

## Метод многогипотезного построения траектории движения группы маневрирующих летательных аппаратов на основе нечеткого логического вывода

### The method of multi-hypothesis construction of the trajectory of a group of maneuvering aircraft based on fuzzy logical inference

#### Пророк / Prorok V.

Валерий Ярославович  
(vka@mil.ru)

доктор технических наук, профессор.  
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени  
А. Ф. Можайского» МО РФ  
(ВКА имени А. Ф. Можайского),  
профессор кафедры программно-алгоритмического  
обеспечения автоматизированных систем управления  
ракетно-космической обороны.  
г. Санкт-Петербург

#### Кадочникова / Kadochnikova D.

Дарья Сергеевна  
(vka@mil.ru)

ВКА имени А. Ф. Можайского,  
аэлектронщик кафедры программно-алгоритмического  
обеспечения автоматизированных систем управления  
ракетно-космической обороны.  
г. Санкт-Петербург

#### Кадочников / Kadochnikov A.

Андрей Павлович  
(vka@mil.ru)

кандидат технических наук.  
ВКА имени А. Ф. Можайского,  
начальник лаборатории военного института (научно-  
исследовательского).  
г. Санкт-Петербург

#### Нестеренко / Nesterenko O.

Олег Евгеньевич  
(vka@mil.ru)

кандидат технических наук.  
ВКА имени А. Ф. Можайского,  
старший преподаватель кафедры программно-  
алгоритмического обеспечения автоматизированных  
систем управления ракетно-космической обороны.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: маневрирующие летательные аппараты – maneuvering aircraft; построение траекторий – building trajectories; нечеткий логический вывод – fuzzy logic output.

В статье предложен метод построения траекторий маневрирующих летательных аппаратов (МЛА) с использованием нечеткого логического вывода. Представлены результаты применения разработанного метода для построения траекторий МЛА из состава единой группировки при получении средством наблюдения набора отметок, принадлежащих сопровождаемой группе близко расположенных объектов. Показано, что применение метода позволяет использовать принцип неоднозначности принимаемых решений и, как следствие, повысить достоверность определения истинных траекторий.

The article proposes a method for constructing trajectories of maneuvering aircraft using fuzzy inference. The results of the application of the developed method for constructing the trajectories of maneuvering aircrafts from a single grouping when the observation tool receives a set of marks belonging to the accompanied group of closely located objects are presented. It is shown that the application of the method makes it possible to use the principle of ambiguity of the decisions made and, as a consequence, to increase the reliability of determining the true trajectories.

#### Введение

Процесс сопровождения информационными средствами наблюдения МЛА, осуществляющих движение группами, осложняется значительной неопределенностью и неоднозначностью исходных данных о текущей обстановке в зоне их действия, связанной с отсутствием априорных знаний о характере маневра группы МЛА (моменте его начала и окончания), возможным пропуском измерений, влиянием особенностей работы аппаратуры слежения, присутствием ложных измерений, обусловленных сложной помеховой обстановкой, а также погрешностью (невязкой) измерений координатной информации по наблюдаемым объектам. Это, в свою очередь, приводит к неправильному отождествлению отметок, полученных средствами наблюдения, с предполагаемыми траекториями движения МЛА и, как следствие, к потере истинных траекторий движения.

Одним из перспективных направлений преодоления указанных проблем является использование математического аппарата теории нечетких множеств и, в частности, нечеткого логического вывода [1].

В рассматриваемом методе построения траектории МЛА из состава единой группировки после получения набора отметок средствами наблюдения опре-

деляются все возможные варианты их отождествления с предполагаемыми траекториями. При этом отсутствуют ограничения по принадлежности одной отметки только одной траектории и наоборот, когда одна траектория может быть построена только по одной отметке. Именно поэтому данный метод относится к классу многогипотезных. Траектории, которым на данном обзоре не было присвоено отметок, строятся на основе предыдущих замеров [2]. Используя нечеткую логику в предлагаемом методе, для повышения правильности определения истинных траекторий МЛА из состава единой группировки, сопровождаемых информационным средством наблюдения, всем вариантам траекторий присваивается степень ее возможности. Траектории с низкой степенью возможности существования сбрасываются с сопровождения.

### Построение траектории движения маневрирующих летательных аппаратов из состава единой группировки с использованием нечеткого логического вывода

На основе нечеткого логического вывода осуществляется преобразование входных переменных в выходные переменные с использованием базы правил [3].

В процессе нечеткого вывода осуществляется [4]:

1. Формирование базы правил, где определяются входные и выходные лингвистические переменные, а также сами правила.

2. Приведение к нечеткости или фаззификация.

3. Нечеткий логический вывод, который включает в себя:

- агрегирование подусловий в нечетких правилах;
- активизацию подзаключений в нечетких правилах;
- аккумулярование заключений нечетких правил.

Входными данными для нечеткого логического вывода являются степени истинности всех подусловий, его результатом будет являться вычисленная функция принадлежности выходной переменной.

Приведение к четкости или дефаззификация. На данном этапе находится четкое значение выходной лингвистической переменной.

Приведенные этапы нечеткого логического вывода реализуются с применением различных подходов на каждом из приведенных этапов. Выбор конкретных параметров для каждого из этапов определяет алгоритм нечеткого вывода [5].

В работе предлагается осуществлять процедуру принятия решения о принадлежности отметок, попавшим в строб сопровождения, истинным траекториям сопровождаемых МЛА из состава единой группировки с использованием нечеткого логического вывода. На результат принятого решения будут влиять: невязка получаемых и прогнозируемых измерений (ошибка измерений), сложность помеховой обстановки, факт маневра объектов и угол откло-

нения зондирующего луча от нормали к плоскости аппаратуры слежения.

Согласно работе классического алгоритма отождествления в стробе выбирается отметка, расположенная ближе всех остальных к прогнозируемому значению координат отметки [2]. Соответственно, выбор очередной отметки для продолжения траектории будет определяться формулой:

$$w = \min_w \Delta d \quad (1)$$

где  $\Delta d$  – невязка между отметкой, полученной на очередном периоде обзора и прогнозируемым значением координат отметки;

$w$  – порядковый номер полученной отметки.

Величина невязки оценивается лингвистической переменной с терминами: «НИЗКАЯ (НИЗ)», «СРЕДНЯЯ (СРЕД)», «ВЫСОКАЯ (ВЫС)».

Помимо невязки на точность процесса построения траектории движения МЛА оказывает влияние такой фактор, как наличие или отсутствие маневра. Летательный аппарат в процессе движения может осуществлять изменение любой из трех составляющих скорости, что будет приводить к изменению направления движения [6]. Соответственно, факт маневра  $\delta$  будет определяться моментом изменения скорости МЛА из состава единой группировки.

Факт маневра объектов предлагается оценивать лингвистической переменной с терминами: «ЕСТЬ», «НЕТ».

Помимо маневра на результаты оценивания параметров цели существенное влияние оказывает угол отклонения луча сканирования от нормали [7]. Максимальная точность характерна для результатов наблюдения в нормали апертуры антенны информационного средства [8].

Угол отклонения луча оценивается лингвистической переменной с терминами: «НИЗКИЙ (НИЗ)», «СРЕДНИЙ (СРЕД)», «ВЫСОКИЙ (ВЫС)».

В процессе функционирования информационное средство наблюдения подвергается воздействию помех, что приводит к формированию ложных отметок и, как следствие, завязыванию несуществующих (ложных) траекторий.

Предлагается оценивать интенсивность воздействия помех в зоне действия информационного средства лингвистической переменной с терминами: «НИЗКАЯ (НИЗ)», «СРЕДНЯЯ (СРЕД)», «ВЫСОКАЯ (ВЫС)».

Для осуществления процесса построения траекторий, сопровождаемых МЛА из состава единой группировки на основе нечеткого логического вывода, в качестве исходных данных используются четыре лингвистические переменные: «Невязка», «Сложность помеховой обстановки», «Факт маневра», «Угол отклонения луча». На выходе формируется значение, показывающее степень возможности существования данной траектории в рассматриваемых условиях,

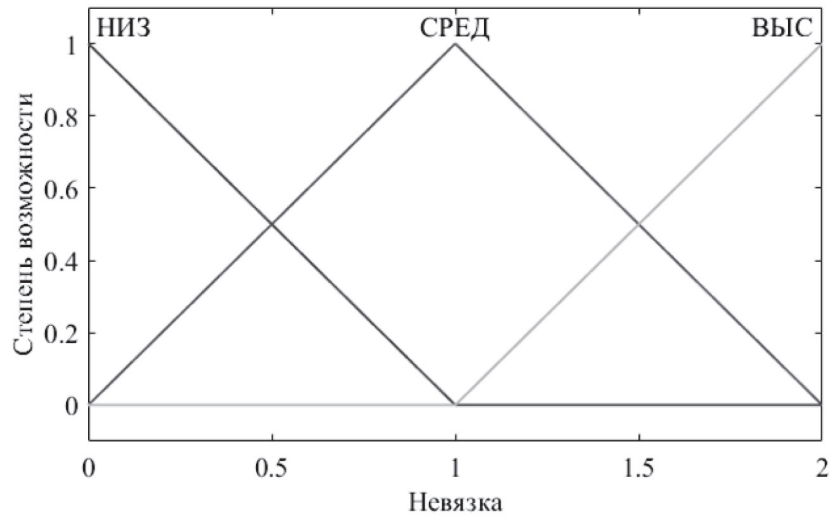


Рис. 1. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\Delta d$



Рис. 2. Функции принадлежности лингвистической переменной  $E$

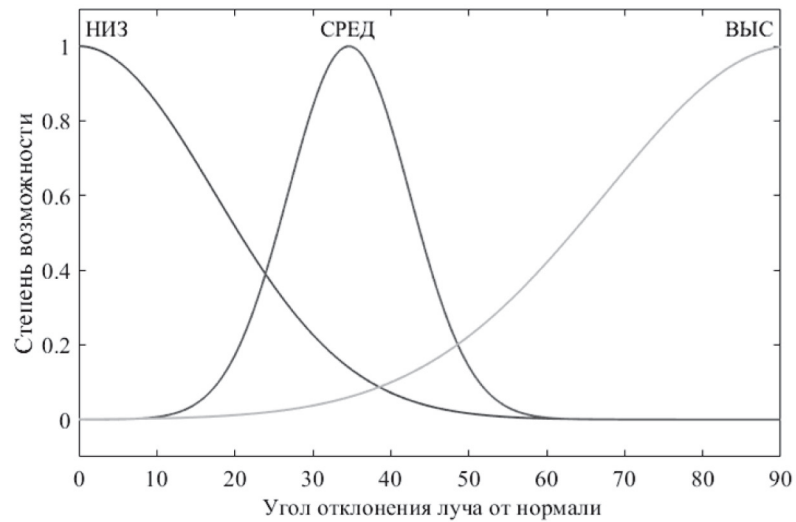


Рис. 3. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\theta$

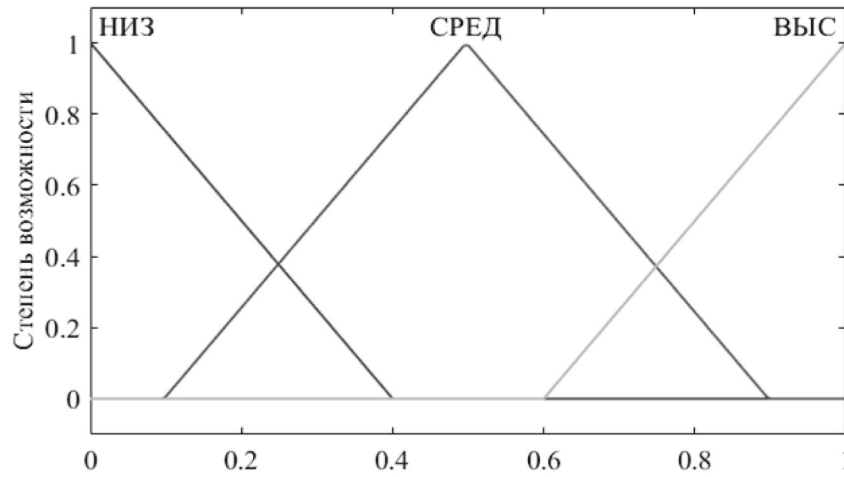


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистической переменной  $K$



Рис. 5. Схема построения траектории сопровождаемых МЛА из состава единой группировки на основе нечеткого логического вывода

База правил получения лингвистических значений  $K$ 

№ Правила	Величина $K$	Величина $\Delta d$	Величина $E$	Величина $\delta$	Величина $\theta$
1	ВЫС	НИЗ	НИЗ	НЕТ	НИЗ
2	ВЫС	НИЗ	НИЗ	НЕТ	СРЕД
3	СРЕД	НИЗ	НИЗ	НЕТ	ВЫС
4	СРЕД	НИЗ	НИЗ	ЕСТЬ	НИЗ
5	ВЫС	НИЗ	СРЕД	НЕТ	НИЗ
6	НИЗ	НИЗ	ВЫС	НЕТ	НИЗ
7	ВЫС	СРЕД	НИЗ	НЕТ	НИЗ
8	НИЗ	ВЫС	НИЗ	НЕТ	НИЗ
9	СРЕД	НИЗ	НИЗ	ЕСТЬ	СРЕД
10	НИЗ	НИЗ	НИЗ	ЕСТЬ	ВЫС
11	СРЕД	НИЗ	СРЕД	ЕСТЬ	НИЗ
12	НИЗ	НИЗ	ВЫС	ЕСТЬ	НИЗ
13	ВЫС	СРЕД	СРЕД	НЕТ	НИЗ
14	СРЕД	СРЕД	ВЫС	НЕТ	НИЗ
15	НИЗ	ВЫС	СРЕД	НЕТ	НИЗ
16	НИЗ	ВЫС	ВЫС	НЕТ	НИЗ
17	ВЫС	СРЕД	НИЗ	НЕТ	СРЕД
18	НИЗ	ВЫС	НИЗ	НЕТ	СРЕД
19	СРЕД	СРЕД	НИЗ	НЕТ	ВЫС
20	НИЗ	ВЫС	НИЗ	НЕТ	ВЫС
21	ВЫС	НИЗ	СРЕД	НЕТ	СРЕД
22	СРЕД	НИЗ	ВЫС	НЕТ	СРЕД
23	СРЕД	НИЗ	СРЕД	НЕТ	ВЫС
24	СРЕД	НИЗ	ВЫС	НЕТ	ВЫС
25	СРЕД	НИЗ	СРЕД	ЕСТЬ	СРЕД
26	НИЗ	НИЗ	СРЕД	ЕСТЬ	ВЫС
27	НИЗ	НИЗ	ВЫС	ЕСТЬ	СРЕД
28	НИЗ	НИЗ	ВЫС	ЕСТЬ	ВЫС
29	СРЕД	СРЕД	СРЕД	ЕСТЬ	НИЗ
30	НИЗ	СРЕД	ВЫС	ЕСТЬ	НИЗ
31	НИЗ	ВЫС	СРЕД	ЕСТЬ	НИЗ
32	НИЗ	ВЫС	ВЫС	ЕСТЬ	НИЗ
33	СРЕД	СРЕД	НИЗ	ЕСТЬ	СРЕД
34	СРЕД	СРЕД	НИЗ	ЕСТЬ	ВЫС
35	НИЗ	ВЫС	НИЗ	ЕСТЬ	СРЕД
36	НИЗ	ВЫС	НИЗ	ЕСТЬ	ВЫС
37	СРЕД	СРЕД	СРЕД	НЕТ	СРЕД
38	СРЕД	СРЕД	СРЕД	НЕТ	ВЫС
39	СРЕД	СРЕД	ВЫС	НЕТ	СРЕД
40	НИЗ	СРЕД	ВЫС	НЕТ	ВЫС
41	НИЗ	ВЫС	СРЕД	НЕТ	СРЕД
42	НИЗ	ВЫС	ВЫС	НЕТ	СРЕД
43	НИЗ	ВЫС	СРЕД	НЕТ	ВЫС
44	НИЗ	ВЫС	ВЫС	НЕТ	ВЫС
45	СРЕД	СРЕД	СРЕД	ЕСТЬ	ВЫС
46	СРЕД	СРЕД	СРЕД	ЕСТЬ	СРЕД
47	НИЗ	ВЫС	СРЕД	ЕСТЬ	СРЕД
48	НИЗ	ВЫС	СРЕД	ЕСТЬ	ВЫС

48	НИЗ	ВЫС	СРЕД	ЕСТЬ	ВЫС
49	НИЗ	ВЫС	ВЫС	ЕСТЬ	ВЫС
50	НИЗ	ВЫС	НИЗ	ЕСТЬ	НИЗ
51	ВЫС	СРЕД	НИЗ	ЕСТЬ	НИЗ
52	НИЗ	ВЫС	ВЫС	ЕСТЬ	СРЕД
53	НИЗ	СРЕД	ВЫС	ЕСТЬ	СРЕД
54	НИЗ	СРЕД	ВЫС	ЕСТЬ	ВЫС

Таблица 2

**Пример определения степени возможности существования траектории при различных значениях невязки, низкой интенсивности помеховой обстановки, отсутствии маневра и небольшим отклонением луча**

Отметки, полученные при сопровождении МЛА	Невязка (0–2)	Сложность помеховой обстановки (0–10)	Факт маневра (0/1)	Угол отклонения луча (0–90)	Степень возможности (0–1)
ОТ-1	0,2	2	НЕТ	20	0,654
ОТ-2	0,8	2	НЕТ	20	0,618
ОТ-3	1,2	2	НЕТ	20	0,569

Таблица 3

**Пример определения степени возможности существования траектории при различных значениях невязки, высокой интенсивности помеховой обстановки, наличии маневра и большим отклонением луча**

Отметки, полученные при сопровождении МЛА	Невязка (0–2)	Сложность помеховой обстановки (0–10)	Факт маневра (0/1)	Угол отклонения луча (0–90)	Степень возможности (0–1)
ОТ-1	0,2	8	ЕСТЬ	80	0,311
ОТ-2	0,8	8	ЕСТЬ	80	0,364
ОТ-3	1,2	8	ЕСТЬ	80	0,287

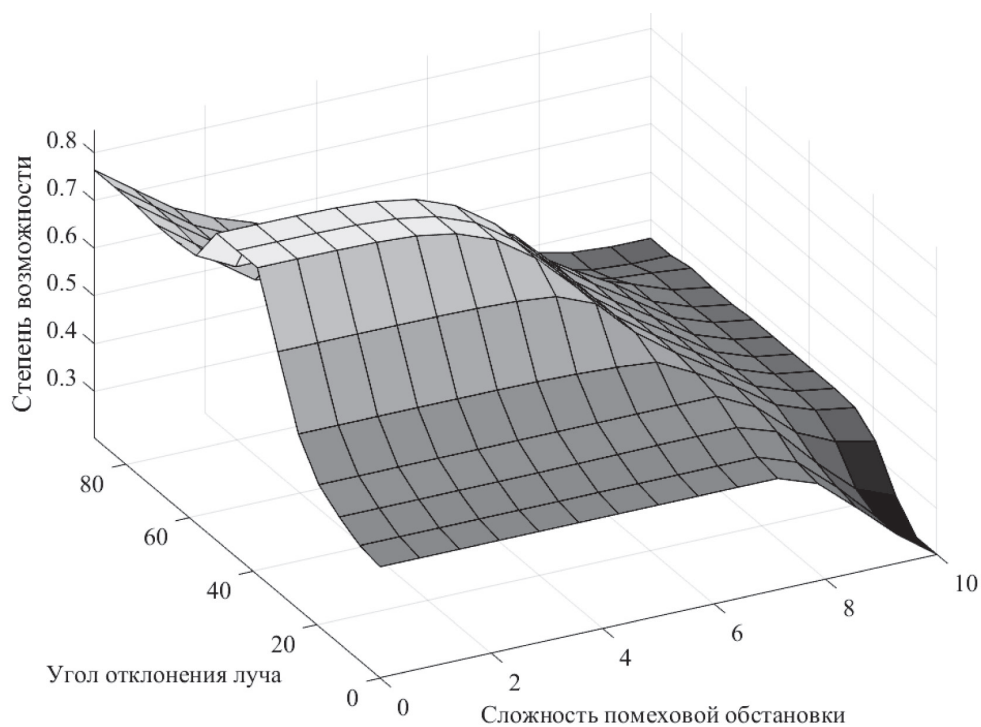


Рис. 6. Зависимость  $K$  от сложности помеховой обстановки и величины угла отклонения луча

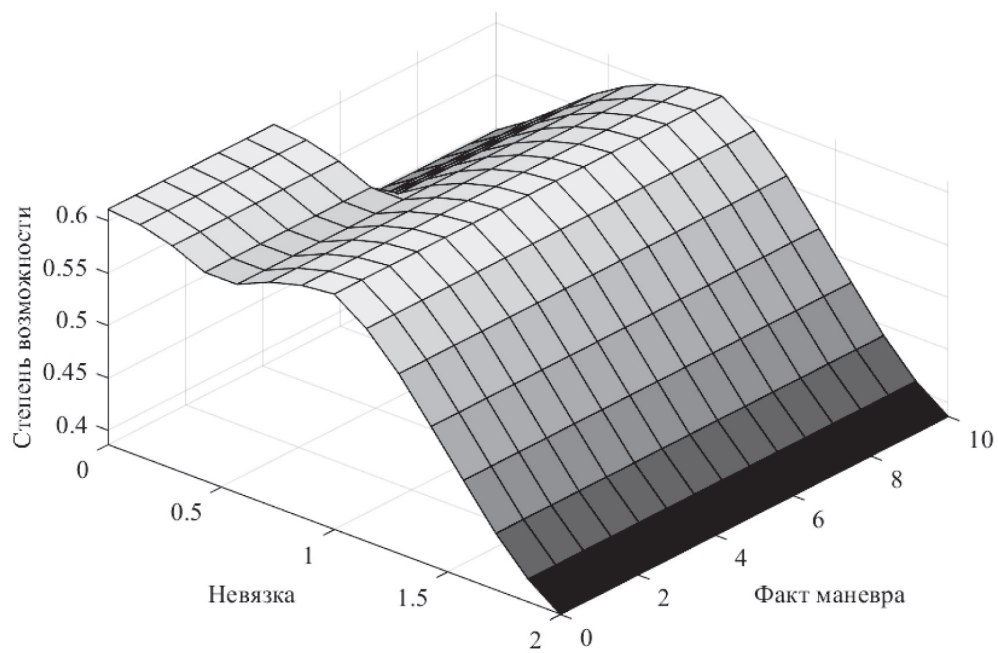


Рис. 7. Зависимость  $K$  от величины невязки и факта маневра

которая описывается лингвистической переменной «Степень возможности» с терминами: «НИЗКАЯ (НИЗ)», «СРЕДНЯЯ (СРЕД)», «ВЫСОКАЯ (ВЫС)».

Для осуществления нечеткого вывода необходимо определить функции принадлежности заданных термов для каждой лингвистической переменной [9]. Метод, использующий имеющиеся статистические данные, является наиболее востребованным для определения вида функций принадлежности. В связи с тем, что задача получения статистически достоверных, полных исходных данных и формирование на их основе репрезентативной обучающей выборки вызывает серьезные затруднения, определять вид функций принадлежности для каждой лингвистической переменной в работе предлагается путем опроса экспертов и попарного сравнения результатов наблюдения. Данный метод позволяет достаточно точно определить области наиболее предпочтительных значений переменных [1]. В результате полученные функции принадлежности будут представлять собой набор реперных точек и отображать степень выраженности задаваемого параметра (переменной) [10].

Степень выраженности лингвистической переменной «Невязка» будет оцениваться на промежутке от 0 до 2 км. Вид функции принадлежности для термов заданной лингвистической переменной представлен на рис. 1.

Степень выраженности лингвистической переменной «Сложность помеховой обстановки» будет оцениваться по десятибалльной шкале. Вид функции

принадлежности для термов заданной лингвистической переменной представлен на рис. 2.

Степень выраженности лингвистической переменной «Угол отклонения луча» будет оцениваться на интервале от 0 до 90 градусов. Вид функции принадлежности для термов заданной лингвистической переменной представлен на рис. 3.

Лингвистическая переменная «Факт маневра» задается в бинарном виде.

Степень выраженности выходной лингвистической переменной «Степень возможности» будет оцениваться на интервале [0, 1]. Вид функции принадлежности для термов заданной лингвистической переменной представлен на рис. 4.

Схема построения траектории сопровождаемых МЛА из состава единой группировки на основе нечеткого логического вывода представлена на рис. 5.

В таблице 1 представлены правила нечеткого логического вывода переменной  $K$  «Степень возможности». На основании полученных исходных данных и с использованием базы правил производится нечеткий логический вывод, в результате которого вычисляются значения выходной переменной  $K$ . Ниже приведен пример получения лингвистических значений  $K$ : «Если величина «Невязка»  $\Delta d$  НИЗ и «Сложность помеховой обстановки» НИЗ и маневра НЕТ и величина  $\theta$  НИЗ, то величина  $K$  ВЫС» [11].

В таблицах 2, 3 представлены примеры определения степени возможности существования траектории сопровождаемой группы МЛА с использова-

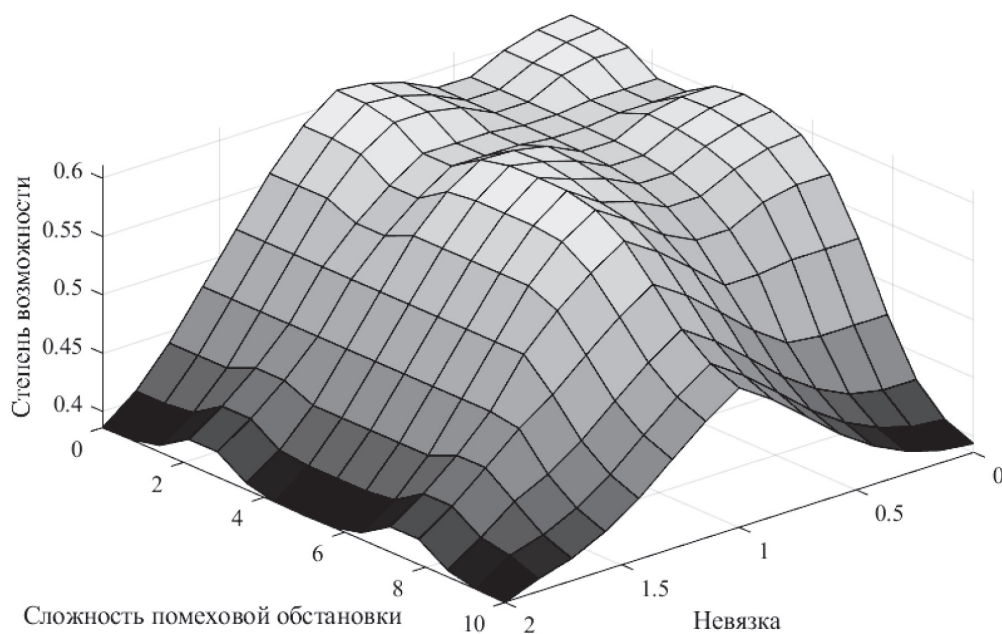


Рис. 8. Зависимость  $K$  от величины невязки и сложности помеховой обстановки



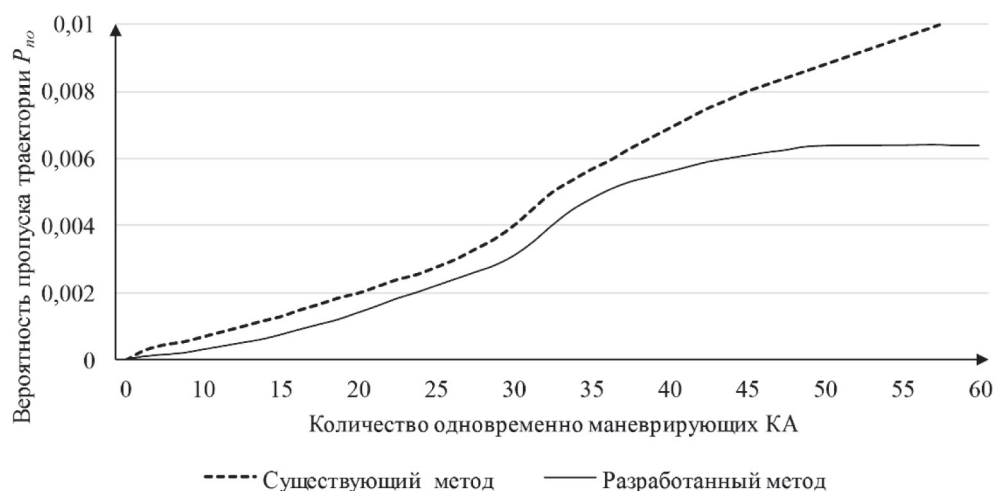


Рис. 9. График зависимости вероятности пропуска траектории от количества одновременно маневрирующих МЛА

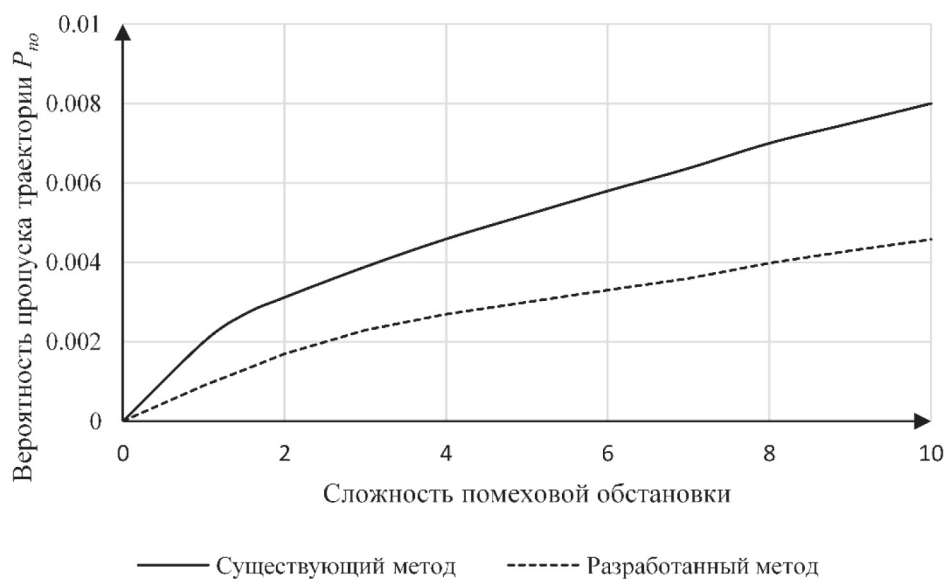


Рис. 10. График зависимости вероятности пропуска траектории от интенсивности помеховой обстановки

нием алгоритма нечеткого логического вывода при различных условиях функционирования информационного средства.

Зависимость величины степени возможности существования траектории  $K$  сопровождаемых МЛА из состава группировки от входных значений величины невязки, сложности помеховой обстановки, факта маневра и величины угла отклонения луча представлена на рис. 6–8.

### Оценивание результативности метода многогипотезного построения траектории движения маневрирующих летательных аппаратов

Для иллюстрации эффективности работы предложенного метода многогипотезного построения траектории движения МЛА из состава единой группировки с использованием алгоритма нечеткого логического вывода предлагаются результаты моделирования процесса сопровождения информационным средством наблюдения МЛА при условии отсутствия помех (рис. 9) и в условиях сложной помеховой обстановки (рис. 10).

Из проведенных вычислительных экспериментов следует, что использование предложенного метода при сопровождении МЛА, двигающихся в составе компактной группы без воздействия помех, позволяет уменьшить вероятность пропуска траектории  $P_{\text{по}}$  по сравнению с существующим методом на 19%, а в случаях сложной помеховой обстановки, характеризующейся наличием большого количества ложных отметок, использование предложенного метода позволяет в среднем уменьшить вероятность пропуска траектории на 17%.

### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что решение задачи сопровождения информационным средством наблюдения МЛА, двигающихся в составе компактной группы, разработанным методом по сравнению с существующими позволяет повысить точность обработки координатной информации по наблюдаемым объектам. Использование технологий искусственного интеллекта и, в частности, применение подходов нечеткого логического вывода в условиях неопределенности позволяет учесть все возможные варианты построенных траекторий, совершенствовать в системе траекторной обработки процесс принятия решения о принадлежности каждой отметки к истинным траекториям сопровождаемых МЛА из состава единой группировки, построить по результатам распределения отметок истинные траектории, принадлежащие каждой МЛА из группы в отдельности, а также обеспечить их устойчивое сопровождение.

### Литература

1. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – Москва : Физматлит, 2001. – 198 с.
2. Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Часть 1 / В.В. Круглов. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. – 163 с.
3. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 165 с.
4. Тэрано, Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – Москва : Мир, 1993. – 368 с.
5. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – Москва : Радио и связь, 1982. – 432 с.
6. Пророк, В. Я. Моделирование процесса развертывания многоспутниковой группировки низкоорбитальных космических аппаратов / В.Я. Пророк, А.П. Кадочников, Д.С. Осадчая // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 339–347.
7. Методика оценивания влияния ошибок первичных измерений на точность алгоритма определения параметров орбиты космических объектов / В.И. Ерохин, А.П. Кадочников, М.С. Смирнов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 253–261.
8. Ерохин, В. И. Метод определения параметров орбиты космических объектов по измерениям на малых интервалах времени / В.И. Ерохин, А.П. Кадочников, В.В. Какаев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2022. – № 682. – С. 60–69.
9. Искусственный интеллект. В 3 кн. Кн. 2. Модели и методы : справочник / под ред. Д.А. Поспелова. – Москва : Радио и связь, 1990. – 304 с.
10. Пророк, В. Я. Основы построения и организации адаптивных систем профессионального отбора / В.Я. Пророк. – Санкт-Петербург : Лань, 2003. – 330 с.
11. Аверкин, А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун [и др.]. – Москва : Наука, 1986. – 312 с.