

УДК 007.52
ББК 32.817

ЗАЩИТА ОТ ВЗАИМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Казанин Д. К.¹

(ПАО АНПП «Темп-Авиа», Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ), Арзамас)

Рассматривается групповой полёт гипотетических беспилотных летательных аппаратов. Реализуется стратегия предотвращения их столкновений при формировании строя. Эта стратегия основана на развитии метода искусственного потенциального поля. Произведено математическое моделирование полученных алгоритмов, подтверждающее работоспособность предложенного подхода.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, формирование строя, мультиагентная система, система управления, предотвращение столкновений, искусственное потенциальное поле.

1. Введение

В последние годы большое внимание многих исследователей привлекают задачи группового управления мультиагентными системами (МАС) [8, 10, 16, 18]. Наряду с чисто теоретическим интересом результаты решения этих задач имеют существенное практическое значение. В качестве конкретных практических примеров таких МАС можно указать системы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спутниковые

¹ Дмитрий Константинович Казанин, инженер-математик, аспирант (kazanindk@gmail.com).

группировки, автономные мобильные роботы различного назначения, распределённые сенсорные сети и т.д.

Вопросы управления группой подвижных объектов в настоящее время достаточно хорошо изучены. Основной задачей при управлении группировкой (формацией) является задача достижения консенсуса. Большинство работ по вопросам группового управления, решающих эту задачу, представляют модели агентов в виде линейных дифференциальных уравнений, во многих случаях первого или второго порядка [7, 8, 15, 18, 21, 22, 24]. Для построения алгоритмов достижения консенсуса при таком подходе эффективно применяются методы оптимизации [25] и техника линейных матричных неравенств (LMI) [9].

В [2, 3] рассмотрена архитектура распределенной системы управления групповыми действиями БПЛА и в частности задача полёта строем, которая решается за счет использования комплекса пропорционально-интегральных регуляторов, реализованных в системах управления БПЛА. Вопросы защиты от столкновений при формировании строя здесь не рассматриваются.

В работе [4] предложен подход к формированию строя БПЛА, основанный на алгоритме достижения консенсуса. Динамика объектов управления задается в виде системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка. Однако столкновения между агентами, которые могут возникнуть в процессе формирования строя, также не были рассмотрены.

Проблема защиты от столкновений, в силу ее практической значимости, в последнее время привлекает большое внимание исследователей. Для её решения были разработаны различные алгоритмы управления. Основные стратегии базируются на применении различных версий барьерных функций [19, 20] и методах прогноза [12, 14]. В работах [5, 13, 26], предложен метод искусственного потенциального поля, который можно рассматривать как специфическую версию метода барьерных функций. Стратегии, основанные на прогнозирующих моделях, изучались в работах [6, 11, 23]. Метод, основанный на искусственном потенциальном поле, активно применяется в области автономной навигации роботов. Суть его заключается в том, что

для целевых точек задаются поля притяжения, а для препятствий – отталкивающие поля, и объекты управления движутся вдоль отрицательного градиента обобщённого потенциального поля.

В [4] автором предложен алгоритм, который обеспечивает формирование строя на основе достижения консенсуса в сетевой модели группового полета. Цель этой статьи – объединить этот алгоритм с алгоритмом защиты от столкновений между агентами в процессе формирования строя и доказать его работоспособность математическим моделированием. Для решения используется развитие предложенного в [17] метода искусственного потенциального поля. Этот метод является наиболее адекватным по отношению к рассматриваемой задаче, поскольку приводит к относительно простым алгоритмам. В то же время в силу того, что объекты управления, образующие строй, движутся с большими скоростями, управление с прогнозирующими моделями требует высокого быстродействия вычислителя, достичь которого на борту БПЛА разового применения технически сложно и нерационально. Другие методы, изложенные в перечисленных выше источниках, либо существенно привязаны к наземным объектам, либо связаны с конкретными задачами и не допускают развития на рассматриваемую далее задачу.

2. Постановка задачи

Рассмотрим N гипотетических беспилотных летательных аппаратов, которые являются агентами МАС. Они гомогенны и движутся в среде без статических препятствий. Полная линейная модель динамики каждого агента представлена следующей системой дифференциальных уравнений [1]:

$$(1) \left\{ \begin{array}{l} \ddot{\vartheta} + a_1 \dot{\vartheta} + a_2 \alpha + a_{32} \delta_2 + a_{33} \delta_3 = 0, \\ a_4 \alpha + a_{52} \delta_2 + a_{53} \delta_3 = \dot{\vartheta}, \\ \vartheta = \theta + \alpha, \\ \ddot{\psi} + b_1 \dot{\psi} + b_{11} \dot{\gamma} + b_2 \beta + b_{31} \delta_1 + b_{32} \delta_2 + b_{33} \delta_3 = 0, \\ b_4 \beta + b_{51} \delta_1 + b_{52} \delta_2 + b_{53} \delta_3 = \dot{\psi}, \\ \psi = \varphi + \beta, \\ \ddot{\gamma} + c_1 \dot{\gamma} + c_{11} \dot{\psi} + c_2 \beta + c_{31} \delta_1 + c_{32} \delta_2 + c_{33} \delta_3 = 0, \\ \sigma_{\vartheta} = i_{\text{в}} (n_y - n_{y\text{зад}}) + \rho_{\text{в}} \dot{\vartheta}, \\ \sigma_{\psi} = i_{\text{н}} (n_z - n_{z\text{зад}}) + \rho_{\text{н}} \dot{\psi}, \\ \sigma_{\gamma} = i_{\gamma} (\gamma - \gamma_{\text{зад}}) + \rho_{\gamma} \dot{\gamma}, \\ \delta_1 = k_{11} \sigma_{\vartheta} + k_{12} \sigma_{\psi} + k_{13} \sigma_{\gamma}, \\ \delta_2 = k_{21} \sigma_{\vartheta} + k_{22} \sigma_{\psi} + k_{23} \sigma_{\gamma}, \\ \delta_3 = k_{31} \sigma_{\vartheta} + k_{32} \sigma_{\psi} + k_{33} \sigma_{\gamma}, \end{array} \right.$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \vartheta, \psi, \theta, \varphi$ – углы атаки, скольжения, крена, тангажа, рыскания и траекторные углы; $\sigma_{\vartheta}, \sigma_{\psi}, \sigma_{\gamma}$ – каналные управляющие сигналы системы автоматического управления (САУ); n_y, n_z – текущие перегрузки; $n_{y\text{зад}}, n_{z\text{зад}}$ – заданные перегрузки; $\gamma_{\text{зад}}$ – заданный угол крена ($\gamma_{\text{зад}} = 0$); δ_i – углы отклонения рулей БПЛА; $i_{\text{в}}, i_{\text{н}}, i_{\gamma}, \rho_{\text{в}}, \rho_{\text{н}}, \rho_{\gamma}$ – передаточные числа САУ по позиционным и демпфирующим сигналам; k_{ij} – передаточные числа блока кинематической разводки рулей; $a_i, a_{ij}, b_i, b_{ij}, c_i, c_{ij}$ – аэродинамические коэффициенты.

Аналогично работе [4] предполагается, что пуск объектов (БПЛА) производится с носителя поочередно в разные моменты времени. Начальные координаты движения объектов соответствуют координатам носителя в момент пуска. Каждый объект движется за виртуальным лидером (следует заданной траектории). Алгоритмы управления продольным, боковым движением и движением в канале тяги выводят БПЛА на заданные координаты относительно виртуального лидера, что приводит к фор-

мированию строя, но не гарантирует защиту от взаимных столкновений.

В процессе формирования строя объекты управления должны избегать столкновения между собой. В частности каждый агент должен стремиться выйти на заданную позицию, не допуская при этом опасного сближения с соседними агентами. Заданная позиция определяется исходя из геометрической формы строя БПЛА.

Для достижения поставленной цели сделаны следующие допущения:

1. Каждый объект управления имеет информацию о виртуальном лидере (текущие координаты (x_v, y_v, z_v) и проекции скоростей (v_{vx}, v_{vy}, v_{vz})) и двунаправленный канал связи с каждым агентом в сети.

2. Моделируемый виртуальный лидер движется независимо от других агентов.

3. Предотвращение столкновений

3.1. ИДЕЯ МЕТОДА ИСКУССТВЕННОГО ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим алгоритм защиты от столкновений для группы БПЛА, основанный на методе искусственного потенциального поля.

Суть метода заключается в том, что при обнаружении риска столкновения между агентами в системе управления каждого агента автоматически формируются управляющие сигналы для продольного, бокового канала и канала тяги, в результате чего объекты управления выходят на безопасное расстояние друг относительно друга.

Как показано на рис. 1, область безопасности задаётся относительно центра масс БПЛА и представлена в виде сферы с радиусом R . Как только сферы двух и более агентов начинают пересекаться между собой, включается алгоритм предотвращения столкновений, который непрерывно действует до того момента, пока не будут изолированы области безопасности всех объектов управления в системе.

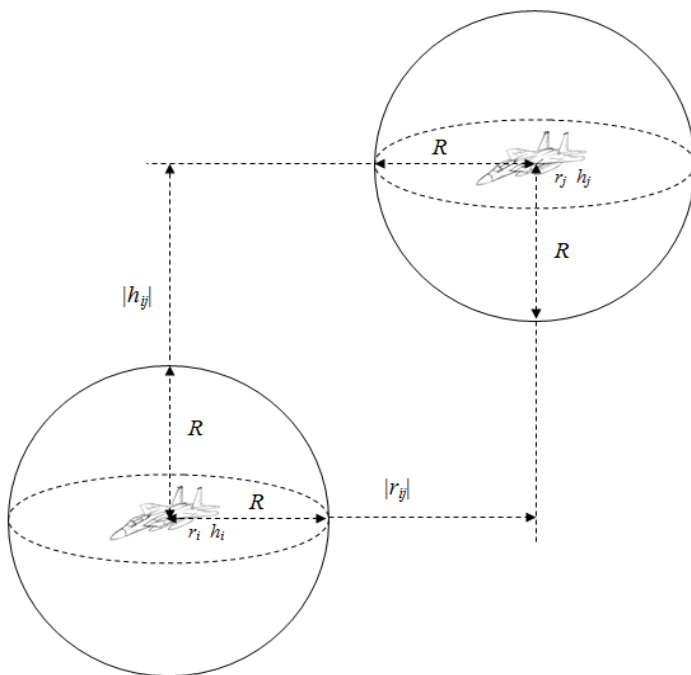


Рис. 1. Области безопасности БПЛА

Предлагаемый подход к решению задачи предотвращения столкновений между агентами основан на модификации подхода, предложенного в [17]. В [17] задача защиты от столкновений решается для систем квадрокоптеров и для одного высотного канала с цилиндрической областью безопасности. В данной же работе задача предотвращения столкновений между агентами должна решаться для всех трёх каналов, в связи с чем вводится сферическая область безопасности и разрабатываются алгоритмы защиты от столкновений для каждого канала в отдельности.

3.2. ПОКАНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ЗАЩИТЫ ОТ СТОЛКНОВЕНИЙ

Рассмотрим алгоритм защиты от столкновений для продольного канала. Пусть r_i и h_i – позиция в горизонтальной плоскости и высота, на которой расположен i -й агент. Тогда и относительное расстояние в горизонтальной плоскости $|r_{ij}|$, и отклонение по высоте между i -м и j -м агентами $|h_{ij}|$ определяются соотношениями

$$\begin{aligned} |r_{ij}| &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \\ (2) \quad |h_{ij}| &= |h_i - h_j|, \\ i, j &\in \{1, \dots, N\}. \end{aligned}$$

Для бокового канала и канала тяги получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} |s_{ij}| &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (h_i - h_j)^2}, \\ (3) \quad |z_{ij}| &= |z_i - z_j|, \\ i, j &\in \{1, \dots, N\}, \\ |d_{ij}| &= \sqrt{(h_i - h_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \\ (4) \quad |x_{ij}| &= |x_i - x_j|, \\ i, j &\in \{1, \dots, N\}, \end{aligned}$$

где s_i и z_i – позиция в вертикальной плоскости и боковое отклонение, на котором расположен i -й агент; $|s_{ij}|$ и $|z_{ij}|$ – относительное расстояние в вертикальной плоскости и боковое отклонение между i -м и j -м агентами; d_i и x_i – позиция в вертикальной плоскости и отклонение в канале тяги, на котором расположен i -й агент; $|d_{ij}|$ и $|x_{ij}|$ – относительное расстояние в вертикальной плоскости и отклонение в канале тяги между i -м и j -м агентами.

Искусственные потенциальные поля, создаваемые агентами i и j , зададим следующим образом:

$$(5) \quad U_{hij} = \begin{cases} K_h \cdot \left(\frac{1}{|h_{ij}|+1} - \frac{1}{2R+1} \right)^2, & (|h_{ij}| \leq 2R) \wedge (|r_{ij}| \leq 2R), \\ 0, & (|h_{ij}| > 2R) \vee (|r_{ij}| > 2R); \end{cases}$$

$$(6) \quad U_{zij} = \begin{cases} K_z \cdot \left(\frac{1}{|z_{ij}|+1} - \frac{1}{2R+1} \right)^2, & (|z_{ij}| \leq 2R) \wedge (|s_{ij}| \leq 2R), \\ 0, & (|z_{ij}| > 2R) \vee (|s_{ij}| > 2R); \end{cases}$$

$$(7) \quad U_{xij} = \begin{cases} K_x \cdot \left(\frac{1}{|x_{ij}|+1} - \frac{1}{2R+1} \right)^2, & (|x_{ij}| \leq 2R) \wedge (|d_{ij}| \leq 2R), \\ 0, & (|x_{ij}| > 2R) \vee (|d_{ij}| > 2R); \end{cases}$$

где U_{hij} , U_{zij} , U_{xij} – потенциалы искусственных полей в продольном, боковом каналах и канале тяги для i -го и j -го агентов; K_h , K_z , K_x – положительные коэффициенты усиления, определяющие допустимый уровень отклонения агента от границы области безопасности.

Согласно выражениям (5)–(7) с увеличением $|h_{ij}|$, $|s_{ij}|$ и $|d_{ij}|$ потенциалы полей между i -м и j -м агентами уменьшаются. Кроме того, потенциалы равны 0, когда области безопасности агентов i и j не пересекаются.

Пусть имеется M агентов ($M < N$), области безопасности которых пересекаются с соответствующей областью i -го агента. Тогда средние потенциалы U_{hi} , U_{zi} и U_{xi} определяются по формулам

$$(8) \quad U_{hi} = \frac{1}{M} \sum_{\substack{j=1, j \neq i, \\ U_{hij} \neq 0}}^N U_{hij},$$

$$(9) \quad U_{zi} = \frac{1}{M} \sum_{\substack{j=1, j \neq i, \\ U_{zij} \neq 0}}^N U_{zij},$$

$$(10) \quad U_{xi} = \frac{1}{M} \sum_{\substack{j=1, j \neq i, \\ U_{xij} \neq 0}}^N U_{xij}.$$

Результирующие искусственные потенциальные поля U_{hc} , U_{zc} , U_{xc} , создаваемые всеми БПЛА в продольных, боковых каналах и каналах тяги, вычисляются согласно выражениям

$$(11) U_{hc} = \sum_{i=1}^N U_{hi},$$

$$(12) U_{zc} = \sum_{i=1}^N U_{zi},$$

$$(13) U_{xc} = \sum_{i=1}^N U_{xi}.$$

Для предотвращения столкновения i -го агента с другими агентами в продольный, боковой каналы и канал тяги подаются управляющие сигналы f_{hcavi} , f_{zcvai} , f_{xcavi} :

$$(14) f_{hcavi} = -\nabla_{h_i} U_{hc},$$

$$(15) f_{zcvai} = -\nabla_{z_i} U_{zc},$$

$$(16) f_{xcavi} = -\nabla_{x_i} U_{xc}.$$

Для всей системы получаем

$$(17) f_{hcav} = -\nabla_h U_{hc} = -\left[\frac{\partial U_{hc}}{\partial h_1}, \frac{\partial U_{hc}}{\partial h_2}, \dots, \frac{\partial U_{hc}}{\partial h_N} \right]^T,$$

$$(18) f_{zcv} = -\nabla_z U_{zc} = -\left[\frac{\partial U_{zc}}{\partial z_1}, \frac{\partial U_{zc}}{\partial z_2}, \dots, \frac{\partial U_{zc}}{\partial z_N} \right]^T,$$

$$(19) f_{xcav} = -\nabla_x U_{xc} = -\left[\frac{\partial U_{xc}}{\partial x_1}, \frac{\partial U_{xc}}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial U_{xc}}{\partial x_N} \right]^T.$$

В результате управляющий сигнал действует в сторону уменьшения потенциала и увеличения отклонения по высоте, бокового отклонения и отклонения в канале тяги между агентами в системе.

Общее управление для i -го агента в продольном канале $h_{i \text{ зад}}$ (заданная высота полёта), в боковом канале $z_{i \text{ зад}}$ (заданное боковое отклонение) и в канале тяги $x_{i \text{ зад}}$ (заданное отклонение в канале тяги) вычисляются следующим образом:

$$(20) h_{i\text{зад}} = f_{h\text{formi}} + f_{hcavi},$$

$$(21) z_{i\text{зад}} = f_{z\text{formi}} + f_{zcavi},$$

$$(22) x_{i\text{зад}} = f_{x\text{formi}} + f_{xcavi},$$

где $f_{h\text{formi}}, f_{z\text{formi}}, f_{x\text{formi}}$ – управляющие сигналы для формирования строя (заданные высота, боковое отклонение и отклонение в канале тяги i -го агента в строю).

Продольное и боковое движение для i -го агента реализуется согласно законам управления, полученным в [4] на основе достижения консенсуса для группы агентов, описываемых моделями (1):

$$(23) n_{iy\text{зад}} = k_{ih} \cdot \Delta h_i + k_{idh} \cdot v_{iy} + \cos\theta_i, \quad \Delta h_i = h_i - h_{i\text{зад}},$$

$$(24) n_{iy\text{зад}} = \frac{v_i^2 \cdot (1 - \cos\theta_i)}{g \cdot \Delta h_i} + \cos\theta_i,$$

$$(25) n_{iz\text{зад}} = k_{iz} \cdot \Delta z_i + k_{idz} \cdot v_{iz}, \quad \Delta z_i = z_i - z_{i\text{зад}},$$

где $n_{iy\text{зад}}$ – заданная перегрузка для продольного канала; v_{iy} – проекция скорости; θ_i – траекторный угол; k_{ih}, k_{idh} – коэффициенты ПД-регулятора; v_i – модуль скорости полёта; g – ускорение свободного падения; $n_{iz\text{зад}}$ – заданная перегрузка для бокового канала; v_{iz} – проекция скорости; k_{iz}, k_{idz} – коэффициенты ПД-регулятора.

Движение в канале тяги для i -го агента реализуется согласно закону управления, полученному в [4] на основе нечёткой логической системы со входом Δx_i :

$$(26) \Delta x_i = x_i - x_{i\text{зад}}.$$

Полученное в итоге управление для i -го агента обеспечивает защиту от столкновений и формирование строя в продольном, боковом каналах и канале тяги.

4. Моделирование

В рамках движения группы гипотетических БПЛА на основе полных нелинейных моделей каждого агента [1] было проведено моделирование алгоритма предотвращения столкновений между объектами управления.

На первом этапе было проведено моделирование алгоритма предотвращения столкновений для каждого канала отдельно. На протяжении всего времени полёта агенты движутся по заданным координатам относительно виртуального лидера, формируя при этом строй. Затем выбираются два БПЛА, координаты которых отличаются между собой только по одному каналу, и в определённый момент один из агентов производит отклонение в сторону другого. Тем самым возникает риск столкновения БПЛА, которое система управления должна предотвратить. В таблице 1 приведены заданные координаты этих агентов до сближения по каждому каналу отдельно.

Таблица 1. Заданные координаты (одноканальное моделирование)

№№ агента j	Смещение в канале тяги $x_{\text{зад } j}$, м	Высота $h_{\text{зад } j}$, м	Боковое отклонение $z_{\text{зад } j}$, м
1	x_v	$y_v + 2000$	$z_v - 50$
2	$x_v - 100$	$y_v + 1900$	$z_v + 50$

В таблице 1 x_v , y_v , z_v – текущие координаты виртуального лидера.

Результаты моделирования представлены на рис. 2–9. Рис. 2, 4 и 8 демонстрируют защиту от столкновений в боковом и продольном каналах соответственно (сплошная линия – траектория агента 1, пунктирная линия – траектория агента 2). Видно, что при опасном сближении траектории начинают расходиться. На рис. 3, 5–7 и 9 можно наблюдать ненулевое расстояние между двумя агентами в боковом канале, канале тяги и продольном канале.

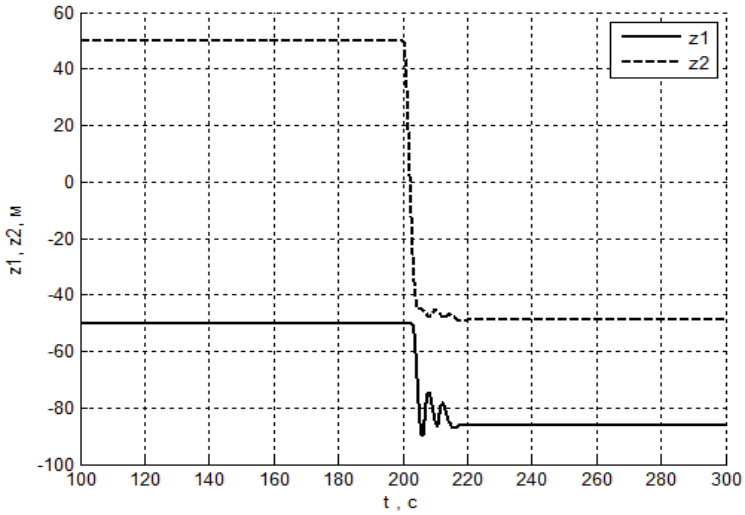


Рис. 2. Боковой канал (отклонение второго агента в сторону первого)

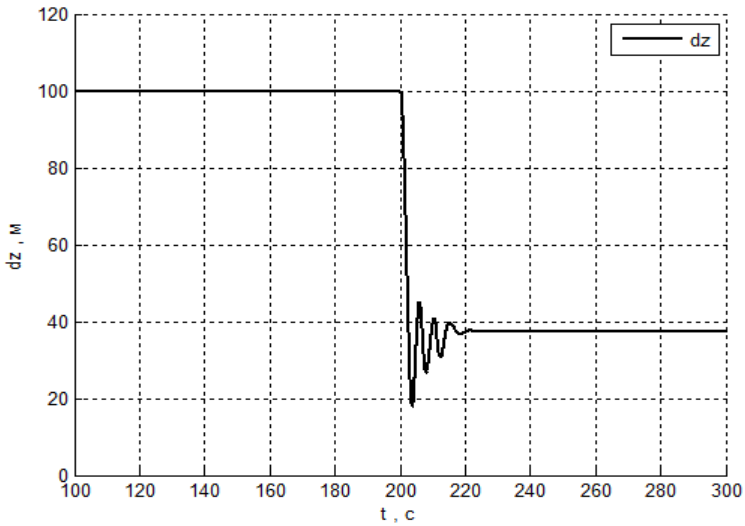


Рис. 3. Расстояние между агентами в боковом канале (отклонение второго агента в сторону первого)

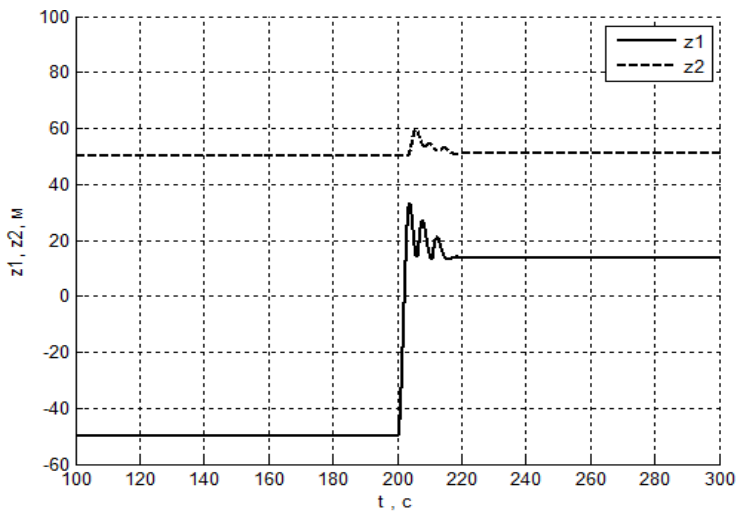


Рис. 4. Боковой канал (отклонение 1-го агента в сторону 2-го)

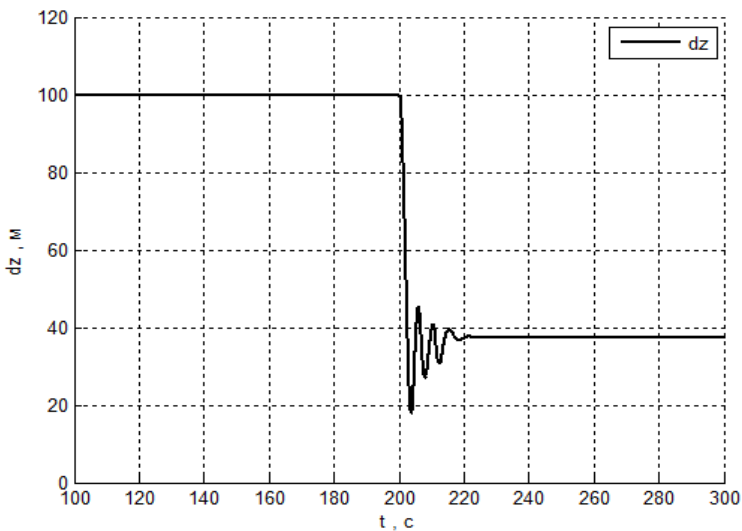


Рис. 5. Расстояние между агентами в боковом канале (отклонение 1-го агента в сторону 2-го)

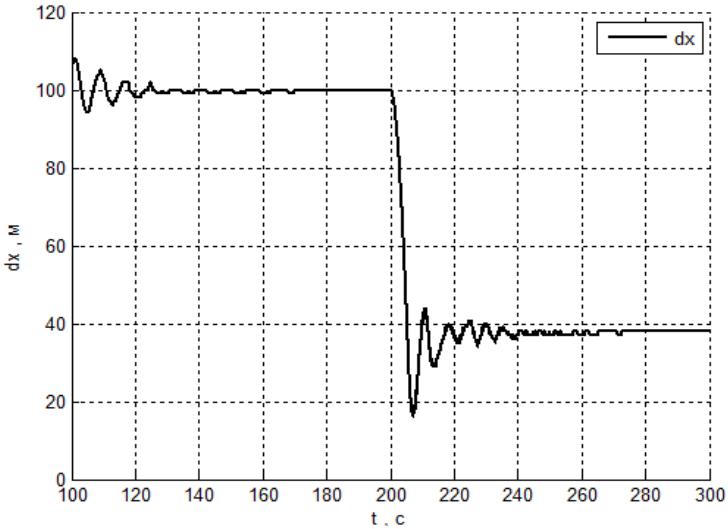


Рис. 6. Расстояние между агентами в канале тяги (отклонение 2-го агента в сторону 1-го)

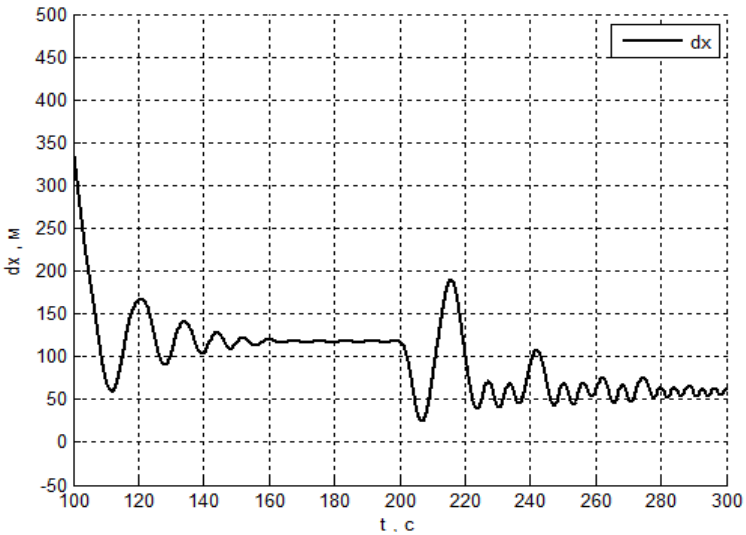


Рис. 7. Расстояние между агентами в канале тяги (отклонение 1-го агента в сторону 2-го)

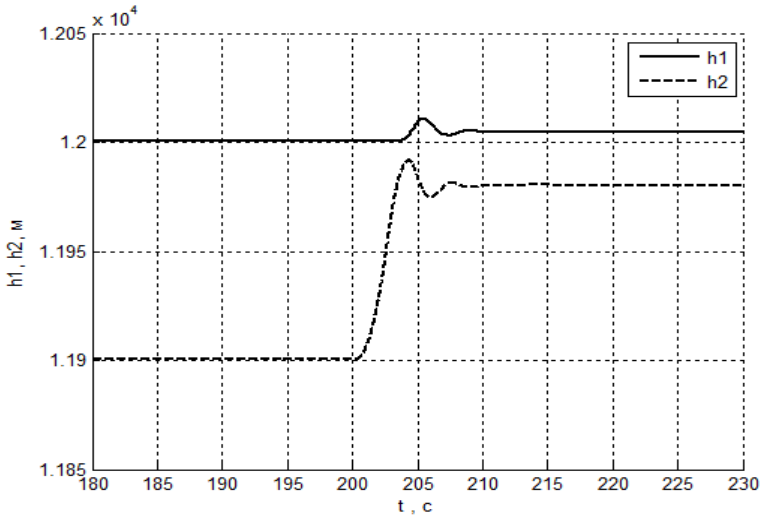


Рис. 8. Продольный канал (отклонение 2-го агента в сторону 1-го)

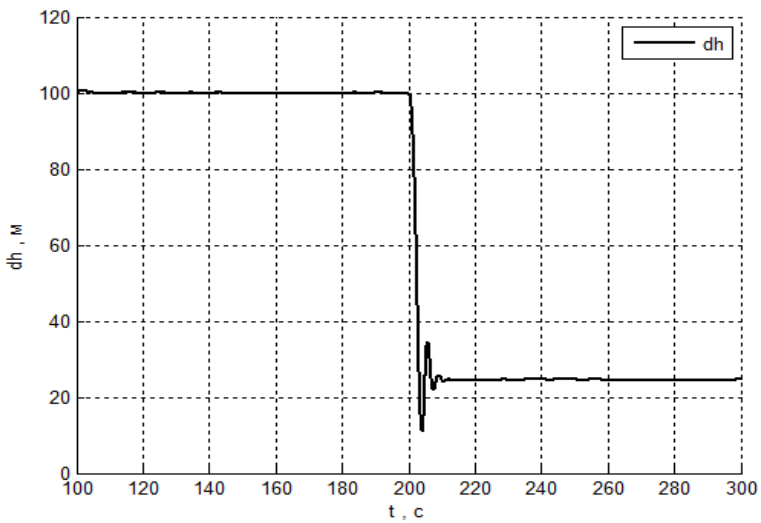


Рис. 9. Расстояние между агентами в продольном канале (отклонение 2-го агента в сторону 1-го)

Затем была промоделирована работа алгоритмов предотвращения столкновений для всех каналов одновременно. Рассматривались 3 агента, которые на протяжении всего времени полёта двигались по заданным координатам относительно виртуального лидера, формируя при этом строй. Затем в определённый момент времени 2 и 3 агенты производят отклонение в сторону 1. Тем самым возникает риск столкновения БПЛА, которое система управления должна предотвратить. В таблице 2 приведены заданные координаты этих агентов до сближения.

Таблица 2. Заданные координаты (трёхканальное моделирование)

№№ агента j	Смещение в канале тяги $x_{зад j}$, м	Высота $h_{зад j}$ м	Боковое отклонение $z_{зад j}$, м
1	x_v	y_v	z_v
2	$x_v - 50$	$y_v - 100$	$z_v - 50$
3	$x_v - 50$	$y_v - 100$	$z_v + 50$

Результаты моделирования представлены на рис. 10–12.

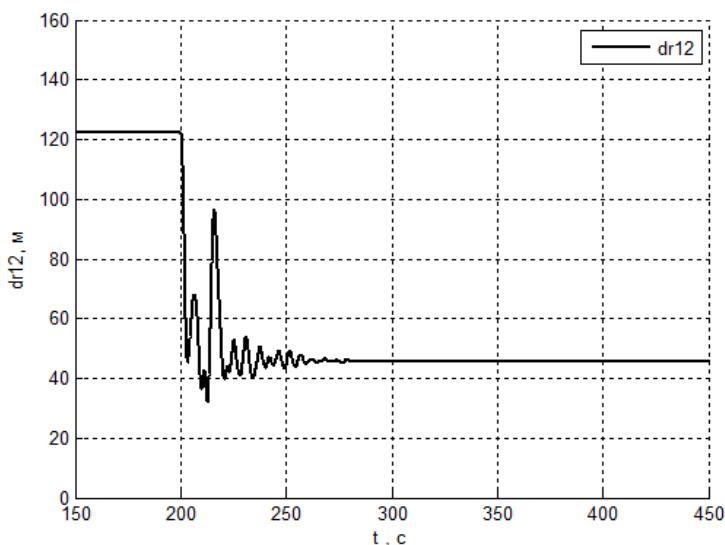


Рис. 10. Расстояние между 1 и 2 агентами

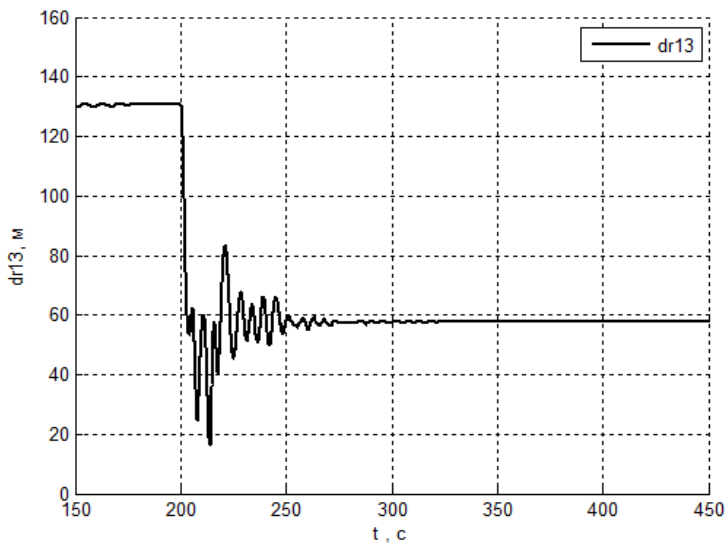


Рис. 11. Расстояние между 1 и 3 агентами

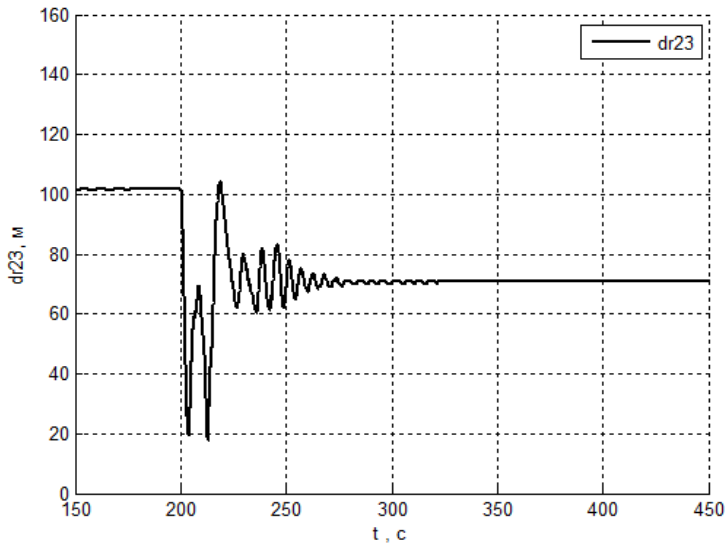


Рис. 12. Расстояние между 2 и 3 агентами

На этих рисунках можно наблюдать графики ненулевых расстояний между агентами. Видно, что в определённый момент времени агенты начинают опасное сближение, но система управления своевременно выводит их на безопасное расстояние, которое затем стабилизируется.

5. Заключение

1. На основе развития предложенного в [17] метода искусственного потенциального поля в рамках сетевой модели решена задача защиты от столкновений БПЛА при групповом полете в процессе формирования строя.

2. Результаты моделирования на основе полных нелинейных моделей объектов подтверждают работоспособность предложенного метода предотвращения столкновений по каждому из рассмотренных каналов.

3. Предложенный алгоритм может быть применен для решения задачи наведения группы БПЛА на заданную цель, в которой формирование строя является первым подготовительным этапом.

Литература

1. АБАДЕЕВ Э.М., ЛЯПУНОВ В.В., ТРУСОВ В.Н. *Основы формирования облика систем управления авиационного ракетного вооружения.* – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2012. – 176 с.
2. ЕВДОКИМЕНКОВ В.Н., КРАСИЛЬЩИКОВ М.Н. *Распределённая система интеллектуального управления группой беспилотных летательных аппаратов: методы и алгоритмы* // Аналитическая механика, устойчивость и управление: труды XI Международной Четаевской конференции: пленарные доклады. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. – С. 113–124.
3. ЕВДОКИМЕНКОВ В.Н., КРАСИЛЬЩИКОВ М.Н., ОРКИН С.Д. *Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля.* – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 272 с.
4. КАЗАНИН Д.К. *Частный алгоритм управления мультиагентной системой* // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – №11. – С. 27–34.
5. ATINC G.M. *Collision-Free Trajectory Tracking While Preserving Connectivity in Unicycle Multi-Agent Systems* // American Control Conference. – 2013. – P. 5392–5397.
6. BOIVIN E., DESBIENS A., GAGNON E. *UAV Collision Avoidance Using Cooperative Predictive Control* // 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre. – 2008. – P. 682–688.
7. CAO Y., REN W. *Optimal Linear-Consensus Algorithms: An LQR Perspective* // IEEE T. On Systems, Man, And Cybernetics. Part B: Cybernetics. – 2010. – Vol. 40, No. 3. – P. 819–830.

8. FAX J., OLFATI-SABER R., MURRAY R. *Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems* // Proc. of the IEEE. – 2007. – Vol. 95, No. 1. – P. 215–233.
9. GHADAMI R., SHAFAI B. *Distributed H2 Control of Multi-Agent Dynamic Systems: Continuous-Time Case* // American Control Conference. – 2010. – P. 3969–3974.
10. GUERRERO A., LOZANO R. *Flight formation control* // Wiley. – 2012. – Vol. 342.
11. HAFREZ A.T. *Encirclement of Multiple Targets using Model Predictive Control* // American Control Conference. – 2013. – P. 3147–3152.
12. JOEL G., DEBASISH G. *A Reactive Inverse PN Algorithm for Collision Avoidance among Multiple Unmanned Aerial Vehicles* // American Control Conference. – 2009. – P. 3890–3895.
13. LEONARD N., FIORELLI E. *Virtual Leaders, Artificial Potentials Control of Groups and Coordinated* // Proc. of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. – 2001. – P. 2968–2973.
14. LIN Y., SARIPALLI S. *Collision Avoidance for UAVs Using Reachable Sets* // Int. Conference on Unmanned Aircraft Systems. – 2015. – Vol. 10. – P. 226–235.
15. MENG Z., REN W. *Leaderless and Leader-Following Consensus With Communication and Input Delays Under a Directed Network Topology* // IEEE T. on Systems, Man, and Cybernetics. – 2011. – Vol. 41, No. 1. – P. 75–88.
16. MURRAY R. *Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems* // J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2007. – Vol. 129. – P. 571–583.
17. NAMERIKAWA T., KURIKI Y. *Consensus-based Cooperative Formation Control with Collision Avoidance for a Multi-UAV System* // American Control Conference. – 2014. – P. 2077–2082.

18. OLFATI-SABER R., MURRAY R. *Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time-Delays* // IEEE T. on Automatic Control. – 2004. – Vol. 49, No. 9. – P. 1520–1532.
19. PANAGOUD D., STIPANOVIC M., VOULGARIS G. *Distributed Coordination Control for Multi-Robot Networks Using Lyapunov-Like Barrier Functions* // IEEE T. on Automatic Control. – 2016. – Vol. 61, No. 3. – P. 617–632.
20. PARK J., OH H., TAHK M. *UAV Collision Avoidance Based on Geometric Approach* // SICE Annual Conference. – 2008. – P. 2122–2126.
21. REN W. *Consensus Tracking Under Directed Interaction Topologies: Algorithms and Experiments* // IEEE T. on Control Systems Technology. – 2010. – Vol. 18, No. 1. – P. 230–237.
22. REN W. *Information consensus in multivehicle cooperative Control* // IEEE Control Systems magazine. – 2007. – Vol. 27, No. 2. – P. 71–82.
23. RICHARDS A., HOW J. *Decentralized Model Predictive Control of Cooperating UAVs* // Decision and Control (CDC), IEEE 43rd Annual Conference. – 2004. – P. 4286–4291.
24. SORESEN N., REN W. *Distributed coordination architecture for multi-robot formation control* // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – Vol. 56. – P. 324–333.
25. TORRE G.D.L., YUCELEN T., JOHNSON E. *Constrained Formation Protocols for Networked Multiagent Systems* // Int. Conference on Unmanned Aircraft Systems. – 2013. – P. 824–830.
26. ZAVLANOS M.M., PAPPAS G.J. *Potential Fields for Maintaining Connectivity of Mobile Networks* // IEEE T. on Robotics. – 2007. – Vol. 23, No. 4. – P. 812–816.

MUTUAL COLLISION AVOIDANCE IN THE FORMATION OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLES

Dmitriy Kazanin, «Temp-Avia», Arzamas Polytechnical institute, Arzamas, engineer-mathematician, post-graduate student (kazanindk@gmail.com).

Abstract: A group flight of hypothetical unmanned aerial vehicles is considered, during which mutual collisions are possible. A collision avoidance strategy is proposed during the group flight formation of these vehicles. This strategy is based on the method of artificial potential field. The method consists in that when a collision risk is detected between agents, control signals for the longitudinal, lateral channel and thrust channel are automatically generated in the control system of each agent and the control objects reach a safe distance relative to each other. Collision avoidance algorithms have been simulated. At the first stage, collision avoidance algorithms for each channel are simulated separately. Agents move at specified coordinates relative to the virtual leader. Then two UAVs are selected, the coordinates of which differ only on one channel, and one of the agents deviates towards the other. Then collision avoidance algorithms are simulated for all channels simultaneously. Three agents are considered, which move along given coordinates relative to the virtual leader, thus forming a system. Then the second and third agents deviate towards the first. Thus the risk of UAV collision arises. The simulation results demonstrate that these control algorithms prevent all possible collisions.

Keywords: unmanned aerial vehicle, multi-agent system, control system, collision avoidance, artificial potential field.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии И.Б. Фуртатом.

Поступила в редакцию 30.05.2017.

Опубликована 30.09.2017.