ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПРИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ МНОГОЦЕЛЕВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

С. Г. Белов

АО «Концерн радиостроения «Вега», 121170, Москва, Кутузовский просп., д.34

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2017 г.

Аннотация. Разработан метод решения задачи отождествления воздушных объектов при их многоцелевом сопровождении в РЛС воздушного базирования, позволяющий применять единый подход к обработке координатных и некоординатных параметров измерений за счет использования положений теории нечеткой логики.

Ключевые слова: радиолокационные системы воздушного базирования, отождествление, теория нечеткой логики.

Abstract. A method has been developed for solving the problem of identifying airborne objects in an airborne radar that makes it possible to apply a unified approach to the processing of coordinate and non-coordinate measurement parameters by using the provisions of fuzzy logic theory.

Keywords: airborne radars, identifying, fuzzy logic theory.

Введение

Многоцелевое сопровождение воздушных объектов в радиолокационных системах (РЛС) воздушного базирования осуществляется по радиолокационным отметкам объектов, формируемым системами первичной и вторичной радиолокации, входящими в состав бортовой РЛС [1].

Под радиолокационной отметкой объекта в системе первичной радиолокации (ПРЛ) понимается совокупность параметров воздушного объекта, формируемых в результате обработки отраженного от объекта зондирующего радиолокационного сигнала. В состав формируемых параметров входят, как минимум, дальность до объекта, углы азимута и места объекта. Кроме того, в зависимости от возможностей радиолокатора в состав параметров могут входить такие величины как:

- радиальная скорость движения объекта относительно носителя РЛС воздушного базирования;
- размер объекта (малый/средний/большой), приблизительно оцениваемый по измеренному значению эффективной поверхности отражения (ЭПО) объекта;
- класс воздушного объекта (самолет/вертолет/беспилотный летательный аппарат/ракета), приблизительно оцениваемый по характеру отраженного от объекта сигнала;

и др.

Под радиолокационной отметкой объекта в системе вторичной радиолокации (ВРЛ) понимается совокупность параметров воздушного объекта, формируемых при удаленном взаимодействии с объектом через систему автоматического запроса-ответа (САЗО), таких как государственная принадлежность объекта, индивидуальный номер объекта (код установленного на объекте ответчика), высота объекта, а также измеряемые вторичным радиолокатором дальность до объекта и его угол азимута.

Функционирование системы ВРЛ носит подчиненный по отношению к системе ПРЛ характер, поскольку сеансы запроса-ответа в системе ВРЛ инициируются по командам из системы ПРЛ, причем только по объектам, для которых в системе ПРЛ уже получены радиолокационные отметки, но еще не определена их государственная принадлежность. После того как государственная принадлежность какого-либо объекта определена этому объекту более не посылаются запросы САЗО и, соответственно, по этому объекту в системе ВРЛ перестают формироваться радиолокационные отметки.

Вопросы комплексирования данных, формируемых системами ПРЛ и ВРЛ, выходят за рамки настоящей работы, поэтому в дальнейшем условно полагается, что из бортовой РЛС в систему многоцелевого сопровождения воздушных объектов поступает последовательность радиолокационных отметок объектов, каждая из которых включает параметры, совместно сформированные системами ПРЛ и ВРЛ.

Обработка этой последовательности в процессе многоцелевого сопровождения направлена на формирование (уточнение) трасс сопровождаемых объектов, т.е. траекторий их перемещения в пространстве.

Формирование трасс объектов требует решения двух взаимосвязанных задач:

1) отождествления объектов по измерениям, т.е. установления соответствия между отдельными радиолокационными отметками и экземплярами объектов;

2) оценивания (фильтрации) текущих пространственных координат и скоростей сопровождаемых объектов по мере получения очередных радиолокационных отметок.

Отождествление объектов осуществляется по всем доступным измерению параметрам, содержащимся в радиолокационных отметках объектов, среди которых можно выделить два типа параметров - координатные и некоординатные.

Координатные параметры, измеряемые на фоне шумов, являются случайными величинами, определенными на непрерывном множестве значений. К таким параметрам относятся получаемые из системы ПРЛ дальность до объекта, углы азимута и места объекта, радиальная скорость объекта и получаемые из системы ВРЛ дальность до объекта, угол азимута и высота объекта.

Некоординатные параметры (или качественные признаки) являются детерминированными и определены на ограниченном дискретном множестве значений. К таким параметрам относятся получаемые из системы ПРЛ размер объекта и его класс и получаемые из системы ВРЛ государственная принадлежность объекта и индивидуальный номер объекта.

Отождествление объектов по координатным параметрам измерений, таким как дальность или угол азимута объекта, традиционно выполняется в рамках математического аппарата классической теории оптимального приема сигналов [2, 4], например, на основе использования функций правдоподобия, аппроксимируемых гауссовской плотностью вероятности и определяющих вероятностную степень близости между полученным и прогнозируемым измерениями (последнее рассчитывается на основании прогнозируемых значений пространственных координат и скоростей объектов).

Однако, для отождествления объектов по измеряемым качественным признакам, например, по признаку государственной принадлежности, который может принимать два детерминированных значения («свой» или «чужой»), применение математического аппарата оптимального приема сигналов, ориентированного на работу со случайными величинами, является затруднительным.

В связи с этим в традиционных системах многоцелевого сопровождения при решении задачи отождествления объектов качественные признаки учитываются путем использования детерминированных логических соотношений, дополняющих вероятностные соотношения, используемые при отождествлении объектов по координатным параметрам. Это приводит, во-первых, к увеличению громоздкости алгоритмов отождествления, во-вторых, к не учету возможности неверного формирования значений детерминированных признаков из-за сбоев в измерительной системе или воздействия на нее помех (когда, например, государственная принадлежность «чужого» объекта измерительной системой ВРЛ ошибочно определяется как «своя»).

Указанные недостатки могут быть преодолены за счет использования при решении задачи отождествления положений теории нечеткой логики [3], в рамках которой как случайные координатные, так и детерминированные некоординатные измеряемые параметры могут быть сведены к одному «нечеткому» типу параметров. При этом отождествление объектов как по координатным, так и некоординатным параметрам будет производиться по единым правилам.

Ц е л ь р а б о т ы - разработать метод решения задачи отождествления воздушных объектов при их многоцелевом сопровождении в РЛС воздушного базирования, позволяющий применять единый подход к обработке координатных и некоординатных параметров измерений за счет использования положений теории нечеткой логики.

Для уменьшения громоздкости изложения в дальнейшем условно полагается, что состав параметров измерений, содержащихся в радиолокационных отметках, поступающих из РЛС на вход системы многоцелевого сопровождения, ограничен следующими параметрами:

- координатными: дальностью D до объекта, углом α азимута объекта, углом ε места объекта, радиальной скоростью $V_{\text{рад}}$ объекта (рис. 1);

- некоординатными: государственной принадлежностью G объекта и его индивидуальным номером $N_{\text{инд}}$.

Перечисленные параметры составляют полный вектор $\mathbf{z}$ измерения

$$\mathbf{z} = \left[D, \alpha, \varepsilon, V_{\text{рад}}, G, N_{\text{инд}} \right]^T. \qquad (1)$$

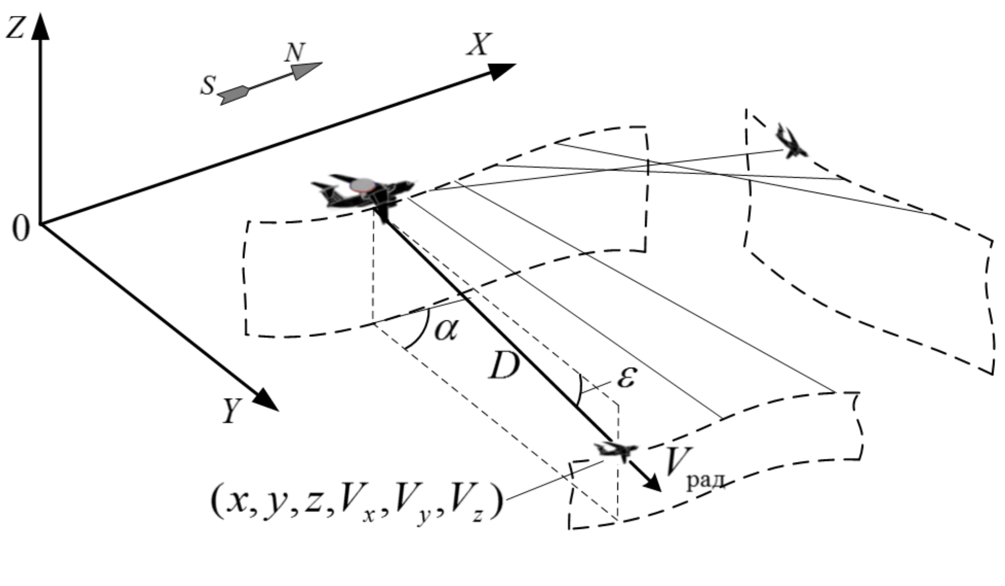

Рис. 1

При этом параметры состояния сопровождаемых объектов, которые могут быть оценены на основании измерения (1), составляют полный вектор $\mathbf{x}$ состояния объекта

$$\mathbf{x} = \left[x, y, z, V_x, V_y, V_z, G, N_{\text{инд}} \right]^T, \tag{2}$$

где x, y, z - координаты объекта в декартовой наземной неподвижной системе координат OXYZ с осью X, направленной на север, осью Y, направленной на восток, и осью Z, направленной от Земли вверх; V_x, V_y, V_z - проекции скорости объекта по осям системы координат OXYZ (рис. 1); $G, N_{\text{инд}}$ - соответственно государственная принадлежность объекта и его индивидуальный номер.

В дальнейшем полагается, что задача формирования оценок параметров состояния объектов, используемых при их отождествлении, решается одним из известных способов, например, в рамках математического аппарата калмановской фильтрации [2, 4]. При этом поскольку вопросы оценивания выходят за рамки настоящей работы соответствующие соотношения для расчета оценок в работе не приводятся.

Вероятностный подход к отождествлению объектов по координатным параметрам на основе использования гауссовских функций правдоподобия

Рассмотрим сначала классический вероятностный подход к решению задачи отождествления объектов по координатным параметрам измерений, используемый в теории оптимального приема сигналов.

Допустим, на вход системы многоцелевого сопровождения из РЛС поступает последовательность

$$\left\{ \mathbf{z} \right\}_k = \left\{ \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, ..., \mathbf{z}_k \right\} \tag{3}$$

радиолокационных отметок, полученных от различных объектов в моменты времени от первого до k-го и определяемых векторами $\mathbf{z}_k$ измерений, компонентами которых являются некоррелированные между собой координатные параметры, т.е.

$$\mathbf{z}_k = \left[D_k, \alpha_k, \varepsilon_k, V_{\text{рад}\,k} \right]^T \tag{4}$$

где $D_k, \alpha_k, \varepsilon_k, V_{\text{рад}\,k}$ - измеренные в k-й момент времени соответственно дальность до объекта, угол азимута объекта, угол места объекта, радиальная скорость объекта (рис. 1).

При этом оцениваемый в k-й момент времени вектор $\mathbf{x}_k$ параметров состояния произвольного объекта также включает только координатные параметры состояния и представляется в виде

$$\mathbf{x}_k = \left[x_k, y_k, z_k, V_{xk}, V_{yk}, V_{zk} \right]^T, \tag{5}$$

где $x_k, y_k, z_k, V_{xk}, V_{yk}, V_{zk}$ - координаты и проекции скорости объекта в системе координат OXYZ (рис. 1) в k-й момент времени.

Вероятностная связь между вектором $\mathbf{z}_k$ измерения и вектором $\mathbf{x}_k$ параметров состояния объекта, от которого получено это измерение, задается уравнением наблюдения

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}\left(\mathbf{x}_k\right) + \boldsymbol{\xi}_k, \tag{6}$$

где $\mathbf{h}\left(\mathbf{x}_k\right)$ - векторная функция полезного сигнала, устанавливающая детерминированную функциональную зависимость между векторами $\mathbf{z}_k$ и $\mathbf{x}_k$; $\boldsymbol{\xi}_k$ - векторный дискретный шум наблюдения, компоненты которого определяют ошибки измерений отдельных компонентов вектора $\mathbf{z}_k$ измерения.

В теории оптимального приема сигналов задача отождествления объектов по измерениям решается как задача проверки статистических гипотез, в рамках которой осуществляется выбор наиболее правдоподобного варианта (гипотезы) соответствия очередного поступившего измерения различным объектам. Процедура отождествления, в которой для сравнения проверяемых гипотез используются функции правдоподобия, задаваемые в виде гауссовской плотности вероятности, включает следующие этапы.

1. При получении очередного *k*-го измерения (радиолокационной отметки) формируются все возможные варианты (гипотезы) $\Gamma_k^{(r)}, r=\overline{1,L_k}$ соответствия этого измерения каждому из I_{k-1} объектов, отождествленных на предыдущих шагах обработки, плюс одному новому объекту. Общее число L_k формируемых при этом гипотез равно

$$L_k = I_{k-1} + 1. \tag{7}$$

2. В рамках каждой *r*-й гипотезы $\Gamma_k^{(r)}, r=\overline{1,L_k}$ об отождествлении выполняется процедура экстраполяции, в результате которой формируются:

- прогнозируемое на текущий *k*-й момент времени значение $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}$ вектора $\mathbf{x}$ параметров состояния объекта, отождествленного согласно гипотезе $\Gamma_k^{(r)}$;

- прогнозируемое на текущий *k*-й момент времени значение вектора измерения, рассчитываемое как значение $\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)$ векторной функции полезного сигнала из (6), вычисленной при $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}$;

- корреляционная матрица $\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}$ невязки $\left(\mathbf{z} - \mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)\right)$ произвольного измерения $\mathbf{z}$ относительно прогнозируемого $\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)$.

Процедура экстраполяции выполняется в рамках решения задачи оценивания (фильтрации) параметров состояния объекта, например, с использованием соотношений фильтра Калмана.

3. Для каждой *r*-й гипотезы $\Gamma_k^{(r)}, r=\overline{1,L_k}$ об отождествлении формируется функция $p\left(\mathbf{z}\,\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)$ правдоподобия произвольного измерения $\mathbf{z}$, задаваемая в виде многомерной гауссовской плотности вероятности с математическим ожиданием, равным прогнозируемому значению $\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)$ вектора измерения от *r*-го объекта, и матрицей дисперсий, равной

корреляционной матрице $\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}$ невязки измерения

$$p\left(\mathbf{z} \middle| \Gamma_k^{(r)}\right) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \det \mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}}} e^{-\frac{1}{2}\left[\mathbf{z}-\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)})\right]^T \left[\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}\right]^{-1} \left[\mathbf{z}-\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)})\right]}, \ r = \overline{1, L_k}, \qquad (8)$$

где N – размерность вектора $\mathbf{z}$ измерения.

Отметим, что в рассматриваемом случае, когда вектор измерения (4) включает в себя некоррелированные координатные параметры радиолокационных отметок объектов, многомерная плотность вероятности (8) может быть представлена в виде произведения одномерных гауссовских плотностей вероятности отдельных компонентов вектора измерения

$$p\left(\mathbf{z} \middle| \Gamma_k^{(r)}\right) = p\left(D \middle| \Gamma_k^{(r)}\right) \cdot p\left(\alpha \middle| \Gamma_k^{(r)}\right) \cdot p\left(\varepsilon \middle| \Gamma_k^{(r)}\right) \cdot p\left(V_{\text{рад}\, k} \middle| \Gamma_k^{(r)}\right), \qquad (9)$$

где $p\left(D \middle| \Gamma_k^{(r)}\right), p\left(\alpha \middle| \Gamma_k^{(r)}\right), p\left(\varepsilon \middle| \Gamma_k^{(r)}\right), p\left(V_{\text{рад}\, k} \middle| \Gamma_k^{(r)}\right)$ - гауссовские плотности вероятности измерений соответственно дальности, угла азимута, угла места и радиальной скорости для r-го объекта.

4. В рамках каждой из гипотез $\Gamma_k^{(r)}, r = \overline{1, L_k}$ определяется правдоподобность полученного в k-й момент времени измерения $\mathbf{z}_k$, вычисляемая как значение функции правдоподобия (8) при $\mathbf{z} = \mathbf{z}_k$, т.е.

$$p\left(\mathbf{z}_k \middle| \Gamma_k^{(r)}\right) = p\left(\mathbf{z} \middle| \Gamma_k^{(r)}\right)\Big|_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_k}, \ r = \overline{1, L_k}. \qquad (10)$$

5. По критерию максимума правдоподобия

$$r_{\text{нп}} = \arg\max_{r=\overline{1,L_k}} p\left(\mathbf{z}_k \middle| \Gamma_k^{(r)}\right) \qquad (11)$$

рассчитывается номер $r_{\text{нп}}$ наиболее правдоподобной гипотезы $\Gamma_k^{(r_{\text{нп}})}$ об отождествлении, определяющей наиболее правдоподобный вариант соответствия измерения $\mathbf{z}_k$ одному из объектов. Это соответствие является результатом решения задачи отождествления на k-м шаге обработки.

Отождествление объектов по координатным и некоординатным параметрам на основе использования нечетких функций принадлежности

В соответствии с рассмотренным выше порядком решения задачи отождествления, принятым в теории оптимального приема сигналов, правдоподобность гипотез об отождествлении полученного измерения с различными объектами определяется по многомерным гауссовским плотностям вероятности измерений (8). При этом состав параметров измерения, для которых формируется плотность вероятности, ограничен только параметрами, являющимися случайными величинами, к которым в рассматриваемом случае относятся координатные параметры радиолокационных отметок объектов.

В теории нечеткой логики эквивалентом процедуры определения правдоподобности гипотез об отождествлении измерения с проверяемыми объектами является процедура установления степени принадлежности полученного измерения к нечетким множествам, с помощью которых задаются области значений параметров проверяемых объектов. При этом в качестве аналога гауссовских плотностей вероятности измерений могут быть использованы функции принадлежности измерений к нечетким множествам.

Отличием функций принадлежности от плотностей вероятности является то, что они не имеют строгую математическую форму, определяемую законами распределения случайных величин, а задаются исходя из нестрогих (нечетких) экспертных оценок. В этом случае появляется возможность определить функции принадлежности не только для случайных координатных параметров измерения, но и для детерминированных некоординатных параметров (качественных признаков), тем самым сформировать функцию принадлежности для полного вектора измерения (1).

На рис. 2а, 2б в качестве иллюстрации приведены графические представления соответственно гауссовской плотности вероятности $p\left(\mathbf{z}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)$ измерения для r-го проверяемого объекта и функции принадлежности $\mu\left(\mathbf{z}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)$ измерения к r-му нечеткому множеству.

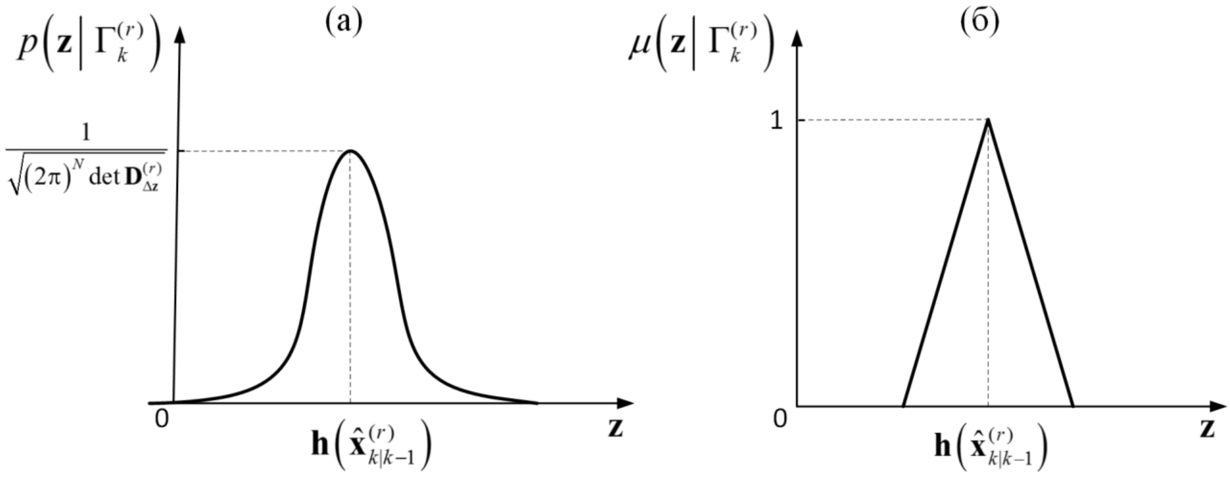

Рис. 2

Функции $p\left(\mathbf{z}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)$ и $\mu\left(\mathbf{z}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)$, условно представленные на рис. 2 в виде одномерных функций, в общем случае являются многомерными и имеют размерность N, равную размерности вектора $\mathbf{z}$ измерения.

Обе функции принимают максимальное значение в случае, когда полученное измерение совпадает с прогнозируемым, рассчитываемым как значение $\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)$ функции полезного сигнала из (6) в точке прогнозируемого значения $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}$ вектора параметров состояния r-го объекта.

В отличие от плотности вероятности $p\left(\mathbf{z}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)$, имеющей переменную область значений $\left[0,\left(\left(2\pi\right)^N \det\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}\right)^{-1/2}\right]$, зависящую от величины детерминанта $\det\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}$ корреляционной матрицы невязки измерения, область значений функции принадлежности $\mu\left(\mathbf{z}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)$ всегда определяется постоянным интервалом [0, 1], а её максимальное значение всегда равно единице.

Общий порядок решения задачи отождествления объектов по измерениям в рамках теории нечеткой логики аналогичен рассмотренному выше порядку, используемому в теории оптимального приема сигналов, и включает следующие этапы.

1. При получении *k*-го измерения формируются гипотезы $\Gamma_k^{(r)}, r=\overline{1,L_k}$ об отождествлении этого измерения с объектами, которые уже были отождествлены на предыдущих шагах обработки, плюс с одним новым объектом. При этом каждой *r*-й гипотезе или, что то же самое, каждому *r*-му проверяемому объекту ставится в соответствие нечеткое множество, принадлежность измерения к которому требуется проверить.

2. Для каждого *r*-го нечеткого множества осуществляется экстраполяция параметров состояния объекта, которому соответствует это множество.

При этом для координатных параметров состояния и измерения, составляющих соответственно вектора (5) и (4), рассчитываются:

- прогнозируемое на текущий *k*-й момент времени значение $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}$ вектора $\mathbf{x}$ параметров состояния объекта;

- прогнозируемое на текущий *k*-й момент времени значение вектора измерения, рассчитываемое как значение $\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)$ векторной функции полезного сигнала из (6), вычисленной при $\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}$;

- корреляционная матрица $\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}$ невязки $\left(\mathbf{z}-\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)\right)$ произвольного измерения $\mathbf{z}$ относительно прогнозируемого $\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)$.

Процедура экстраполяции для координатных параметров выполняется в рамках решения задачи оценивания (фильтрации) параметров состояния объекта, например, с использованием соотношений фильтра Калмана.

Экстраполяция некоординатных параметров $G, N_{\text{инд}}$ состояния и измерений, входящих соответственно в вектора (2) и (1), с учетом детерминированности этих параметров сводится к переносу соответствующих значений с предыдущего шага обработки на текущий без изменений, т.е.

$$\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right) = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(r)},\ r = \overline{1, L_k}\ . \tag{12}$$

3. Для каждого r-го нечеткого множества формируется многомерная функция $\mu\left(\mathbf{z}\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)$ принадлежности полного измерения (1) к множеству.

При допущении о некоррелированности параметров, входящих в полный вектор измерения, многомерная функция $\mu\left(\mathbf{z}\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)$ принадлежности как и в случае с многомерной плотностью вероятности (8), (9) может быть представлена в виде произведения одномерных функций принадлежности отдельных компонентов вектора измерения

$$\begin{gathered}\mu\left(\mathbf{z}\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right) = \mu\left(D\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)\cdot\mu\left(\alpha\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)\cdot\mu\left(\varepsilon\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)\cdot\mu\left(V_{\text{рад}\,k}\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)\cdot \\ \cdot\mu\left(G\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)\cdot\mu\left(N_{\text{инд}}\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right),\ r = \overline{1, L_k}\end{gathered} \tag{13}$$

где $\mu\left(D\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right),\ \mu\left(\alpha\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right),\ \mu\left(\varepsilon\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right),\ \mu\left(V_{\text{рад}\,k}\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right),\ \mu\left(G\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right),\ \mu\left(N_{\text{инд}}\middle|\ \Gamma_k^{(r)}\right)$ - функции принадлежности соответственно измерений дальности, угла азимута, угла места, радиальной скорости, государственной принадлежности и индивидуального номера объекта к r-му нечеткому множеству.

Как было отмечено выше в теории нечеткой логики вид функций принадлежности не диктуется строгими законами распределения случайных величин, а формируется исходя из экспертных соображений.

При этом с учетом того, что координатные параметры измерений являются случайными величинами, обоснованным является задание одномерных функций принадлежности для этих параметров в форме нормированных к единице гауссовских кривых, подобных гауссовской плотности вероятности (8). В этом случае произведение одномерных функций принадлежности по всем координатным параметрам измерения, составляющим вектор (4), определяется выражением

$$\mu\left(D\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)\mu\left(\alpha\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)\mu\left(\varepsilon\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)\mu\left(V_{\text{рад}\,k}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)=e^{-\frac{1}{2}\left[\mathbf{z}-\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k\text{-}1}^{(r)})\right]^T\left[\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}\right]^{-1}\left[\mathbf{z}-\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k\text{-}1}^{(r)})\right]}, \quad (14)$$

в котором прогнозируемое значение $\mathbf{h}\left(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(r)}\right)$ вектора измерения и корреляционная матрица $\mathbf{D}_{\Delta\mathbf{z}}^{(r)}$ невязки для координатных параметров измерения рассчитываются с учетом замечаний, рассмотренных в п.2 описываемого порядка решения задачи отождествления.

Функции принадлежности для некоординатных параметров измерения: государственной принадлежности G и индивидуального номера $N_{\text{инд}}$ объекта – могут быть заданы исходя из экспертных соображений в виде функций

$$\mu\left(G\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)=\begin{cases}0.8, & \textit{если}\ h_G=\text{"свой" и } z_G=\text{"свой"}\\ 0.5, & \textit{если}\ h_G=\text{"свой" и } z_G=\text{"неопеределена"}\\ 0.2, & \textit{если}\ h_G=\text{"свой" и } z_G=\text{"чужой"}\\ 0.8, & \textit{если}\ h_G=\text{"чужой" и } z_G=\text{"чужой"}\\ 0.5, & \textit{если}\ h_G=\text{"чужой" и } z_G=\text{"неопеределена"}\\ 0.2, & \textit{если}\ h_G=\text{"чужой" и } z_G=\text{"свой"}\\ 0.8, & \textit{если}\ h_G=\text{"неопеределена" и } z_G=\text{"неопеределена"}\\ 0.2, & \textit{если}\ h_G=\text{"неопеределена" и } z_G=\text{"свой"}\\ 0.2, & \textit{если}\ h_G=\text{"неопеределена" и } z_G=\text{"чужой"}\end{cases}, \quad (15)$$

$$\mu\left(N_{\text{инд}}\middle|\,\Gamma_k^{(r)}\right)=\begin{cases}0.9, & \textit{если}\ z_{N_{\text{инд}}}=h_{N_{\text{инд}}}\\ 0.1, & \textit{если}\ z_{N_{\text{инд}}}\neq h_{N_{\text{инд}}}\end{cases}, \quad (16)$$

где h_G, $h_{N_{\text{инд}}}$ - прогнозируемые значения соответственно государственной принадлежности и индивидуального номера объекта; z_G, $z_{N_{\text{инд}}}$ - измеренные значения соответственно государственной принадлежности и индивидуального номера объекта.

4. Для каждого *r*-го нечеткого множества определяется степень принадлежности полученного в k-й момент времени измерения $\mathbf{z}_k$ к множеству, вычисляемая как значение функции принадлежности (13) с

учетом (14), (15), (16) при $\mathbf{z} = \mathbf{z}_k$, т.е.

$$\mu\left(\mathbf{z}_k \,\middle|\, \Gamma_k^{(r)}\right) = \mu\left(\mathbf{z} \,\middle|\, \Gamma_k^{(r)}\right)\Big|_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_k},\ r = \overline{1, L_k}\,. \tag{17}$$

5. Определяется номер $r_{\text{нп}}$ нечеткого множества, степень принадлежности измерения $\mathbf{z}_k$ к которому имеет максимальное значение

$$r_{\text{нп}} = \arg\max_{r=\overline{1,L_k}} \mu\left(\mathbf{z}_k \,\middle|\, \Gamma_k^{(r)}\right). \tag{18}$$

Это нечеткое множество соответствует наиболее правдоподобной гипотезе $\Gamma_k^{(r_{\text{нп}})}$ об отождествлении, которая и определяет наиболее правдоподобный вариант принадлежности измерения $\mathbf{z}_k$ одному из объектов, обеспечивая тем самым решение задачи отождествления на *k*-м шаге обработки.

Заключение

Использование положений теории нечеткой логики при решении задачи отождествления воздушных радиолокационных объектов в процессе их многоцелевого сопровождения позволяет свести к одному «нечеткому» типу параметров как координатные параметры измерений, являющиеся случайными величинами, так и детерминированные некоординатные параметры (качественные признаки) объектов. При этом отождествление объектов по координатным и некоординатным параметрам измерений может проводиться по единым правилам с использованием функций принадлежности, являющихся аналогом функций правдоподобия, используемых при отождествлении объектов в рамках математического аппарата оптимального приема сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-08-04000-а, №16-29-04260 офи_м).

Литература

1. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г. и др. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. / Под. ред. Дудника П.И. - М.:

Издание ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2006.

2. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением. Т.1. Теоретические основы. / Под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2012.

3. Новак В., Перфильева И., Мочкрож И. Математические принципы нечёткой логики - М.: Физматлит, 2006.

4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. - М.: Радио и связь, 1983.

Ссылка на статью:
С. Г. Белов. Использование нечеткой логики при отождествлении воздушных радиолокационных объектов в процессе их многоцелевого сопровождения. Журнал радиоэлектроники электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/may17/5/text.pdf