

Групповое преследование на плоскости с моделированием области обнаружения

А.А. Дубанов¹

¹ Бурятский Государственный Университет им. Д. Банзарова, ул. Смолина, 24 А, Улан-Удэ, 670000, Россия

Аннотация

В данной статье производится описание модели преследования методом погони группой объектов. Все объекты, участвующие в модели преследования, движутся с постоянной по модулю скоростью. Преследующий объект движется по определенной траектории и выпускает через заданные промежутки времени объекты, задачей которых является настигнуть цель методом погони. Одиночной цели, в свою очередь, поставлена задача, настигнуть преследователя методом параллельного сближения. Для каждого преследующего объекта сформирована область обнаружения. Область обнаружения образуется двумя лучами. Вектор скорости объекта является биссектрисой угла, образованного такими лучами. Если цель попадает в область обнаружения, то объект начинает преследование методом погони. Если цель выходит из области обнаружения, то объект совершает равномерное и прямолинейное движение. Задачей является реализовать динамическую модель множественного группового преследования, где каждый объект имеет свои задачи, свои стратегии. Модель разработана с использованием систем компьютерной математики. По результатам исследований были созданы анимированные изображения. Методы наведения на цель, такие как метод погони, метод параллельного сближения и метод пропорционального сближения являются широко применяемыми в военном деле. Но они, в большинстве своем, требуют внешнего управления, такого, как указания цели лазерным лучом или спутникового наведения на цель. Описание методов наведения на цель в автономном режиме в открытых источниках информации отсутствует. Результаты исследований могут быть востребованы при проектировании беспилотных летательных аппаратов с элементами автономного управления и искусственного интеллекта.

Ключевые слова

Параллельное преследование, метод погони, цель, преследователь, траектория, коррекция.

Group Pursuit on a Plane with Modeling Detection Area

A.A. Dubanov¹

¹ Banzarov Buryat State University, Smolin-street, 24 A, Ulan-Ude, 670000, Russia

Abstract

This article describes the pursuit model by the method of chasing a group of objects. All objects participating in the pursuit model move at a constant modulo velocity. The pursuing object moves along a certain trajectory and releases objects at specified intervals, whose task is to overtake the target by the chase method. A single target, in turn, is tasked to overtake the pursuer by the method of parallel convergence. A detection area is formed for each pursuing object. The detection area is formed by two beams. The velocity vector of an object is the bisector of the angle formed by such rays. If the target is in the detection area, then the object begins the pursuit by the chase method. If the target leaves the detection area, then the object makes a uniform and rectilinear movement. The task is to implement a dynamic model of multiple group pursuing, where each object has its own tasks, its own strategies. The model is developed using computer mathematics systems. According to the results of the research, animated images were created. Targeting methods such as the chase

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: alandubanov@mail.com (А.А. Дубанов)

ORCID: 0000-0002-1855-2562 (А.А. Дубанов)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

method, the parallel approach method and the proportional approach method are widely used in military affairs. But they, for the most part, require external control, such as pointing the target with a laser beam or satellite guidance to the target. There is no description of methods of targeting in offline mode in open sources of information. The research results may be in demand when designing unmanned aerial vehicles with elements of autonomous control and artificial intelligence.

Keywords

Parallel pursuit, chase method, target, pursuer, trajectory, correction.

1. Введение

Методы погони и параллельного сближения, а также пропорционального сближения являются широко применяемыми методами наведения летательных аппаратов.

В данной статье предлагается к рассмотрению модель группового преследования, когда преследователь движется по определенной траектории. Цель сближается с преследователем по методу параллельного сближения. С траектории преследователя выпускаются через определенные промежутки времени объекты, которые будут преследовать цель по методу погони.

Такая модель в статье приведена в качестве примера. Цель может сближаться с преследователем и методом погони, и пропорциональным методом или каким иным методом. Преследователь имеет малую маневренность, но выпускает объекты, имеющие возможность самонаведения. В модели статьи самонаводящиеся объекты выпускаются перпендикулярно траектории преследователя.

В данной статье производится описание моделирования группового обслеживания. Ранее, в работах Р. Айзекса [1], Л. О. Петросяна [2], Н.Н. Красовского [3] приводилось описание методов параллельного сближения и погони, вводилось понятие терминального множества. В статьях А.С. Банникова [4], М.В. Хачумова [5], [6] рассматривались алгоритмические аспекты группового преследования. В работах Т.Г. Абрамянца, Е.П. Маслова, В.П. Яхно [7], Гусятников П.Б. [8], [9], [10] рассматривались вопросы уклонения в трехмерном пространстве. В статье Богданова А.В., Филонова А.А., Ковалева А.А., Кучина А.А., Лютикова И.В. [11] обсуждались методы самонаведения истребителей и ракет класса «воздух-воздух» на групповую воздушную цель. В работе Никитченко С. Н., Бассауэра А. А. [12] рассматривались вопросы взаимного преследования воздушных целей. В статье Кузьминой Л.И., Осипова Ю.В. [13] рассматривался расчет длины траектории в задачах преследования.

В модели статьи преследующие объекты сходят перпендикулярно с траектории преследователя. Угол схода в модели выбран для примера. Угол схода может быть любым. Сходы с траектории в модели выбраны последовательные и через равные промежутки времени.

У каждого преследующего объекта сформирована область обнаружения. В модели, для примера область сформирована в виде угла с вершиной в точке нахождения объекта. Биссектриса данного угла совпадает с направлением скорости объекта.

2. Постановка задачи

Рассмотрим движение преследователя по определенной траектории на плоскости:

$$\vec{P}(t) = \begin{bmatrix} X_p(t) \\ Y_p(t) \end{bmatrix}.$$

В момент времени t_n с траектории преследователя отделяется объект в направлении перпендикулярном вектору скорости преследователя:

$$\vec{N}(t_n) = \begin{bmatrix} -\frac{dY_p}{dt}(t = t_n) \\ \frac{dX_p}{dt}(t = t_n) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

На рисунке 1 показано, что в модели, рассматриваемой в статье, с траектории преследователя отрываются перпендикулярно пять объектов, которые после отрыва будут двигаться равномерно и прямолинейно со скоростью равной по модулю V_G .

Рисунок 1 дополнен анимированным изображением [14], где можно будет посмотреть, как с траектории преследователя через определенные промежутки времени отделяются объекты $G_n(t)$.

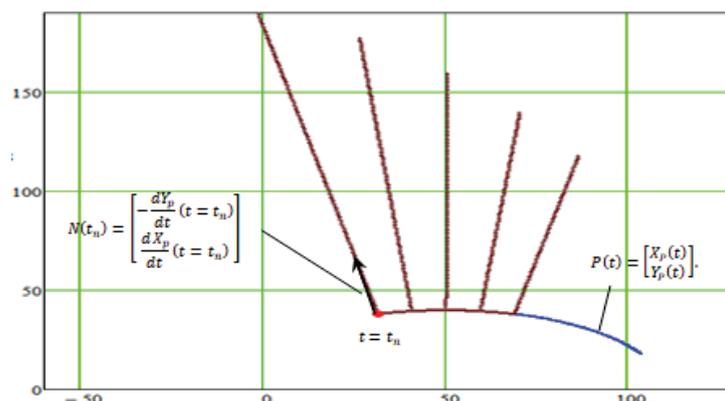


Рисунок 1 – Моделирование движения объектов, сходящих перпендикулярно с траектории преследователя

Моделирование производится на участке плоскости $[-60; 130] \times [0; 190]$. Измерение производится в метрах. Преследователь движется с постоянной скоростью $V_P = 20$ М/с. Объекты, которые срываются перпендикулярно с его траектории, имеют скорость $V_G = 40$ М/с.

На рисунке 2 показана сеть параллельных линий. Как видим, начальные положения преследователя и цели, начальная скорость преследователя определяют весь ход итерационного процесса. Траектория преследователя однозначно определяет траекторию цели.

Цель $T(t)$ преследует $P(t)$ по методу параллельного сближения. Рисунок 2 дополнен анимированным изображением [15], где можно будет посмотреть движение на плоскости цели и преследователя.

Произведем моделирование ситуации, когда, движущиеся на плоскости объекты, сближаются. Один объект преследует другой методом параллельного сближения (рисунок 2).

На рисунке 2 показана траектория цели $T(t)$, движущейся равномерно с модулем скорости $V_T = 25$ М/с.

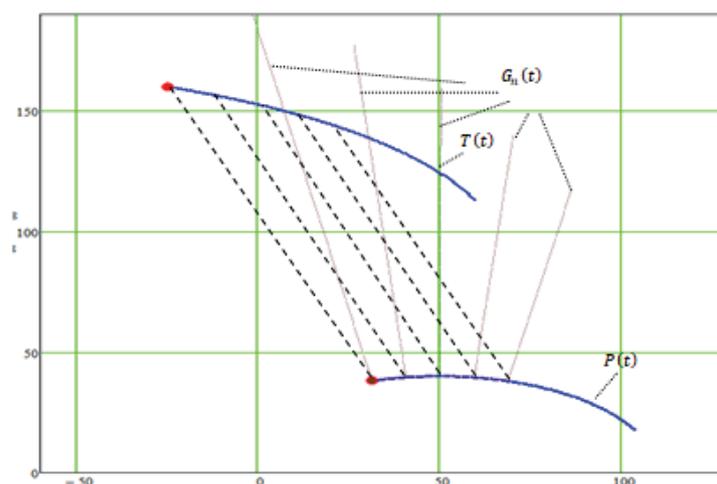


Рисунок 2 – Моделирование траектории цели, движущейся к преследователю методом параллельного сближения

Один из объектов, пытаясь защититься, выпускает группу самонаводящихся объектов.

Задача, которую мы поставили в данной статье, состоит в том, произвести моделирование траекторий объектов $\vec{G}_i(t)$, преследующих цель $\vec{T}(t)$, используя метод погони.

3. Методы решения

Метод параллельного сближения схематично можно изобразить так, как показано на рисунке 3а, когда цель $T(t)$ приближается параллельно к преследователю $P(t)$.

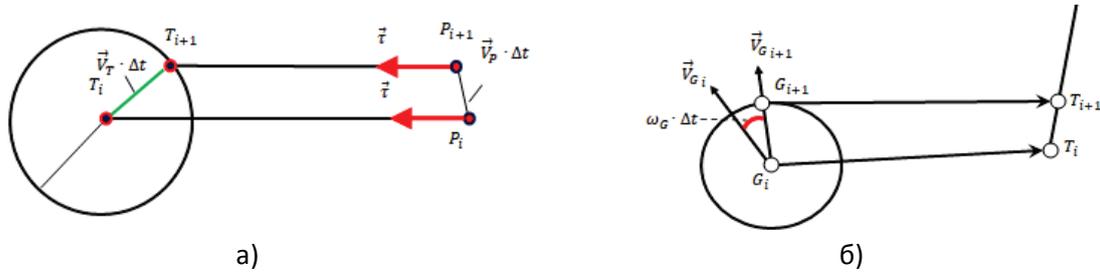


Рисунок 3 – Методы параллельного сближения и коррекции при погоне

Следуя итерационной схеме, изображенной на рисунке 3а, шаг траектории цели T_{i+1} удовлетворяет решению системы уравнений (2), относительно параметра h :

$$\begin{cases} (\vec{T}_{i+1} - \vec{T}_i)^2 = (|\vec{V}_T| \cdot \Delta t)^2 \\ \vec{T}_{i+1} = \vec{P}_{i+1} + h \cdot \frac{\vec{T}_i - \vec{P}_i}{|\vec{T}_i - \vec{P}_i|} \end{cases} \quad (2)$$

Следующий шаг цели T_{i+1} принадлежит окружности радиуса $|\vec{V}_T| \cdot \Delta t$, с центром в точке предыдущего месторасположения T_i , первое уравнение системы (2). В тоже время точка следующего положения T_{i+1} принадлежит прямой линии, приложенной к точке P_{i+1} с направляющим вектором $T_i - P_i$. Второе уравнение системы (2) отображает параметрическое уравнение данной прямой.

В методе погони вектор скорости того объекта, который догоняет, всегда направлен на объект, которого догоняют.

В нашем случае это не так. Пусть догоняющий объект находится в некоторый момент времени t_i в точке G_i , имея при этом вектор скорости \vec{V}_{G_i} (Рис. 3б). Через промежуток времени Δt догоняющий объект совершает поворот на угол $\omega_G \cdot \Delta t$ и перемещение на расстояние $V_G \cdot \Delta t$, где ω_G - угловая частота вращения догоняющего объекта. Угловую частоту вращения можно трактовать, как:

$$\omega_G = \frac{V_G}{R_G},$$

где R_G - есть минимальный радиус кривизны траектории догоняющего объекта, то есть ограничение по кривизне.

Рассмотрим функцию движения догоняющих объектов \vec{G}_n (Рисунок 1), когда они до наступления момента времени t_n движутся по траектории преследователя $\vec{P}(t)$.

Если в момент времени t_n направление изменяется на направление $\vec{N}(t_n)$, указанное в (1), то координаты объекта G_n определяются следующим образом:

$$\vec{G}_n(t) = \begin{cases} \text{если } t < t_n, & \text{то } \vec{G}_n(t) = \vec{P}(t) \\ \text{если } t \geq t_n, & \text{то } \vec{G}_n(t) = \vec{P}(t_n) + V_G \cdot (t - t_n) \cdot \frac{\vec{N}(t_n)}{|\vec{N}(t_n)|} \end{cases}$$

По результатам моделирования процесса группового преследования объекта методом погони была написана программа в системе компьютерной математики, результаты работы которой показаны на рисунке 4

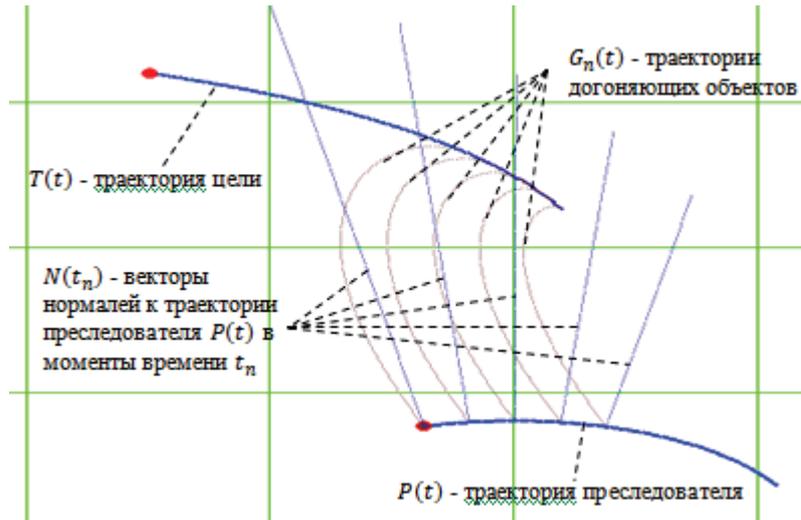


Рисунок 4 – Процесс преследования цели группой объектов методом погони

Также было изготовлено анимированное изображение группового преследования одиночной цели объектами, которые сходят перпендикулярно через определенные промежутки времени с траектории преследователя [16].

Формирование области слежения объектами \vec{G}_n за целью \vec{T} производится следующим образом.

Создается локальная система координат $(\vec{E}_1 \vec{G}_i \vec{E}_2)$ (рисунок 5), где \vec{G}_i - точка нахождения преследующего объекта в момент t_i . Вектор абсцисс \vec{E}_1 объекта сонаправлен вектору скорости \vec{V}_{G_i} . Соответственно, вектор ординат \vec{E}_2 ортогонален вектору скорости \vec{V}_{G_i} .

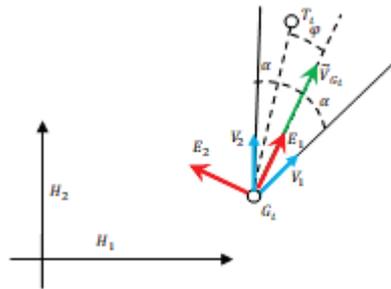


Рисунок 5 – Формирование области слежения

Область слежения задается углом величиной 2α , направление вектора скорости \vec{V}_{G_i} является биссектрисой этого угла. В системе координат $(\vec{E}_1 \vec{G}_i \vec{E}_2)$ определяются векторы \vec{V}_1 и \vec{V}_2 , задающие область слежения:

$$\vec{V}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ -\sin(\alpha) \end{bmatrix}, \vec{V}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix}.$$

Перевод координат точки цели T_i осуществляется по формулам:

$$\vec{T}_i^* = \begin{bmatrix} (\vec{T}_i - \vec{G}_i) \cdot \vec{E}_1 \\ (\vec{T}_i - \vec{G}_i) \cdot \vec{E}_2 \end{bmatrix}.$$

Если угол φ между векторами $\vec{T}_i - \vec{G}_i$ и \vec{V}_{G_i} меньше α , то цель \vec{T} в момент времени t_i находится в области слежения преследующего объекта. Угол φ равен:

$$\varphi = \left| \arccos \left(\frac{(\vec{T}_i - \vec{G}_i) \cdot \vec{V}_{G_i}}{|\vec{T}_i - \vec{G}_i| \cdot |\vec{V}_{G_i}|} \right) \right|.$$

3.1. Модель поведения преследующего объекта

Моделирование углов слежения у преследующих объектов \vec{G}_n в мировой системе координат $(\vec{H}_1 \ \vec{H}_2)$ сводится к преобразованию векторов \vec{V}_1 и \vec{V}_2 из системы координат $(\vec{E}_1 \ \vec{G}_i \ \vec{E}_2)$ в мировую.

Преобразование векторов \vec{V}_1 и \vec{V}_2 из системы координат $(\vec{E}_1 \ \vec{G}_i \ \vec{E}_2)$ в мировую $(\vec{H}_1 \ \vec{H}_2)$ выглядит так:

$$\vec{v}_1 = \begin{bmatrix} \vec{V}_1 \cdot \vec{h}_1 \\ \vec{V}_1 \cdot \vec{h}_2 \end{bmatrix} + \vec{G}_i, \vec{v}_2 = \begin{bmatrix} \vec{V}_2 \cdot \vec{h}_1 \\ \vec{V}_2 \cdot \vec{h}_2 \end{bmatrix} + \vec{G}_i, \vec{h}_1 = \begin{bmatrix} \vec{H}_1 \cdot \vec{E}_1 \\ \vec{H}_1 \cdot \vec{E}_2 \end{bmatrix}, \vec{h}_2 = \begin{bmatrix} \vec{H}_2 \cdot \vec{E}_1 \\ \vec{H}_2 \cdot \vec{E}_2 \end{bmatrix}, \vec{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

На рисунке 6 показано, как сформированы области слежения у преследующих объектов, рисунок 6 дополнен анимированным изображением [17]. На рисунке 5 преследующие объекты догоняют цель методом погони без изменения поведения в зависимости от того, входит ли цель в область слежения. Области слежения отображены для каждого объекта. Также отображены линии визирования, соединяющие преследующий объект с целью.

Рассмотрим поведение преследующего объекта.

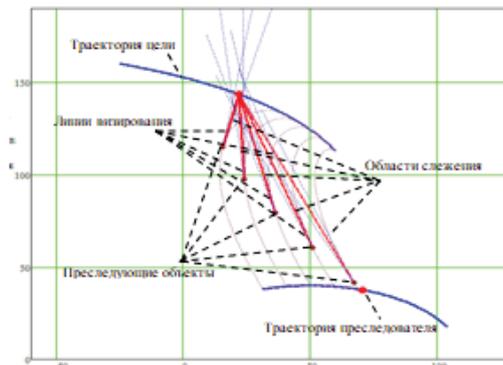


Рисунок 6 – Динамические области слежения преследующих объектов

На рисунке 7 показано, что если в некоторый момент времени цель не входит в область обнаружения, то преследующий объект совершает движение по прямой линии. Если цель вошла в область обнаружения, то поведение преследующего объекта соответствует методу погони. Рисунок 7 дополнен анимированным изображением [18].



Рисунок 7 – Цель вне зоны обнаружения

4. Результаты

В моделировании процесса группового преследования использовался метод погони объектами, отделяющихся перпендикулярно с траектории преследователя. В модели, описанной в статье, ничего не мешает нам заменить метод погони на метод параллельного сближения для догоняющих объектов. А сход перпендикулярный траектории преследователя заменить сход по касательной.

По результатам исследований, изложенных в данной статье, произведено моделирование в прямоугольной области $[-60: 130] \times [0: 190]$, измерение в метрах.

На рисунке 8 представлены результаты моделирования. Скорость преследователя – 20 м/с, скорость цели – 20 м/с, скорость преследующих объектов – 60 м/с, радиус кривизны траектории преследователя не должен быть меньше 50 м, цель совершает преследование по методу параллельного сближения, радиус кривизны траекторий преследующих объектов не должен быть меньше 10 м. Преследующие объекты сходят перпендикулярно с траектории преследователя через равные промежутки в 0.02 с. Рисунок 8 дополнен анимированным изображением [19], где можно будет ознакомиться с результатами такого группового преследования.

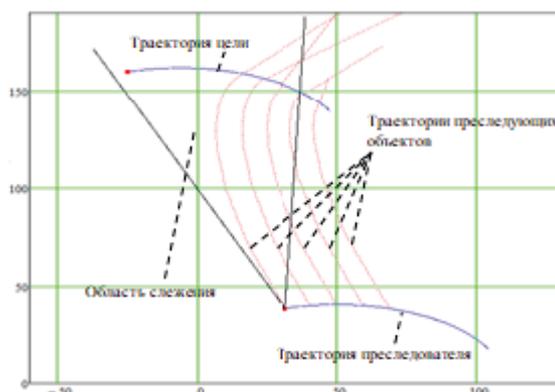


Рисунок 8 – Модель группового преследования

В моделировании, представленном в данной статье, все объекты, выпущенные с траектории, достигают цели. Данный результат зависит от нескольких факторов. От угла зоны обнаружения, от скорости движения преследующих объектов, от значения минимального радиуса кривизны траекторий объектов.

В модели, рассматриваемой в статье, было выяснено, чтобы избежать поражения преследующим объектом, необходимо покинуть область обнаружения. Чем ближе преследующий объект, тем меньшее количество шагов итерации надо совершить цели, чтобы покинуть область обнаружения.

Для преследующего объекта гарантированным результатом достижения цели было бы перейти на направление движения, вектор которого был бы сонаправлен вектору скорости движения цели.

5. Выводы

Результаты, полученные в данной статье, можно было бы использовать при разработке беспилотных летательных аппаратов с автономным управлением, оснащенных элементами искусственного интеллекта. Также возможно использовать результаты при спутниковом наведении барражирующих снарядов.

6. Список источников

- [1] Айзекс Р. Дифференциальные игры. Москва: Мир. 1967 г.
- [2] Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры / М. Наука. 1974 г.
- [3] Петросян Л. А. Дифференциальные игры преследования / Изд-во ЛГУ. 1977. 222 с.
- [4] Банников А.С., Некоторые нестационарные задачи группового преследования / Известия Института математики и информатики УдГУ. 2013. Вып. 1 (41), с. 3-46.
- [5] Хачумов М.В. Решение задачи следования за целью автономным летательным аппаратом / Искусственный интеллект и принятие решений // 2015. №2. С. 45-52.

- [6] Хачумов М.В. Задачи группового преследования цели в условиях возмущений / Искусственный интеллект и принятие решений // 2016. №2. С. 46-54.
- [7] Абрамянц Т.Г., Маслов Е.П., Яхно В.П. “Уклонение групповой цели в трехмерном пространстве” Автомат и телемех. 2008. № 5, 3–14; Autom. Remote Contro. 69:5 (2008). С. 737–747.
- [8] Гусятников П.Б. Убегание одного нелинейного объекта от нескольких более инертных преследователей // Дифференциальные уравнения. 1976. Т. 12. №2. С. 1316–1324.
- [9] Гусятников П.Б. Дифференциальная игра убегания m лиц // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1978. №6. С. 22–32.
- [10] Гусятников П.Б. Дифференциальная игра убегания // Кибернетика. 1978. №4. С. 72–77.
- [11] Богданов А.В., Филонов А.А., Ковалев А.А., Кучин А.А., Лютиков И.В. Методы самонаведения истребителей и ракет класса «воздух-воздух» на групповую воздушную цель / Монография под ред. Кучина А.А., - Красноярск, Изд-во Сибирского Федерального Университета. 2014. 168 с.
- [12] Никитченко С. Н., Бассауэр А. А. Имитационная модель задачи взаимного преследования. // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов международной конференции. Выпуск 5 / СПОИСУ. СПб. 2018. С.479-483.
- [13] Кузьмина Л.И., Осипов Ю.В. Расчет длины траектории для задачи преследования / Вестник МГСУ. Рецензируемый научно-технический журнал по строительству и архитектуре // НИУ МГСУ. 2013. № 12. с. 20-26.
- [14] Результаты моделирования задачи преследования. URL: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=t9cxOgk6bdk&feature=youtu.be>.
- [15] Результаты моделирования задачи преследования. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=keZ5fzd2o3Q>.
- [16] Результаты моделирования задачи преследования. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ODS75MCwjGg>.
- [17] Результаты моделирования задачи преследования. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=oHowdT2n5-U>.
- [18] Результаты моделирования задачи преследования. URL: https://www.youtube.com/watch?v=5_-0TurWvwQ.
- [19] Результаты моделирования задачи преследования. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=JcBrYjfaXTg>.