реализация вышеупомянутых режимов осуществляется с помощью микро-ЭВМ, которая управляет механизмом генерирования подъемной силы роторов, регулирует положение квадрокоптера в соответствии с выбранным режимом полета и обеспечивает обмен навигационных данных с разными уровнями управления.

Простота в постройке и наладке, возможность серийного производства недорогих узлов для сборки, а так же появление микроконтроллеров, давших возможность производить все необходимые вычисления прямо на летательном аппарате сделали квадрокоптеры одним из приоритетных устройств для решения некоторых задач, стоящих перед БПЛА. Квадрокоптеры стали использоваться в аэрофотосъемке, при отладке взаимодействия между роботами, в спасательных операциях, метеорологии. Большим потенциалом обладает так же их использование в военных целях в качестве раз-

ведчиков. Квадрокоптер как нельзя лучше подходит для наблюдения и контроля зон, доступ к которым затруднён из-за естественных или техногенных катастроф, или находящихся в условиях непригодных для человека: зон с повышенным уровнем радиации или химически загрязнённых. Современные технологии и достижения в теории управления позволяют квадрокоптерам выполнять задачи во всех перечисленных условиях, практически при любых погодных условиях.

Спектр задач, ставящийся перед квадрокоптерами формируется на основе следующих технических характеристик:

- Простота изготовления, доступность материалов — приводит к возможности массового производства, низким экономическим потерям от выхода из строя даже большого количества устройств.
- Высокая стабильность полёта — позволяет осуществлять предсказуемое управление даже на предельно малых высотах
- Непрехотливость к условиям взлёта и посадки
- Невысокая скорость передвижения и ограниченный запас батарей — требует дислокации близкой к месту выполнения задачи

1.2 Техническое устройство

Квадрокоптер изготавливается в виде креста с равными сторонами, на концах которых установлены пропеллеры с приводами. Все пропеллеры имеют фиксированную ось. Подъемная сила, возникающая в результате вращения пропеллера, перпендикулярна к

платформе квадрокоптера. Следовательно, равнодействующая подъемная сила всегда перпендикулярна к платформе робота. Величина подъемной силы зависит от скорости вращения пропеллеров. Вертикальный полет квадрокоптера осуществляется за счет вертикальной составляющей равнодействующей подъемной силы, которая преодолевает силу тяжести. Горизонтальный полет осуществляется за счет горизонтальных составляющих подъемных сил, возникающих при наклоне квадрокоптера. Наклонить квадрокоптер можно с помощью регулирования скоростей вращения пропеллеров, создавая опрокидывающий момент относительно осей x или y (рис. 1). Для этого достаточно установить разную скорость вращения между пропеллерами, находящимися друг против друга по диагонали.

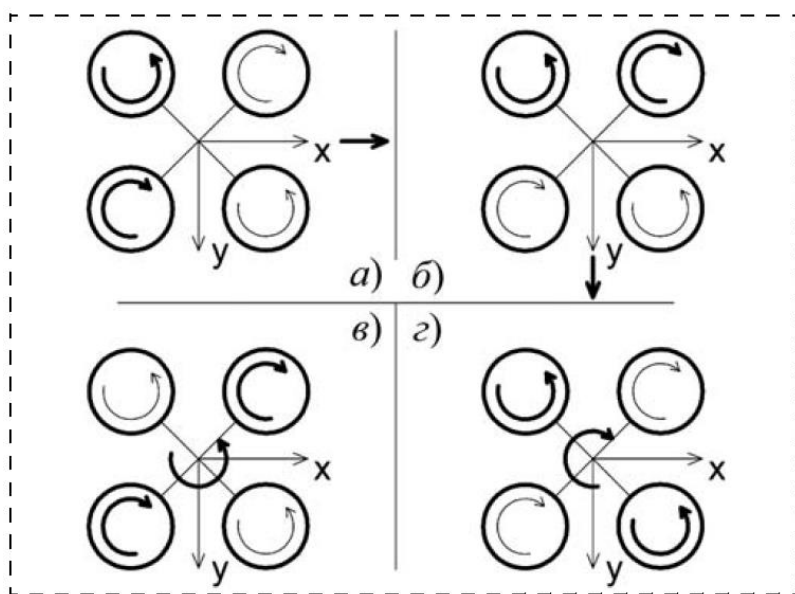


Рис. 1: Принцип полёта квадрокоптера

Если одна пара пропеллеров, расположенных друг против друга по диагонали, вращается по часовой стрелке, то другая пара враща-

ется против часовой стрелки. Дело в том, что при вращении винта возникает момент, вращающий квадрокоптер вокруг собственной оси в обратную сторону. Если вращать пропеллеры попарно в разные стороны, то и момент, действующий на тело квадрокоптера и возникающий в результате вращения пары пропеллеров по часовой стрелке, будет компенсироваться моментом, возникающим в результате вращения пары пропеллеров против часовой стрелки. В вертолетах эту функцию выполняет хвостовой винт, компенсирующий момент, возникающий в результате вращения несущего винта вертолета. Вращение вокруг собственной оси осуществляется за счет разницы скоростей вращения между парами пропеллеров, вращающихся в разные стороны.

1.3 Алгоритмы управления одиночным роботом

Способ управления квадрокоптером чаще всего базируется на ПД или ПИД регуляторах, а также на линейно-квадратичных регуляторах (ЛКР), нечетких регуляторах и нейросетевых регуляторах.

ПИД-регулятор — в настоящее время наиболее часто встречающийся регулятор на технологическом производстве. Он применяется почти во всех задачах стабилизации, в частности его часто используют для стабилизации углов квадрокоптера в воздухе, для полёта по траектории и удержания позиции с помощью GPS, для удержания высоты по барометру, для стабилизации камеры в подвесе. Причиной для широкого использования служит простота построения и промышленного использования, ясность функционирования и при-

годность для решения большинства практических задач.

Как было упомянуто выше помимо ПИД-регуляторов существует несколько линейных регуляторов. В их числе: П-регуляторы, ПИ-регуляторы, ПД-регуляторы, И-регуляторы, Д-регулятор.

Одним из минусов ПИД-регулятора является необходимость в настройке коэффициентов, которая требует детального описания моделируемой системы. Однако, достаточно полно смоделировать такую сложную систему как квадрокоптер — не всегда возможно. По этой причине для задачи вычисления коэффициентов ПИД-регулятора используют нейросети. Совокупность этих двух подходов называют нейросетевым регулятором.

1.4 Групповое управление

Группой роботов называется совокупность некоторого числа однотипных или разнотипных роботов, объединенных общей целевой задачей. Для решения задачи, поставленной перед группой роботов или её частью, в недетерминированной среде каждый из роботов выполняет ряд действий, направленных на решение общей задачи. Эти действия должны быть определенным образом скоординированы, согласованы по времени, а часто и в пространстве. Таким образом, возникает задача управления группой роботов, которая заключается либо в реализации заранее найденной последовательности действий роботов группы, либо в оперативном формировании последовательности действий самими и роботами одновременной или рациональной последующей реализации этой последовательности. Имея в виду дан-

ную формулировку задачи группового управления, предполагается, что рассматриваемые далее группы состоят из интеллектуальных роботов, то есть снабжены достаточно мощным вычислительным комплексом.

Управление роботами группы осуществляется системой группового управления роботами которая может основываться на одной из следующих стратегий:

- Централизованная стратегия управления
- Децентрализованная стратегия управления
- Гибридная стратегия управления

1.4.1 Централизованное управление

При реализации методов централизованного управления группа роботов имеет робота-лидера, вычислительный комплекс которого является технической базой системы управления. Робот-лидер формирует и распределяет действия роботов группы по информационным каналам. При такой стратегии роботы-исполнители, фактически, решают лишь локальные задачи управления, поэтому могут иметь простые вычислительные комплексы, а значит и небольшие размеры.

С задачей совместного управления движением группы роботов чаще всего можно встретиться в военной сфере. Одним из перспективных направлений в этой области можно назвать управление группой БПЛА с целью разведки. Для этой задачи важен именно многоагентный подход, так как для систем противовоздушной обороны

(ПВО) противника поражение большого количества целей является гораздо более сложной задачей, из-за возрастания необходимых вычислительных мощностей для одновременного сопровождения множество воздушных объектов. Вероятность выполнения задачи также повышается, так как выход из строя части роботов не окажет критического влияния на группу в целом. Дополнительный выигрыш от строевого движения можно получить задав конфигурацию строя так, чтобы за впереди идущими агентами образовывалась зона пониженного давления, давая тем самым возможность остальным участникам группы экономить топливо или заряд батарей.

2 Постановка задачи

2.1 Описание

В этой работе будет решаться задача управления группой роботов, объединённых в строй с произвольным порядком (рисунком). Каждый робот в строю является интеллектуальным агентом, движущимся в соответствии со своим законом управления, который направлен, во-первых на то, чтобы выполнить общую задачу, а во-вторых чтобы сохранить исходную структуру строя. В качестве задачи, которая будет выполняться строем была выбрана задача движения по произвольной траектории с задаваемой скоростью.

Для взаимозаменяемости требования с аппаратной точки зрения ко всем агентам одинаковые, однако программно в каждый момент времени агент будет принадлежать одному из двух классов:

- Мастер — агент, задача которого отрабатывать движение по траектории и быть главным ориентиром для всех остальных агентов.
- Миньон — агент, задача которого сохранять своё местоположение относительно других участников группы, тем самым сохраняя структуру строя

Моделирование в работе будет проводиться в горизонтальной 2D плоскости. Моделями агентов будут материальные точки с массой.

Ограничения:

- У каждого агента есть ограничение видимости. Если два участника строя в данный момент времени находятся вне зоны видимости друг-друга, то они не могут напрямую обмениваться информацией
- Максимальное по модулю управляющее воздействие ограничено
- Агенты передают друг-другу информацию только о своих абсолютных координатах

Основные требования к решению:

- Без возмущений строй должен отрабатывать заданную траекторию с малыми погрешностями
- При малых возмущениях каждый отдельно взятый агент не должен существенно отклоняться от своей позиции в строю.

Строй в целом должен по прежнему выполнять задачу, с погрешностями соразмерными возмущениям

- При краткосрочных больших возмущениях, даже если строй потерял целостность, он должен самовосстанавливаться и продолжать выполнение задачи
- При выходе из строя одного или нескольких агентов строй должен переформироваться так, чтобы сохранить исходный рисунок

2.2 Формальная постановка

Вектор состояния каждого агента в горизонтальной плоскости xu :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix},$$

где $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = y$, $x_4 = \dot{y}$. Тогда закон движения:

$$\dot{X} = AX + BU$$

3 Алгоритм управления

В предлагаемом мной алгоритме управления агентов можно разделить на два класса:

- мастер — агент, который отрабатывает движение по траектории
- миньон — поддерживает своё местоположение в строю

Закон управления для этих двух типов агентов задаётся по-разному.

3.1 Мастер

Мастером является агент, для которого желаемый закон движения S_d задаётся оператором извне: это может быть записанная в память агента траектория, целевая позиция или скорость.

Фактически, этот агент ничего не знает о существовании других агентов в строю (миньонов). Его задача — выполнение поставленного закона движения, поэтому закон управления зависит только от закона движения:

$$\vec{u} = \vec{u}(S_d)$$

Рассмотрим конкретный закон управления \vec{u}_{tr} : движение по некоторой траектории $\vec{tr}(t)$:

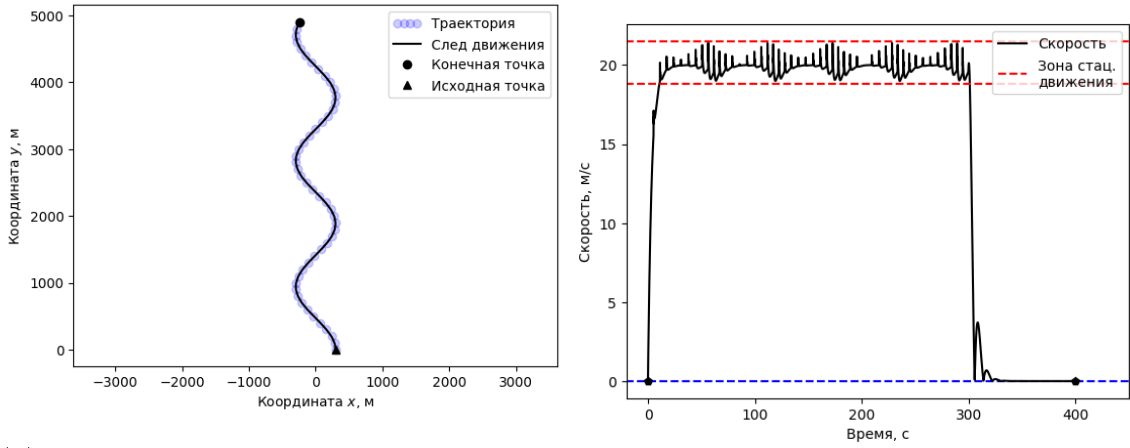
$$\vec{u}_{tr} = \vec{u}_{along} + \vec{u}_{across}$$

Закон управления состоит из двух частей. Первая \vec{u}_{along} отвечает за усилие вдоль траектории, вторая \vec{u}_{across} — поперёк. Направлением для \vec{u}_{along} служит направление вектора между текущим положением агента и следующей точкой траектории.

(Тут будет более подробно о том, как вычисляется следующая точка траектории, о алгоритмах управления на PD регуляторах, которые используются как в \vec{u}_{along} , так и в \vec{u}_{across})

Пример движения мастера по траектории, задаваемой параметрическим уравнением, где s — параметр: $s \in [0, 5000]$.

$$x(s) = 300 \cdot \cos\left(\frac{s}{300}\right); \quad y(s) = s$$



(a) Исходная траектория и след от движения

(b) Скорость движения мастера

Рис. 2: Движение мастера по заданной траектории с заданной скоростью $v_{desired} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Расстояния на рисунках задаются в метрах, время в секундах, скорость в $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

3.1.1 Оценка движения мастера по траектории

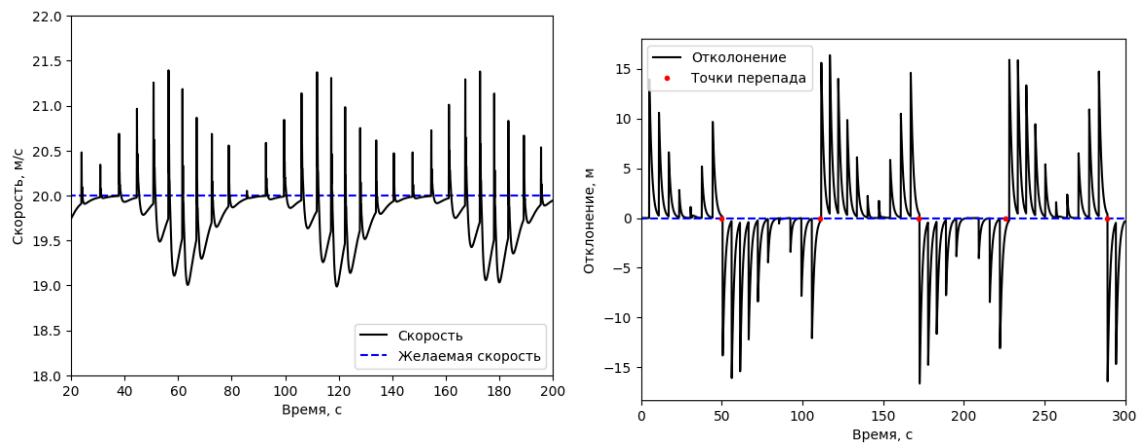
Агент преодолел заданную траекторию за $t = 331\text{с}$.

Проеденное расстояние:

$$S = \int_0^{5000} \sqrt{x'^2(s) + y'^2(s)} \, ds \approx 6051\text{м}$$

Средняя скорость $v_{av} = 18.3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Стационарным режимом движения можно назвать режим, при котором скорость агента колеблется в пределах между $18.8 \frac{м}{с}$ и $21.5 \frac{м}{с}$. Более подробно скорость мастера в стационарном режиме можно увидеть на рис. 3а



(а) Скорость мастера в стационарном режиме (б) Отклонения мастера от траектории

Рис. 3: Иллюстрация отклонений от желаемого закона движения

Отклонения агента от заданной траектории представлены на рис. 3б. Выше нуля — отклонения от траектории вправо, ниже нуля — влево. Максимальное отклонение составляет примерно 15 м.

Резкие перепады на графике, обозначенные как точки перепада объясняются тем, что в этих точках у траектории изменяется знак первой производной, а агент, всегда остающийся на внутренней части траектории резко оказывается на внешней. Проверим это утверждение. Заданное выше параметрическое уравнение фактически явля-

ется уравнением

$$x = 300 \cdot \cos\left(\frac{y}{300}\right)$$

Равенство нулю первой производной:

$$\sin\left(\frac{y}{300}\right) = 0 \Rightarrow y = 300\pi n$$

Найдём первые 5 точек траектории, в которой происходит смена знака второй производной:

$$M = \left\{(-300; 942), (300; 1885), (-300; 2827), (300; 3770), (-300; 4712)\right\}$$

Найдём моменты времени, в которые эти точки будут достигнуты агентом:

$$\hat{L}_t = \{61c, 118c, 177c, 234c, 292c\}$$

Реальные же моменты времени, в которые происходит резкое изменение величины отклонения от траектории:

$$L_t = \{50c, 110c, 172c, 226c, 289c\}$$

То есть, изменение стороны относительно линии траектории по которой движется агент изменяется незадолго до того, как будет изменён знак первой производной траектории. Эта закономерность также наблюдается на рис. 4.

(Тут будет исследование устойчивости алгоритма к случайным возмущениям)

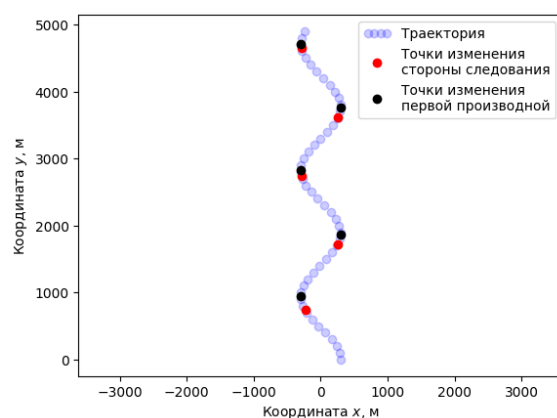


Рис. 4: Траектория с наложенными на неё точками изменения стороны следования и точками изменения знака первой производной.

3.1.2 Выводы

Движение мастера по траектории является точным и предсказуемым. Данный алгоритм управления по траектории с задаваемой скоростью является пригодным для применения.

3.2 Миньон

Миньон является ведомым агентом, во время движения он никак не использует информацию о траектории движения. Всё, что знает миньон i — это положение своего агента-лидера L . Относительно агента-лидера миньон выстраивает свой закон управления \vec{u}_m :

$$\vec{u}_m = \vec{u}_m(L)$$

Более подробно об агентах-лидерах будет сказано в гл. 4, а пока о них можно думать просто как о постоянно обновляемой точке, относительно которой агент строит некую другую точку, в которую стремится попасть. Эта точка будет называться виртуальным лидером L^v . Точка виртуального лидера своя у каждого миньона и зависит только от реального положения агента-лидера L .

Пусть, есть миньон с координатами \vec{A}_1 и виртуальным лидером в точке \vec{L}_1^v . Первый закон управления, который приходит на ум может выглядеть следующим образом:

$$\vec{u}_m(t) = S \cdot P, \text{ где } S = (\vec{L}_1^v - \vec{A}_1) \quad (1)$$

Суть такого закона управления в том, что воздействие осуществляется в направлении виртуального лидера с усилием пропорциональным расстоянию между текущей координатой и координатой виртуального лидера. Коэффициент P — пропорциональная составляющая PID регулятора.

Однако, такой закон управления не выдерживает некоторых испытаний.

3.2.1 Воздействие на агента-лидера функцией Хевисайда

Этот численный эксперимент заключается в следующем: есть пара агентов — миньон и его агент-лидер. На агента-лидера воздействует сила по закону Хевисайда, то есть, фактически, после некоторого момента времени \hat{t} появляется постоянное воздействие на агента-лидера.

Для облегчения понимания ситуации рассмотрим воздействие на примере.

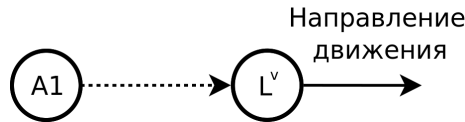


Рис. 5

На рис. 4 изображён миньон A_1 и его виртуальный лидер L^v . На L^v действует сила (распределённая как функция Хевисайда):

$$F(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \geq 5\text{с} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Если использовать закон управления, записанный уравнением (1), то возникнет ситуация, при которой расстояние между миньоном и его виртуальным агентом будет постоянно расти. Ускорение лидера будет расти быстрее, чем ускорение миньона из-за того, что агент строит свой закон управления только на основании положения лидера, ничего не зная о его ускорении и скорости. Однако передавать эти данные от лидера к миньону может оказаться слишком накладно, т.к. придётся поддерживать более широкий канал связи.

В качестве альтернативы миньон может использовать уже имеющиеся данные о положениях виртуального лидера и увеличивать управляющее воздействие, если расстояние между ним и лидером растёт \dot{S} . Так же для устранения статических ошибок добавляется I составляющая PID регулятора.

$$\vec{u}_m(t) = P \cdot S + I \cdot \int_0^t S dt + D \cdot \dot{S} \quad (2)$$

Результаты численного моделирования с данным законом управления:

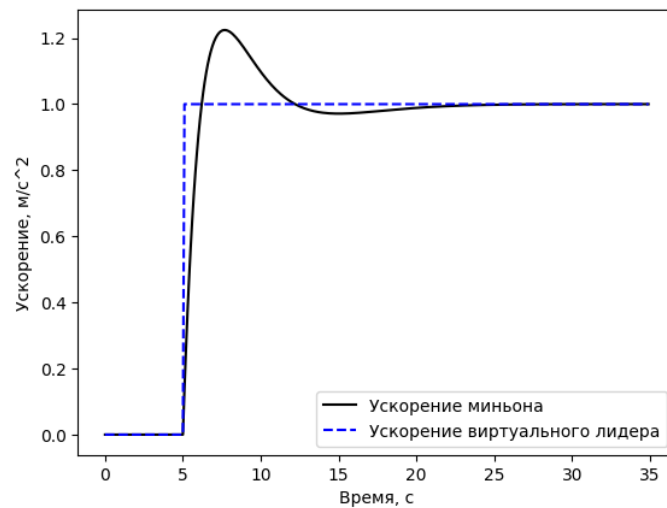


Рис. 6: Ускорение миньона и его виртуального лидера. Виртуальный лидер ускоряется по закону Хевисайда. Ускорение выходит на стационарный режим на 25с: через 20с. после воздействия.

3.2.2 Выводы

Описанный закон управления справляется с задачей приведения миньона в точку виртуального лидера и будет использован в дальней-

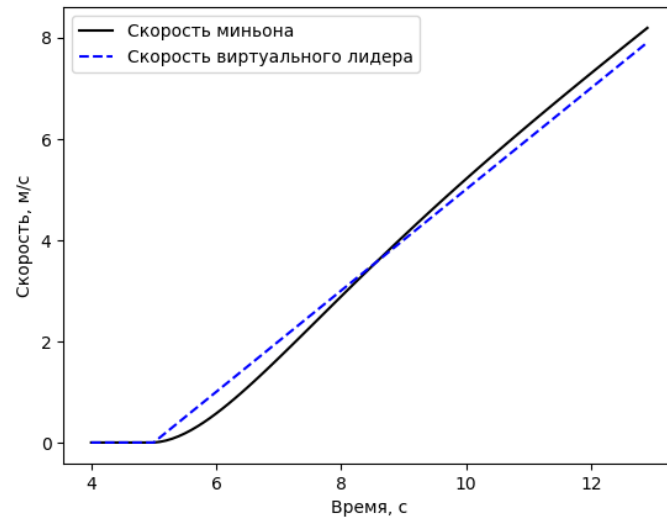


Рис. 7: Скорость миньона и виртуального лидера

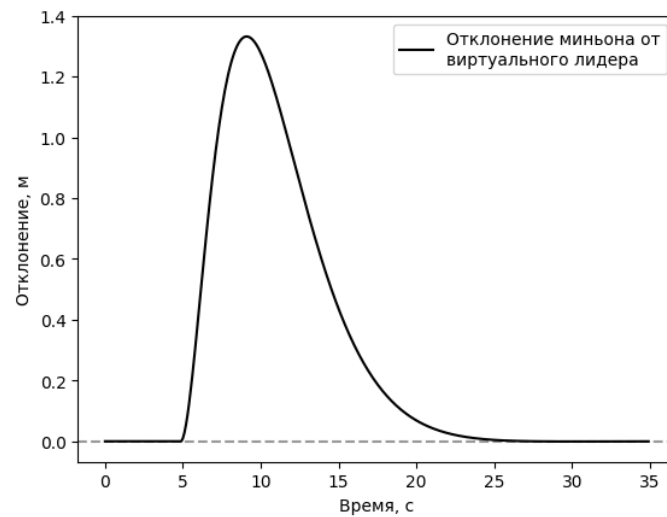


Рис. 8: Отклонение положения миньона от его виртуального агента

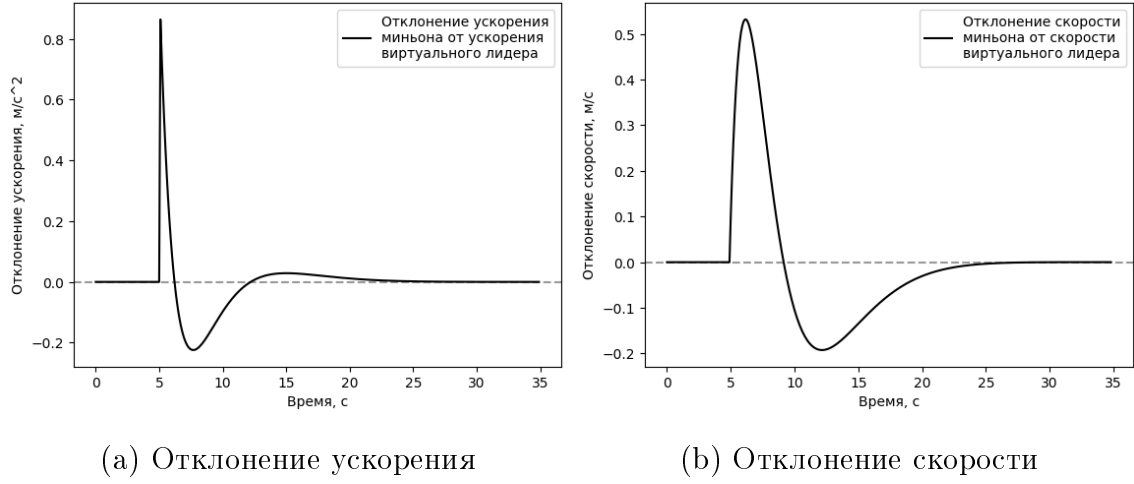


Рис. 9: Иллюстрация отклонений от закона движения виртуального лидера. Выше нуля — значение меньше, чем у лидера, ниже нуля — выше, чем у лидера.

шем для управления строем.

4 Строй

Строй представляет из себя множество агентов соединённых связями, подобно графу. Для каждого агента, не являющегося мастером должно быть определено не менее одного агента-лидера. Лидером для агента может быть как мастер, так и любой миньон. Каждый агент — вершина графа, каждая связь миньон-лидер — ребро графа. Пример строя из 5-ти агентов изображён на рис.10.

Каждая связь J_{ij} — это вектор в полярных координатах, у которого радиус — это расстояние от миньона i до миньона лидера j , а угол — это угол между изначальной ориентацией строя и вектором,

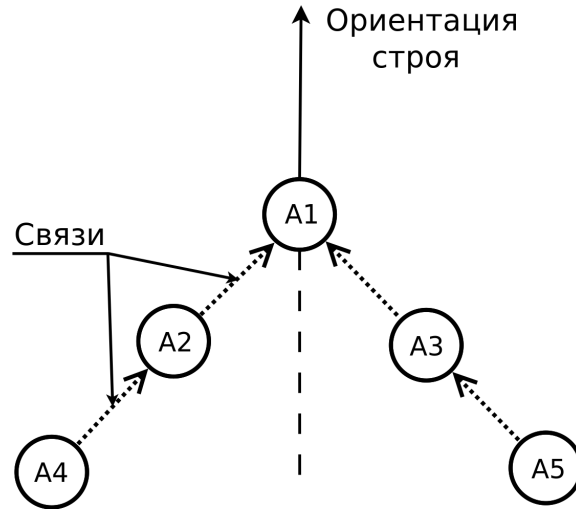


Рис. 10: Пример клиновидного строя из 5-ти агентов

соединяющим миньона с его лидером. К примеру, если расстояния между каждой парой агентов равно 1м, то связи:

- J_{1j} — не определены ни для каких j : A_1 является мастером
- $J_{21} = (r = 1\text{м}; \varphi = 225^\circ)$ — для миньона A_2 агентом лидером является мастер A_1 . Агенты находятся на расстоянии 1м, угол между соединяющим их вектором и вектором изначальной ориентации составляет 225°
- J_{31}, J_{42}, J_{53} — определяются аналогично

При повороте строя поворачивается и вектор ориентации строя, за счёт чего далее пересчитывается позиция, в которой должен находиться агент после поворота. Эта позиция будет именоваться виртуальным лидером. Виртуальный лидер — точка пространства, в которую стремиться попасть миньон для того, чтобы поддерживать фигуру строя.

Например, на рис. 11 изображён поворот строя на угол b . Для того, чтобы пересчитать позицию, в которой должен находиться миньон после поворота (виртуальный лидер) необходимо повернуть вектор изначальной ориентации O_0 на угол $b + \varphi$, где φ — угол из любого вектора связи J_{ij} миньона i , далее от положения выбранного миньона-лидера необходимо отложить расстояние равное r из вектора связи в направлении повернутого вектора изначальной ориентации O_0 .

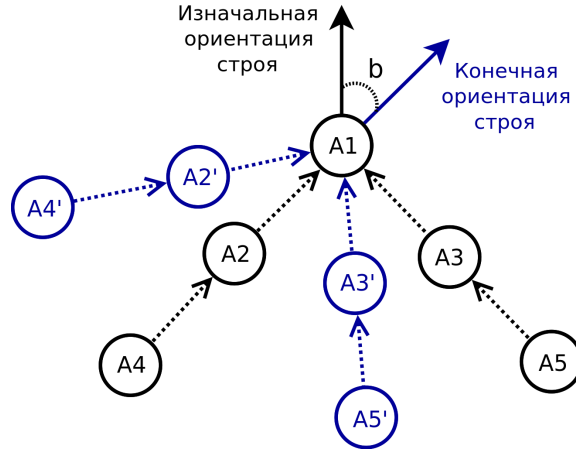


Рис. 11: Поворот строя на угол b

Рассмотрим пример того, как будет рассчитан виртуальный лидер A'_5 для агента A_5 (см. рис. 11), для которого определён вектор связи $J_{53} = (r_{53}; \varphi_{53})$ (вектор связи с A_3). Для начала повернём вектор изначальной ориентации O_0 :

$$\vec{O}_1 = \begin{pmatrix} \cos(b + \varphi_{53}) & \sin(b + \varphi_{53}) \\ \sin(b + \varphi_{53}) & \cos(b + \varphi_{53}) \end{pmatrix} \vec{O}_0$$

Теперь вдоль полученного вектора \vec{O}_1 необходимо отложить от по-

зиции агента A_3 расстояние равное r_{53} :

$$\vec{A}'_5 = \vec{A}_3 + \frac{\vec{O}_1}{|\vec{O}_1|} r_{53}$$

В приведённых выше расчётах неявно предполагалось, что агент A_3 на момент пересчёта виртуального лидера для A_5 уже находится в точке A'_3 . До тех пор, пока не будет выполнено это условие получаемое A'_5 не будет совпадать с тем, что приведено на рисунке. Однако, это ожидаемая ситуация, т.к. A_5 не знает ни о каких агентах кроме A_3 , то он и полагается только на данные, получаемые от A_3 , а если A_3 ещё не достиг точки виртуального лидера, то и в координатах виртуального лидера A'_5 будут содержаться ошибки.

Описанную выше проблему несложно решить, если строить виртуальных лидеров на основе позиции не агента-лидера, а на основе точки виртуального лидера агента-лидера. Однако, после поворота у миньонов находящихся дальше от центра поворота (центр поворота — мастер) расстояние до их виртуальных лидеров окажется больше, чем у миньонов ближе к центру поворота (см. A_3 — A'_3 в сравнении с A_5 — A'_5 на рис. 11), что приведёт к тому, что пропорциональная составляющая PID регулятора вырабатывающего управление для следования миньонов в точку виртуального лидера выдаст команду создать большее управляющее воздействие, следовательно АКБ агентов будут разряжаться более неравномерно, чем при более инертном расчёте виртуальных лидеров от позиции агентов-лидеров.

4.1 Моделирование движения строя

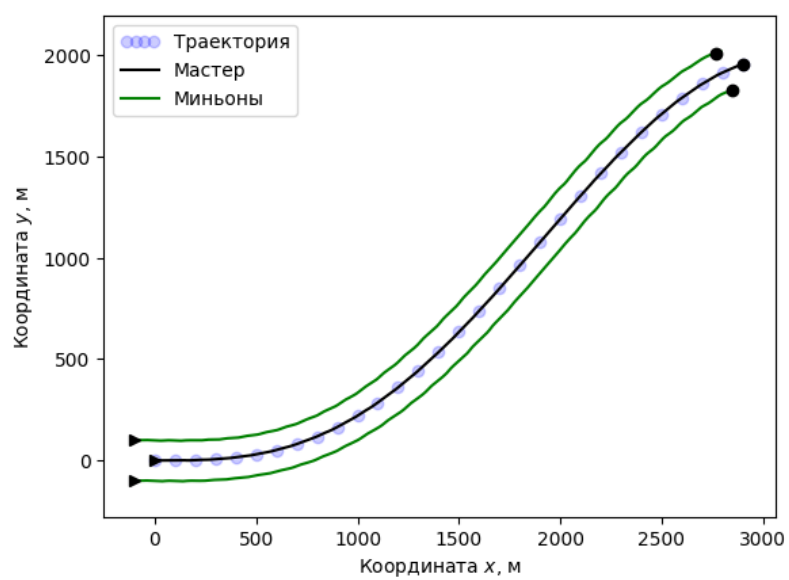


Рис. 12: Движение строем мастера и двух миньонов