Троичная логика для выявления групп воздушных объектов на основе неопределённых признаков

В.С. Верба[1], А.А. Липатов[1]

[1]АО «Концерн «Вега», Кутузовский проспект 34, Москва, Россия, 121170

Аннотация. Задача выявления групп (группирования) объектов существует во многих предметных областях. Большое значение она имеет для сопровождения воздушных объектов. Группирование, как правило, осуществляется на основе оценки близости объектов в пространстве их признаков. Причём признаки могут быть как количественными, так и качественными. Для воздушных объектов такими признаками являются их координаты, высота, скорость, курс, а также класс, тип, государственная принадлежность и др. В реальных условиях оценки таких признаков, как правило, характеризуются неопределённостью. В связи с этим актуальна разработка способов представления неопределённых количественных и качественных признаков воздушных объектов и построения формальных правил отнесения объектов к одной группе на основе таких признаков. Широкое применение для решения таких задач находят подходы нечеткой логики, мягких вычислений, генетических алгоритмов и др. Перспективным представляется использование многозначных логик. В работе используется представление неопределённых оценок количественных признаков объектов в виде интервалов, а качественных в виде множеств. Сформулированы правила, позволяющие на основании неопределённых оценок значений признаков выявлять достоверные и возможные группы объектов. Для формализации этих правил построено недоопределённое расширение булевой алгебры с тремя значениями истинности, которое представляет собой алгебру логики Клини с сильными пропозициональными связками.

1. Введение

Задача выявления групп (группирования) объектов встречается во многих предметных областях, в частности, в радиолокации, информационной безопасности и др. Группирование объектов необходимо для решения таких задач, как обнаружение и сопровождение множественных объектов [1], сегментация совместно движущихся объектов [2], распознавание их групповых действий [3] и др.

В области управления воздушным движением актуальность задачи группирования воздушных объектов (ВО) связана с созданием систем, способных обеспечивать сопровождение большого количества ВО. Это обусловлено следующими причинами:

- расширением сферы и ростом масштабов применения летательных аппаратов (ЛА), в особенности беспилотных;
- широким распространением групповых действий летательных аппаратов, направленных, в том числе, на создание «эффекта роя», заключающегося в превышении пропускной способности систем сопровождения ВО [4, 5];

- тенденцией к усилению контроля за использованием воздушного пространства со стороны органов власти и других заинтересованных субъектов.

В настоящее время в системах управления воздушным движением важнейшие функции анализа воздушной обстановки и принятия решений в интересах обеспечения безопасности полётов, качественного и своевременного выполнения полётных заданий и др. возложены на людей-операторов. Возможности операторов по сопровождению ВО ограничены, и крайне нежелательно перегружать их информацией о ВО. Один из способов сокращения объёма информации о ВО, предъявляемой операторам, основан на том, что ряд задач решается ЛА в составе групп [6]. При этом состав групп и взаимное расположения ЛА в них длительное время остаётся неизменным, что позволяет рассматривать такие группы как единый объект. Таким образом, операторам систем сопровождения может предъявляться информация об одном групповом ВО вместо информации о нескольких одиночных объектах.

Группирование основано на оценке взаимного положения ВО в пространстве их признаков. К числу таких признаков относят координаты в пространстве (в прямоугольной или сферической системах координат), курс и скорость ВО – эти признаки называют координатными [7], а также ряд качественных признаков, таких как государственная принадлежность, класс, тип и др.

Несколько ВО относят к одной группе, как правило, на основании их близости в пространстве и совпадения скоростей и курсов ВО [1-3, 6-8]. В пространстве координатных признаков показателями близости объектов могут служить евклидово расстояние, квадрат евклидова расстояния, взвешенное евклидово расстояние между объектами и др. Так, например, в [7] предложен показатель близости в виде отношения $r_{\text{ср}} / R_{\text{ср}}$, где $r_{\text{ср}}$ – среднее расстояние между объектами в группе, а $R_{\text{ср}}$ – среднее расстояние между группами, в [6] показателями близости служат модули разностей значений одноименных признаков объектов. Критерии принадлежности объектов к одной группе по координатным признакам могут быть как экстремальными [7], так и пороговыми [6].

Также для отнесения нескольких объектов к одной группе может требоваться совпадение их качественных признаков (например, государственной принадлежности) или соответствие значений качественных признаков у разных объектов допустимому сочетанию значений (например, допустимому сочетанию классов ВО в группе).

Часть методов группирования основана на допущении о том, что оценки признаков объектов являются точными (определёнными) [1, 2, 6, 7]. Однако на практике оценки пространственных координат ВО, их курсов и скоростей являются неопределёнными вследствие ошибок измерения. Сведения о качественных признаках ВО также могут быть неопределёнными.

В связи с этим для группирования объектов также применяются подходы нечеткой логики, нечеткой кластеризации, гранулярных вычислений, используются генетические алгоритмы, нейронные сети [9-11], недоопределённые вычисления [12-14] и др.

Так, в [12] был предложен метод группирования ВО на основе интервальных оценок их координатных признаков и априорно заданных пороговых значений близости. При этом оценки расстояния между объектами также вычисляются в виде интервалов. Сравнение интервальных оценок расстояния между ВО с пороговыми значениями приводит к появлению третьего значения истинности при принятии решения о принадлежности объектов к одной группе. В связи с этим в [12, 13] на основе содержательного анализа возможных вариантов взаимного расположения ВО были сформулированы правила принятия решения об их принадлежности к одной группе, использующие три логических значения. С применением этих правил были построены способы выявления достоверных и возможных групп ВО. В дальнейшем этот подход был распространён и на группирование ВО на основе качественных признаков, оценки значений которых представляются в виде множеств [14]. Использование данного подхода приводит к необходимости его формального обоснования.

В связи с этим *целью данной работы* является формальное обоснование троичной логики принятия решений о принадлежности множества ВО к одной группе на основе их неопределённых количественных и качественных признаков.

2. Правила группирования воздушных объектов

Для группирования каждый объект представляется в виде совокупности значений своих признаков $X = \{x_1, x_2, ..., x_k, x_{k+1}, ..., x_n\}$, где x_i, $i = \overline{1,k}$ – его координатные (количественные) признаки, а x_i, $i = \overline{k+1,n}$ – качественные признаки.

Значения координатных признаков представляются в виде числовых интервалов $x_i = [\tilde{x}_i - \Delta x_i, \tilde{x}_i + \Delta x_i]$, $i = \overline{1,k}$, где $\tilde{x}_i$ – измеренное значение *i*-го признака, Δx_i – ошибка измерения его значения. При этом принимаются следующие допущения:

- действительное значение *i*-го признака $\hat{x}_i$ в настоящее время неизвестно и оно принадлежит интервалу x_i ;
- значение $\hat{x}_i$ с равной вероятностью является любой из точек интервала x_i .

Для того, чтобы пара объектов *p* и *q* могла быть отнесена к одной группе на основании координатных признаков, для всех $i = \overline{1,k}$ должно выполняться следующее условие [12]:

$$\left| x_i^p - x_i^q \right| < \varepsilon_i \tag{1}$$

Учитывая, что x_i^p и x_i^q являются интервалами, к ним применяется операция вычитания интервалов, результат которой также является интервалом [15].

Введём предикат $G(p,q,i)$, истинный, если для пары объектов *p* и *q* и *i*-го признака выполняется неравенство (1), и ложный, если оно не выполняется. Для краткости логическое значение «Истина» обозначим, как *T*, значение «Ложь» как *F*.

Введём также следующее обозначение:

$$r_i^{pq} = \left[{}_{-}r_i^{pq}, {}^{-}r_i^{pq} \right] = \left| x_i^p - x_i^q \right| \tag{2}$$

Очевидно, что $G(p,q,i) = T$, если ${}^{-}r_i^{pq} < \varepsilon_i$, и $G(p,q,i) = F$, если ${}_{-}r_i^{pq} \geq \varepsilon_i$.

В случае же, если ${}_{-}r_i^{pq} < \varepsilon_i \leq {}^{-}r_i^{pq}$, возможны следующие варианты.

Если $\left| \hat{x}_i^p - \hat{x}_i^q \right| < \varepsilon_i$, то $G(p,q,i) = T$.

Если $\left| \hat{x}_i^p - \hat{x}_i^q \right| \geq \varepsilon_i$, то $G(p,q,i) = F$.

Однако, поскольку точные значения $\hat{x}_i^p$ и $\hat{x}_i^q$ неизвестны, следует считать возможными оба варианта, и предикат $G(p,q,i)$ является либо истинным, либо ложным. Уточнить его значение можно только при сужении интервала r_i^{pq}. Таким образом, появляется необходимость ввести третье значение истинности для предиката $G(p,q,i)$, соответствующее случаю неопределённости. Обозначим это значение, как *U*.

Как показано в [13], подобный подход может быть распространён и на другие показатели расстояния между объектами в пространстве их координатных признаков, например, на взвешенное евклидово расстояние.

В [14] предложен способ группирования ВО с использованием неопределённых качественных признаков. Для качественных признаков x_i, $i = \overline{k+1,n}$ известны конечные множества их возможных значений A_i, а текущие оценки их значений представлены множествами $B_i \subseteq A_i$. При этом принимаются следующие допущения:

- действительное значение *i*-го признака $\hat{x}_i$ в настоящее время неизвестно и $\hat{x}_i \in B_i$;
- значение $\hat{x}_i$ с равной вероятностью является любым из элементов множества B_i.

Следовательно, при $|B_i| = 1$ значение $\hat{x}_i$ известно точно, а случай, когда $|B_i| = |A_i|$ соответствует полной неопределенности значения $\hat{x}_i$.

Выполнение условий принадлежности пары объектов к одной группе по *i*-му качественному признаку также может быть выражено предикатом $G(p,q,i)$. В качестве примера рассмотрим выявление групп ВО, в которых значения одноимённых качественных признаков объектов должны совпадать.

Очевидно, что значения *i*-го признака у пары объектов p и q точно совпадают и $G(p,q,i)=T$, если $\left|B_i^p\right|=\left|B_i^q\right|=1$ и $B_i^p=B_i^q$.

Если $B_i^p \bigcap B_i^q=\varnothing$, то $G(p,q,i)=F$.

Если $\left|B_i^p\right|>1$ и (или) $\left|B_i^q\right|>1$ и $B_i^p \bigcap B_i^q \neq \varnothing$, то $G(p,q,i)=U$.

Введём предикат $Gn(p,q)$, отражающий выполнение для пары объектов *p* и *q* приведённых выше условий принадлежности к одной группе. Его значения истинности определяются следующим образом

$$\left(\forall\ i=\overline{1,n}\ G(p,q,i)=T\right) \to Gn(p,q)=T \tag{3}$$

$$\left(\exists\ i \in \{1,2,...,n\}\ G(p,q,i)=F\right) \to Gn(p,q)=F \tag{4}$$

$$\left(!\exists\ i \in \{1,2,...,n\}\ G(p,q,i)=F\right) \wedge \left(\exists\ i \in \{1,2,...,n\}\ G(p,q,i)=U\right) \to Gn(p,q)=U \tag{5}$$

Кроме того, следует учитывать, что отношение принадлежности пары объектов к одной группе является транзитивным [6]. Для представления таких отношений введём предикат $Gt(p,q)$, определяемый следующим образом

$$\left(Gn(p,q)=T\right) \vee \left(\exists\ r\ Gn(p,r)=T \wedge Gt(r,q)=T\right) \to Gt(p,q)=T \tag{6}$$

$$\begin{gathered}\left(Gt(p,q)\neq T\right) \wedge \Big(\left(Gn(p,q)=U\right) \vee \Big(\exists\ r\ \left(\left(Gn(p,r)=U\right) \vee \left(Gn(p,r)=T\right)\right) \\ \wedge \left(\left(Gt(r,q)=U\right) \vee \left(Gt(r,q)=T\right)\right)\Big)\Big) \to Gt(p,q)=U\end{gathered} \tag{7}$$

$$\left(Gt(p,q)\neq T\right) \wedge \left(Gt(p,q)\neq U\right) \to Gt(p,q)=F \tag{8}$$

Таким образом, для вычисления значений предикатов $G(p,q,i)$, $Gn(p,q)$ и $Gt(p,q)$ возникает потребность в построения логики, имеющей три значения истинности и позволяющей реализовать соотношения (3)-(8).

3. Логика для группирования воздушных объектов

Требуемая логика может быть построена как недоопределённое расширение (Н-расширение) булевой алгебры [16]. Согласно [16], Н-расширением произвольного универсального множества *X* является любая конечная система его подмножеств, замкнутая относительно операции пересечения и содержащая весь универсум и пустое множество. Так, примером Н-расширения множества *X* является множество всех его подмножеств $^*X=2^X$.

Н-расширением переменной *x*, имеющей область значений *X*, является переменная $^*x$, с областью значений $^*X$.

Н-расширением *n*-арной операции $f: X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_n \to X_{n+1}$, является операция $^*f: {}^*X_1 \times {}^*X_2 \times \ldots \times {}^*X_n \to {}^*X_{n+1}$, определяемая как

$$^*f\left({}^*x_1, {}^*x_2, ..., {}^*x_n\right)=\left\{y=f\left(z\right) \mid z \in \mathop{\times}_{i=1}^{n} {}^*x_i\right\} \tag{9}$$

Рассмотрим булеву алгебру $B=\left\langle X,O\right\rangle$, где $X=\{T,F\}$ – множество объектов (значений истинности), $X=\{\wedge,\vee,\to,\neg\}$ – множество операций, включающее в себя конъюнкцию, дизъюнкцию, импликацию и отрицание. Н-расширением алгебры *B* является алгебра

${}^*B = \left\langle {}^*X, {}^*O \right\rangle$, где ${}^*X = \left\{\{T\},\{F\},\{F,T\}\right\}$ – множество объектов – логических значений расширенной алгебры, ${}^*O = \left\{{}^*\wedge, {}^*\vee, {}^*\rightarrow, {}^*\neg\right\}$ – множество операций, представляющих собой Н-расширения операций соответствующих операций булевой алгебры.

Логические значения $\{T\}$ и $\{F\}$ соответствуют значениям *T* и *F*, введённым выше. Значение $\{F,T\}$ соответствует значению *U* и отражает состояние неопределённости.

Таблицы истинности операций алгебры ${}^*B$ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Н-расширение логических операций.

	*∧			*∨			*→			*¬
	{F}	{T}	{F, T}	{F}	{T}	{F, T}	{F}	{T}	{F, T}	
{F}	{F}	{F}	{F}	{F}	{T}	{F, T}	{T}	{T}	{T}	{T}
{T}	{F}	{T}	{F, T}	{T}	{T}	{T}	{F}	{T}	{F, T}	{F}
{F, T}	{F}	{F, T}	{F, T}	{F, T}	{T}	{F, T}	{F, T}	{T}	{F, T}	{F, T}

Анализ операций показывает, что полученная алгебра представляет собой алгебру логики Клини с сильными пропозициональными связками [17]. Используя алгебру ${}^*B$, предикат $Gn(p,q)$ можно выразить следующим образом

$$Gn(p,q) = {}^*\wedge G(p,q,i), \quad i = \overline{1,n} \qquad (10)$$

4. Алгоритмическая реализация и компьютерное моделирование

Алгоритмы группирования ВО, реализующие представленную выше логику, основаны на представлении объектов и взаимодействия между ними в виде графов [12]. Строятся графы взаимодействия ВО GR и GP. Оба графа имеют одинаковое множество вершин, которые соответствуют ВО. В графе GR рёбрами соединены вершины, для которых предикат $Gn(p,q) = T$. Этот граф называется графом достоверного взаимодействия. В графе GP рёбрами соединены вершины, для которых $Gn(p,q) = T$ или $Gn(p,q) = U$. Граф GP называется графом возможного взаимодействия. На рисунке 1 представлены пример фрагмента воздушной обстановки и соответствующие ему графы взаимодействия.

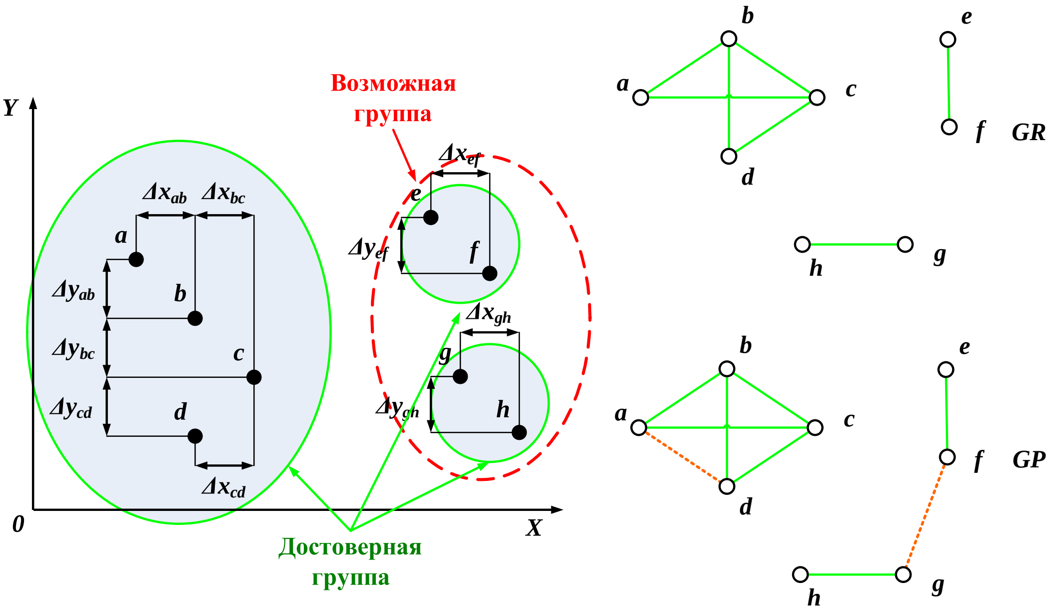

Рисунок 1. Группы ВО и графы их взаимодействия.

При таком представлении группам ВО соответствуют связные компоненты графов GR и GP, а выявление групп выполняется с помощью алгоритма поиска в глубину [18]. При этом группы, выявляемые поиском в графе GR, называются достоверными групп, а выявляемые поиском в графе GP – возможными.

Было проведено компьютерное моделирование процесса группирования ВО с помощью рассмотренных выше алгоритмов. При этом использовались следующие признаки ВО:

- прямоугольные координаты в горизонтальной плоскости;
- государственная принадлежность;
- класс.

На рисунке 2 представлен один из примеров проведённого моделирования. Пара объектов ВО1 и ВО2 совершает полёт в составе группы, объект ВО3 выполняет полёт самостоятельно. На рисунке 2 слева показан результат группирования ВО только по количественным признакам (координатам в пространстве). При временном сближении всех трёх объектов они ошибочно определяются как одна группа. На рисунке 2 справа показан результат группирования ВО координатам в пространстве и классу. Класс объекта ВО3 несовместим с классами объектов ВО1 и ВО2, и объединения всех трёх объектов в группу не происходит.

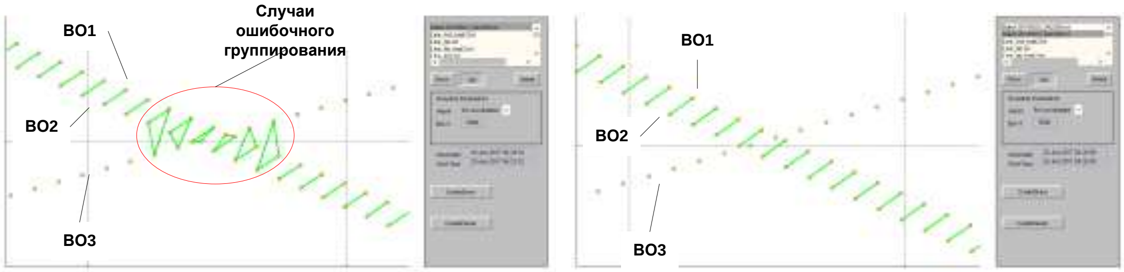

Рисунок 2. Примеры группирования трёх ВО.

5. Заключение

Данная работа посвящена задаче группирования ВО на основе неопределённых оценок их количественных и качественных признаков. Рассмотрены классы признаков и способы представления неопределённых оценок их значений. На основании анализа правил выявления групп объектов сделан вывод о необходимости использования для решения данной задач троичной логики.

Требуемая логика построена как недоопределённое расширение булевой алгебры и представляет собой логику Клини с сильными пропозициональными связками. С использованием данной логики могут быть представлены различные правила определения принадлежности пары объектов к одной возможной или достоверной группе на основе неопределенных количественных и качественных данных об объектах.

Предложенная троичная логика для группирования ВО реализована с помощью алгоритмов поиска на графах, вершины которых соответствуют объектам, а ребра обозначают достоверную или возможную принадлежность пары объектов к одной группе. Группам объектов соответствуют связные компоненты графа, которые выделяются с помощью модифицированного алгоритма поиска в глубину.

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проект № 19-08-00060 А.

7. Литература

[1] Kryś, S. Extended hierarchical temporal memory for visual object tracking. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments / S. Kryś, S. Jankowski // International Society for Optics and Photonics. – 2011. – Vol. 8008. – P. 80081C–80081C-9.

[2] Wu, S. Joint segmentation of collectively moving objects using a bag-of-words model and level set evolution / S. Wu, H. San Wong // Pattern Recognition. – 2012. – Vol. 45(9). – P. 3389-3401.
[3] Lan, T. Discriminative latent models for recognizing contextual group activities // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34(8). – P. 1549-1562.
[4] Канащенков, А.И. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения / А.И. Канащенков, В.И. Меркулов, О.Ф. Самарин – М.: ИПРЖР, 2002. – 176 с.
[5] Li, X. Cooperatively coevolving particle swarms for large scale optimization / X. Li, X. Yao // IEEE Trans. Evol. Comput. – 2012. – Vol. 16(2). – P. 210-224.
[6] Кирсанов, А.П. Методы обработки радиолокационной информации при сопровождении компактных групп воздушных объектов / А.П. Кирсанов, О.С. Сорвенков, Д.Н. Сузанский // Радиотехника. – 1996. – Т. 10. – С. 102-108.
[7] Горощенко, Л.Б. Методы координированного наведения и атаки несколькими истребителями группы самолётов противника / Л.Б. Горощенко // Полёт. – 2000. – Т. 6. – С. 32-36.
[8] Вахненко, В.А. Группирование воздушных целей / В.А. Вахненко, П.А. Матвеев, А.А. Цишук // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – Т. 3. – С. 11-13.
[9] Pedrycz, W. An Optimization of Allocation of Information Granularity in the Interpretation of Data Structures: Toward Granular Fuzzy Clustering / W. Pedrycz, A. Bargiela // IEEE Trans. Syst. Man. And Cybern. B. – 2012. – Vol. 42(3). – P. 582-590.
[10] Lewis, R. Revisiting the Restricted Growth Function Genetic Algorithm for Grouping Problems / R. Lewis, E. Pullin // Evol. Comput. – 2011. – Vol. 19(4). – P. 693-704.
[11] Karasulu, B. Image Segmentation Using Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms: Survey and Trends / B. Karasulu, S. Balli // Mach. Graph. and Vision. – 2010. – Vol. 19(4). – P. 367-409.
[12] Липатов, А.А. Метод и алгоритм формирования групп наблюдаемых воздушных объектов с неточными координатами состояния / А.А. Липатов // Радиотехника. – 2011. – Т. 8. – С. 80-83.
[13] Верба, В.С. Выявление групп воздушных объектов с учетом неопределенности их координат состояния / В.С. Верба, А.А. Липатов, А.Н. Федисов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – Т. 1. – С. 24-29.
[14] Липатов, А.А. Методы выявления однородных и неоднородных групп объектов на основе неопределённых качественных данных / А.А. Липатов, В.Н. Ушаков, М.В. Никитина // Труды СПИИ РАН. – 2016. – Т. 4(47). – С. 130-143. DOI:10.15622/sp.47.7.
[15] Алефельд, Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер – М.: Мир, 1987. – 360 с.
[16] Нариньяни, А.С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний / А.С. Нариньяни // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. – 1986. – Т. 5. – С. 3-28.
[17] Клини, С.К. Математическая логика – М.: Мир, 1973.
[18] Ахо, А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман – М.: Мир, 1979. – 536 с.

The ternary logic for aerial objects groups detecting on base of undefined attributes

V.S. Verba[1], A.A. Lipatov[1]

[1]JSC Radio Engineering Corporation Vega, Kutuzov ave. 34, Moscow, Russia, 121170

Abstract. The task of objects groups detecting (grouping) exists in many application areas. It is important for the air objects tracking. Grouping, as a rule, is carried out on the basis of an evaluation of degree of proximity of objects in space of their attributes. The attributes can be both quantitative and qualitative. For air objects, such attributes are their coordinates, altitude, speed, course, as well as class, type, nationality, etc. Under real conditions the estimates of such attributes are usually undefined. This paper deals with the methods of representation and processing of undefined estimates of quantitative and qualitative attributes of aerial objects. The rules are formulated, that allowing to conclude that the objects reliably belong to one group or possibly belong to one group or do not belong to one group. To formalize these rules, the ternary extension of the Boolean algebra is proposed. This algebra is Kleene logic algebra with strong propositional connectives.