

Агаев Надир Бафадин оглы, д.т.н.,
Искендеров Насреддин Искендер оглы

ОЦЕНКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ КОНФЛИКТОВ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Национальная Академия Авиации

nesiazeri@yahoo.com

Рассмотрены основные методы обнаружения конфликтов и принятия решений, используемые при автоматизированном управлении воздушным движением. Проведен анализ основных характеристик этих методов. Проанализированы преимущества получаемых значений относительно друг друга, используя теорию нечеткой логики, и с использованием системы Матлаб найдены максимумы собственного значения и собственный вектор каждой матрицы и в итоге создавая множество критериев, построена функция соответствия и выбраны наилучшие из 16 рассмотренных методов исследования

Ключевые слова: зона наблюдения, уровень обнаружения конфликтов, метод принятия решений во время конфликта, возможности маневрирования, управление множеством объектов, метод прогнозирования

Введение

Системы обнаружения конфликтов и принятия решений (*CD-R – conflict detection and resolution*) заранее предупреждает пилота и диспетчера управления воздушным движением о столкновениях, которые могут возникнуть между самолетами, и тем самым снижают потенциальные риски влияющие на безопасность полетов. Процесс обнаружения конфликтов и принятия решений характеризуется следующими особенностями:

1) Конфликтная ситуация должна быть точно определена по всем параметрам. Так как, в соответствии с принятыми правилами конфликт – это сближение двух или более самолетов, на расстоянии менее чем минимально допустимого уровня – 5 морской мили в горизонтальной, менее 1000 футов в вертикальной плоскости [1]

2) Предупреждение о конфликтной ситуации должно быть осуществлено в течение установленного ограниченного времени. Так как, наземных системах предупреждения вдаются за 2 минуты, а в бортовых за 40 секунд до столкновения [2].

3) Конфликтная ситуация должна быть безопасно и эффективно устранена. По этой причине, используемые в настоящее время многие *CD-R* системы не только обнаруживают конфликтные ситуации, а также даст рекомендации по эффективному устранению этого конфликта.

В последнее время возрос интерес к усовершенствованию средств автоматического обнаружения и устранения конфликтов. Использование современных информационных технологий в этих средствах позволяет повысить безопасность и эффективность транспортных потоков. Увеличение интенсивности полетов в воздушном пространстве привело к ускорению как теоретических, так и практических исследований, проводимых в этом направлении, и как результат этого были разработаны многие новые методы обнаружения конфликтов и принятия решений. Например, недавно добавлена функция обнаружения среднесрочный конфликт (*MTCD - medium term conflict detection*) [19] в автоматизированные системы управления воздушным движением, который обеспечивает заранее обнаружения конфликтов на основе планов полета. Хотя эти методы

предназначены для решения одной и той же проблемы, они сильно отличаются друг от друга по используемой теории, способам решения, так же по их особенностям и другим параметрам. С другой стороны, исследование *CD-R* методов, предложенных в последние годы, показывает, что в подходе к решению проблемы они имеют ряд недостатков. Между этими методами имеются пересечения и синтезы способов. Способ, который является пригодным для одного параметра, непригоден для других параметров, но ввиду того что в общем процессе не проведена оценка влияния этих параметров на способы решения, что приводит к возникновению проблемы выбора соответствующей модели. И поэтому требуется проведение сравнительной научнообоснованной оценки существующих *CD-R* методов.

Анализ методов обнаружения конфликтов и принятия решений

Сравнительный анализ существующих методов обнаружения и принятия решений конфликтов показывает, что предложенные разными исследователями методы применяются не только для воздушного транспорта, но и для наземных транспортных средств, робототехники, судового оборудования и других средств. Независимо от объекта применения, процессы возникновения конфликта между ними аналогичны.

Методы, используемые в исследованиях систематизированы по своим входным и выходным параметрам с учетом следующих факторов [3] (табл. 1):

- зоны наблюдения;
- уровня обнаружения конфликтов;
- метода принятия решений во время конфликта;
- возможности маневрирования;
- управления множеством объектов;
- метода прогнозирования.

Зона наблюдения. Этот параметр показывает в модели для обнаружения

конфликта, в какой области пространства нужно вести наблюдение:

- в горизонтальной плоскости (Г);
- в вертикальной плоскости (В);
- в горизонтальной и вертикальной плоскости (ГВ).

Как видно из таблицы 1, многие из используемых моделей позволяют вести наблюдение в, трехмерном пространстве или в горизонтальной плоскости только модель *GPWS* [9] применяется в вертикальной плоскости.

Уровень обнаружения конфликтов. Этот параметр дает сведения о наличии (V) или отсутствии (-) конкретных критериев предусмотренных для определения конфликта. Следует отметить, если не задан порог уровня в критерии предупреждения конфликтов, то модель не может устанавливать точные границы между случаями наличия и отсутствия конфликта. С другой стороны т.к. конфликтующие стороны являются движущимися объектами, то конфликтная ситуация то же будет динамично меняться. В этом случае для ликвидации конфликта в ограниченном интервале времени возникает необходимость определения уровня для методов разрешения конфликта и изучения ложных предупреждений (пропущенных в конфликтных ситуациях).

Метод разрешения конфликта (принятие решений). Этот параметр объединяет в себя в систематизированном виде все методы, позволяющие принимать решение.

При возникновении конфликта его разрешение может быть реализовано различными средствами. Независимо от того что это будет выполняться автоматически или непосредственно человеком оператором, оно должно удовлетворять определенным требованиям. Обобщая эти средства можно отметить следующие классы:

- показать (П);
- оптимизировать (О);
- зона действия (ЗД);

- выполняемый со стороны человека оператор (ЧО);
- нет решения (-).

Метод "показать" выступает (используется) в качестве механизма помощи операторам в разрешения конфликтных ситуаций. При принятии решения конфликтных ситуации следует учитывать многие неожиданные события и явления окружающей среды, или же с целью того, чтобы не создавать угрозу другим воздушным судам, агрессивность предусмотренных маневров должны быть сведены к минимуму.

Метод "оптимизация" используется в большинстве моделей, используемых исследованиях. Оптимальная стратегия решения определяется при условии реализации решения для траектории минимальными затратами. Это требует определения значений соответствующих стоимостных функции. Обычно при формировании маневра целей учитываются количество топлива, время полета и загруженность самолета.

Тем не менее, с этой точки зрения моделирование характера действия и реакции человека-оператора классическими методами в рамках модели затруднено. В последние годы при проведении в этом направлении исследований для решения проблем минимизации затрат и сокращения нагрузки оператора широко применяются теория игр, генетические алгоритмы, экспертные системы, теория нечеткой логики.

При принятии решения в конфликтных ситуациях методом «Зона действия», самолеты приближающиеся друг к другу, рассматривается как материальные точка и для формирования маневров конфликтов используются электростатические уравнения. Силы отталкивания между воздушными судами используется для создания маневров для того, чтобы избежать конфликтов. Преимуществом этого метода является использование простых уравнений в решении конфликтов, но для того чтобы перейти от результатов принятых решений в процессе мгновенных из-

менений на физические результаты требуется дополнительная обработка и фильтрация.

В процессе принятия решений методом "человек-оператор" для решения проблемы в конфликтных ситуациях используется принцип обратной связи. Преимуществом этого способа является то, что выполнение решения является открытым для любых изменений, которые считаются приемлемыми оператором.

Приведенный в табл. 1 знак «-» в колонке "метод принятия решений во время конфликта," показывает, что модель не дает пользователю решение для выхода из положения. Эти модели обнаруживают конфликты, но не вырабатывают методов решения этих конфликтов. В некоторых случаях успех разрешения конфликта выражается обнаружением конфликта моделью.

Маневренные возможности. Колонка возможности маневрирования показывает в решении принятом в исследуемой модели, какой метод маневрирования используется:

- разворот (P);
- вертикальный маневр (VM);
- изменение скорости (ИС);
- комплексные маневры (KM);

Когда маневры обозначаются знаком \rightarrow , то маневры формируются в зависимости от ситуации. Например, $P \rightarrow VM$ указывает на выполнение одного из маневров: разворота и вертикального маневрирования. Комплексные маневры обозначаются знаком $\&$. В этом случае предусматривается одновременное выполнение этих маневров.

Например, $VM \& P$ показывает, что вертикальное маневрирование и разворот производится одновременно. Как правило, наличие много возможностей маневрирования дает возможность более эффективно разрешить конфликт.

Столбец "Управление множеством объектов" указывает на возможность модели обнаруживать конфликт между более чем 2-х ВС (воздушного судна).

Это происходит в двух формах ВС:

- пар (\leftrightarrow);
- глобальные (\odot).

В реальных условиях действия для системы *CD-R* при встрече с более чем двумя самолетами управление ситуацией является очень важным. В случае парного подхода если решение конфликта приводит к возникновению нового конфликта, то поиск решения продолжается. Метод глобального решения одновременно учитывает комплексное соотношение одного самолета со многими самолетами и является более надежным.

Метод прогнозирования. Во всех исследованиях, посвященных принятию решения урегулированию конфликтных ситуаций, основной проблемой является создание методов, обеспечивающих на основе нынешней ситуаций более полной информации о будущем. В настоящее время для идентификации состояния конфликта используются три основных метода:

- детерминированный (Д);
- неопределенность (?);
- вероятностный (В).

В детерминированном методе прогнозируемая ситуация однозначно определяется на основании текущей ситуации. В этом случае, прогнозирование проводится, не принимая во внимание неопределенности, которые влияют на траекторию движения. На практике этот метод используется обычно для экстраполяции положения ВС по его вектору скорости.

Сущность метода неопределенного прогнозирования заключается в том, что ВС может сделать любой маневр и может

создавать потенциальную угрозу любому ВС в большой области пространства. Недостаток этого метода определяется снижением пропускной способности общего воздушного пространства. Однако этот метод является приемлемым только лишь в тех случаях, когда в соответствии с концепциями воздушного движения самолеты будут поддерживаться в ограниченной рамке маневрирования.

В вероятностном методе создается множество всевозможных будущих траекторий, вычисляется вероятность возникновения конфликта при таком множестве и маневр с наибольшей вероятностью фиксируется и выдается как решение.

Вероятностный подход позволяет создавать баланс между методами детерминированного и неопределенного маневрирования. Преимущество данного подхода заключается в том, что решение выдается по фундаментальной возможности конфликта, безопасность в выполнении решения и ложное предупреждение непрерывно рассматривается и оценивается. Вероятностный метод по сравнению с другими двумя методами считается более общим.

Детерминированные и вероятностные модели решения являются подмножествами вероятностных траекторий.

В детерминированном методе, движение самолета по заданной траектории равняется единице (максимальная возможность). В модели неопределенная вероятность слежения за любой траектории одинакова.

Таблица 1. Характеристики методов обнаружение и разрешение конфликтных ситуаций

№	Номер литературы и название методов	Зона наблюдения	Уровень обнаружения конфликтов	Метод разрешения конфликта	Возможность маневрирования	Управление множеством объектов	Метод прогнозирования
1	[4]TCAS	Г&В	√	О	ВМ	\leftrightarrow	Д
2	[5]TCAD	Г&В	√	-	-	\leftrightarrow	Д
3	[6]Burdun	Г&В	√	О	ИС&P&ВМ	\leftrightarrow	Д
4	[7]Bilimoria	Г&В	√	П	ИС \rightarrow P \rightarrow ВМ	\leftrightarrow	Д
5	[8]EGPWS	Г&В	√	-	-	-	Д
6	[9]GPWS	В	√	П	ВМ	-	Д
7	[10]Zeghal	Г&В	√	ЗД	ИС&P&ВМ	\odot	Д
8	[11]Taylor	Г	-	-	-	\leftrightarrow	В
9	[12]Rome	Г	√	-	-	\leftrightarrow	В

10	[13]Krozel	Г&В	√	О	ИС→Р→ВМ	↔	В
11	[14]URET	Г&В	√	ЧО	ИС&Р&ВМ	↔	В
12	[15]Yang	Г&В	√	ЧО	ИС&Р&ВМ	↔	В
13	[16]Tomlin	Г	-	О	ИС	☼	?
14	[17]Ford	Г	√	-	-	↔	?
15	[18]Ails	Г&В	√	Π	Р&ВМ	↔	?
16	[19]Vink	Г&В	√	ЧО	ИС&Р&ВМ	↔	?

Оценка моделей на основе теории нечеткой логики.

Для проведения оценки каждую модель рассматриваем как множество критерий. Для этого принимаем следующие обозначения.

Обнаружение конфликтов и методы принятия решений:

- | | |
|--------------------|--------------------|
| C_1 - TCAS; | C_9 - Rome; |
| C_2 - TCAD; | C_{10} - Krozel; |
| C_3 - Burdun; | C_{11} - URET; |
| C_4 - Bilimoria; | C_{12} - Yang; |
| C_5 - EGPWS; | C_{13} - Tomlin; |
| C_6 - GPWS; | C_{14} - Ford; |
| C_7 - Zeghal; | C_{15} - AILS; |
| C_8 - Taylor; | C_{16} - Vink; |

Основные критерии характеризующие методы обнаружения конфликтов:

- a_1 - зона наблюдения;
- a_2 - уровень обнаружения;
- a_3 - метод принятия решений;
- a_4 - возможности маневрирования;
- a_5 - множество конфликтов;
- a_6 - метод прогнозирования.

Определяя на основе экспертного заключения преимущества значений, получаемых каждым критерием, по отношению друг к другу, строим матрицу для каждого критерия, выражающую соотношение этих значений и определяем собственные векторы этих матриц ($Aw = \lambda w$) [20-21]. Элементы определяемого собственного вектора являются коэффициентами, соответствующими определенным значениям критерий.

Строим матрицу используя, табл. 2 для зоны наблюдения. Используя системы *MATLAB*, находим значение максимума собственного значения (λ) матрицы:

```
>> A=[1, 3, 7; 1/3, 1, 9; 1/7, 1/9, 1]>>
[v,s]=eig(A)
```

$$s = \begin{matrix} 3.2059 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1030 + 0.8059i & 0 \\ 0 & 0 & -0.1030 - 0.8059i \end{matrix}$$

$$\lambda_{\max} = 3.2059;$$

Найдем собственный вектор:

$$\begin{bmatrix} 1 - 3.2059 & 3 & 7 \\ 1/3 & 1 - 3.2059 & 9 \\ 1/7 & 1/9 & 1 - 3.2059 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = 0;$$

$$\begin{cases} -2.2059 * w_1 + 3 * w_2 + 7 * w_3 = 0 \\ \frac{1}{3} * w_1 - 2.2059 * w_2 + 9 * w_3 = 0 \\ \frac{1}{7} * w_1 + \frac{1}{9} * w_2 - 2.2059 * w_3 = 0 \end{cases}$$

Заменяем одно из уравнения на $w_1 + w_2 + w_3 = 1$; и решаем систему

$$eq1 := \{-2.2059 * w_1 + 3 * w_2 + 7 * w_3 = 0,$$

$$(1/3) * w_1 - 2.2059 * w_2 + 9 * w_3 = 0,$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1\};$$

$$\text{numeric::solve}(eq1, \{w_1, w_2, w_3\})$$

$$\{[w_1 = 0.619637; w_2 = 0.323919; w_3 = 0.056443]\}$$

$$w_1 = 0.62; w_2 = 0.324; w_3 = 0.056.$$

Таблица 2. Зона наблюдения

	ГВ	В	Г
ГВ	1	3	7
В	1/3	1	9
Г	1/7	1/9	1

Соответствующим образом найдем матрицу соотношений для уровня обнаружения (Таблица3). Максимум собственного значения этой матрицы и собственный вектор соответствующий этому значению:

$$\lambda_{\max} = 2; w_1 = 0.875; w_2 = 0.125.$$

Таблица 3. Уровень обнаружения

	√	--
√	1	7
--	1/7	1

Таким же способом определяем значения для других характеристик. Для метода принятия решения используем

Таблица 4. Максимум собственного значения и собственный вектор:

$$\lambda_{\max} = 5.0472; w_1 = 0.467; w_2 = 0.305;$$

$$w_3 = 0.12; w_4 = 0.06; w_5 = 0.05.$$

Для возможностей маневрирования используем Таблица 5. Максимум собственного значения и собственный вектор:

$$\lambda_{\max} = 12.25; w_1 = 0.305; w_2 = 0.206;$$

$$w_3 = 0.157; w_4 = 0.091; w_5 = 0.063;$$

Таблица 4. Метод принятия решений

	О	ЗД	П	ЧО	--
О	1	2	4	6	9
ЗД	1/2	1	3	5	7
П	1/4	1/3	1	2	3
ЧО	1/6	1/5	1/2	1	2
--	1/9	1/7	1/3	1/2	1

$$w_6 = 0.45; w_7 = 0.047; w_8 = 0.033; w_9 = 0.022; w_{10} = 0.021; w_{11} = 0.011.$$

Для управления множеством объектов (табл. 6):

$$\lambda_{\max} = 4.14; w_1 = 0.68; w_2 = 0.16;$$

$$w_3 = 0.1; w_4 = 0.049.$$

Для метода прогнозирования (табл. 7):

$$\lambda_{\max} = 3.0735; w_1 = 0.65;$$

$$w_2 = 0.29; w_3 = 0.06.$$

Таблица 5. Возможность маневрирования

	ИС&P&BM	ИС&P	P&BM	ИС → P → BM	P → BM	P → ИС	BM → ИС	BM	P	ИС	.
ИС&P&BM	1	3	4	5	6	7	7	8	8	8	9
ИС&P	1/3	1	2	4	5	6	6	7	8	8	9
P&BM	1/4	1/2	1	3	4	5	5	6	7	7	9
ИС → P → BM	1/5	1/4	1/3	1	2	3	3	4	5	6	8
P → BM	1/6	1/5	1/4	1/2	1	2	2	3	4	4	7
P → ИС	1/7	1/6	1/5	1/3	1/2	1	1	2	3	4	7
BM → ИС	1/7	1/6	1/5	1/3	1/2	1	1	2	4	4	7
BM	1/8	1/7	1/6	1/4	1/3	1/2	1/2	1	3	3	6
P	1/8	1/8	1/7	1/5	1/4	1/3	1/4	1/3	1	1	6
ИС	1/8	1/8	1/7	1/6	1/4	1/4	1/4	1/3	1	1	6
-	1/9	1/9	1/9	1/8	1/7	1/7	1/7	1/6	1/6	1/6	1

Таблица 6. Управления множеством объектов

	☀&↔	☀	↔	--
☀&↔	1	6	7	9
☀	1/6	1	2	4
↔	1/7	1/2	1	3
--	1/9	1/4	1/3	1

Таблица 7. Метода прогнозирования

	В	?	Д
В	1	3	8
?	1/3	1	6
Д	1/8	1/6	1

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.467/a_3; 0.033/a_4; 0.1/a_5; 0.06/a_6 \}; \\
 C_2 &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.05/a_3; 0.011/a_4; 0.1/a_5; 0.06/a_6 \}; \\
 C_3 &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.467/a_3; 0.305/a_4; 0.1/a_5; 0.06/a_6 \}; \\
 C_4 &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.12/a_3; 0.091/a_4; 0.1/a_5; 0.06/a_6 \}; \\
 C_5 &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.05/a_3; 0.011/a_4; 0.049/a_5; 0.06/a_6 \}; \\
 C_6 &= \{ 0.324/a_1; 0.875/a_2; 0.12/a_3; 0.033/a_4; 0.049/a_5; 0.06/a_6 \}; \\
 C_7 &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.305/a_3; 0.305/a_4; 0.16/a_5; 0.06/a_6 \}; \\
 C_8 &= \{ 0.056/a_1; 0.125/a_2; 0.05/a_3; 0.011/a_4; 0.1/a_5; 0.65/a_6 \};
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
C_9 &= \{ 0.056/a_1; 0.875/a_2; 0.05/a_3; 0.011/a_4; 0.1/a_5; 0.65/a_6 \}; \\
C_{10} &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.467/a_3; 0.091/a_4; 0.1/a_5; 0.65/a_6 \}; \\
C_{11} &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.06/a_3; 0.305/a_4; 0.1/a_5; 0.65/a_6 \}; \\
C_{12} &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.06/a_3; 0.305/a_4; 0.1/a_5; 0.65/a_6 \}; \\
C_{13} &= \{ 0.056/a_1; 0.125/a_2; 0.305/a_3; 0.021/a_4; 0.16/a_5; 0.29/a_6 \}; \\
C_{14} &= \{ 0.056/a_1; 0.875/a_2; 0.05/a_3; 0.011/a_4; 0.1/a_5; 0.29/a_6 \}; \\
C_{15} &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.12/a_3; 0.157/a_4; 0.1/a_5; 0.29/a_6 \}; \\
C_{16} &= \{ 0.62/a_1; 0.875/a_2; 0.06/a_3; 0.305/a_4; 0.1/a_5; 0.29/a_6 \};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{наилучший}}(a) &= \left[\max_{i=1,16} \mu_{C_i}(a_1), \max_{i=1,16} \mu_{C_i}(a_2), \dots, \max_{i=1,16} \mu_{C_i}(a_6) \right] = \\
&= (0,62/a_1, 0,875/a_2, 0,467/a_3, 0,305/a_4, 0,16/a_5, 0,65/a_6)
\end{aligned} \quad (2)$$

Как было отмечено выше, элементы вектора являются коэффициентами соответствующими значениям критерий. Используя эти коэффициенты, создадим множество критерий для каждого метода (1). Для определения наилучшего метода создадим функции принадлежности (2) и выбираем метод, равномерно совпадающий со значениями функции принадлежности. Этими методами являются (C_3 , C_7 , C_{10} , C_{11} , C_{12}). В действительности как видно из таблицы по заданным критериям наилучшими являются методы “*Burdun*”, “*Zeghal*”, “*Krozal*”, “*URET*”, “*Yang*”.

Выводы

1. Проведен анализ параметров, используемых в процессе обнаружения конфликтов и принятия решения, по их степени важности.

2. Предложен способ оценки методов обнаружения конфликтов и принятия решения на основе теории нечеткой логики.

3. На основе заданных критериев 5 методов из 16 рассмотренных в ходе исследований установлены как самые наилучшие.

4. Учетывание в процессе оценки для каждого из этих методов новых критерий включая алгоритм математического вычисления, позволит в дальнейшем выполнить более содержательное оценивание событий.

Список литературы

1. “EUROCONTROL Guidance Material for Short Term Conflict Alert. Appen-

dix A: Reference STCA System” Edition number:2.0, Document identifier: EUROCONTROL-GUID-123, 2009.

2. “Safety Nets ensuring effectiveness guide” The European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), 2009.

3. James K. Kuchar and Lee C. Yang “A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 1, No. 4, December 2000, p. 179-189.

4. Radio Technical Committee on Aeronautics (RTCA), “Minimum Performance Specifications for TCAS Airborne Equipment”, Document No. RTCA/DO-185, Washington, D.C., September, 1983.

5. P. Ryan and W. Brodegard, “New Collision Avoidance Device is Based on Simple and Passive Design to Keep the Cost Low”, ICAO Journal, vol. 52 no. 4, May, 1997.

6. I. Burdun and O. Parfentyev, “AI Knowledge Model for Self-Organizing Conflict Prevention / Resolution in Close Free-Flight Air Space”, in Proc. 1999 IEEE Aerospace Conf., Snowmass, CO, March 6-13, 1999, pp. 409-428.

7. K. Bilimoria, B. Sridhar, and G. Chatterji, “Effects of Conflict Resolution Maneuvers and Traffic Density of Free Flight”, in Proc. 1996 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf., San Diego, CA, 1996.

8. D. Bateman, “The Introduction of Enhanced Ground-Proximity Warning Sys-

tems (EGPWS) into Civil Aviation Operations Around the World”, in Proc. 11th Annual European Aviation Safety Seminar (EASS '99), Amsterdam, Netherlands, March 8-10, 1999.

9. Radio Technical Committee on Aeronautics (RTCA), “Minimum Performance Standards -Airborne Ground Proximity Warning Equipment”, Document No. RTCA/DO-161A, Washington, D.C., May 27, 1976.

10. K. Zeghal, “Towards the Logic of an Airborne Collision Avoidance System which Ensures Coordination with Multiple Cooperative Intruders”, ICAS-94-8.6.4, ICAS Proceedings, vol.3, pp. 2208-2218, 1994

11. D. H. Taylor, “Uncertainty in Collision Avoidance Maneuvering”, Journal of Navigation, vol. 43 no. 2, 1990.

12. H. Rome and R. Kalafus, “Impact of Automatic Dependent Surveillance and Navigation System Accuracy on Collision Risk on Intersecting Tracks”, in Proc. National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 1988.

13. J. Krozel, M. Peters, and G. Hunter, “Conflict Detection and Resolution for Future Air Transportation Management”, NASA CR-97-205944, April 1, 1997.

14. D. Brudnicki, K. Lindsay, and A. McFarland, “Assessment of Field Trials, Algorithmic Performance, and Benefits of the User Request Evaluation Tool (URET) Conflict Probe”, in Proc. 16th Digital Avionics Systems Conf., Irvine, CA, October 26-30, 1997, pp. 9.3-35 - 9.3-44.

15. L. Yang and J. Kuchar, “Prototype Conflict Alerting Logic for Free Flight”, AIAA Journal of Guidance, Control, and

Dynamics, vol. 20 no. 4, pp. 768-773, July-August, 1997.

16. C. Tomlin, G. Pappas, and S. Sastry, “Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study in Multi-Agent Hybrid Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 43, no. 4, pp. 509-521, April, 1998.

17. R. L. Ford and D. L. Powell, “A New Threat Detection Criterion for Airborne Collision Avoidance Systems”, Journal of Navigation, vol. 43, no. 3, 1990.

18. M. Waller and C. Scanlon, eds., “Proceedings of the NASA Workshop on Flight Deck Centered Parallel Runway Approaches in Instrument Meteorological Conditions”, NASA Conf. Publication 10191, Hampton, VA, December, 1996.

19. A. Vink, S. Kauppinen, J. Beers, and K. de Jong, “Medium Term Conflict Detection in EATCHIP Phase III”, in Proc. 16th Digital Avionics Systems Conf., Irvine, CA, October 26-30, 1997, pp. 9.3-45 - 9.3-52.

20. Thomas L. Saaty. “Decision making with the analytic hierarchy process”. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, 2008.

21. А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И.П. Федоров, «Принятие решений на основе нечетких моделей, примеры использования», Рига «Зинатне» 1990.

Статью представлено в редакцию 27.03.2014