

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ СИСТЕМ ПОСТАНОВКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ БАРЬЕРОВ

М. М. Кирюпин, О. А. Белоусов, А. А. Тришаков

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
mik6339@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; дефаззификация; диаграмма направленности; диаграммообразующее устройство; нечеткая логика; пространственный барьер; фаззификация; фазированные антенные решетки; SMART-системы.

Аннотация: Рассмотрено применение алгоритмов нечеткой логики в диаграммообразующих устройствах антенных комплексов постановки пространственного барьера против беспилотных летательных аппаратов, которые позволят в реальном масштабе времени формировать необходимую диаграмму направленности, без строгих ограничений по параметрам входного сигнала, в направлении выбранного объекта; повысят скорость работы системы, ее вариативность и надежность при внештатных ситуациях, а также увеличат устойчивость к дестабилизирующим факторам.

Введение

В настоящее время с бурным развитием технологий в области беспилотной аэросъемки, и всей техники в целом, активно поднимается проблема с несанкционированным проникновением на охраняемые территории беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в целях промышленного или личного шпионажа, совершения диверсий и т.д.

В связи с этим актуальной задачей для обеспечения безопасности объектов является разработка высокоэффективных систем радиоэлектронного подавления (РЭП) для создания пространственного барьера от проникновения БПЛА, которые позволят дезориентировать летательный аппарат, перехватить управляющий сигнал, а также привести к выходу из строя и уничтожению несанкционированного устройства.

Важнейшее звено таких комплекса по противодействию БПЛА – антенные системы. Для правильного их функционирования в сложной помеховой обстановке необходимо применять высокоэффективные алгоритмы с применением искусственного интеллекта для формирования необходимых многолучевых диаграмм направленности.

В основе системы наведения подавляющего сигнала чаще всего применяются адаптивные алгоритмы для настройки диаграммы направленности (ДН) на захваченную цель. Из-за сложности подбора универсальных весовых коэффициентов, способных удовлетворять поставленные требования, а также неспособности систем подстраиваться под различные типы летательных аппаратов на практике данные алгоритмы не всегда способны формировать необходимый луч ДН.

Данные сложности возникают из-за систем управления, реализуемых связкой «оборудование – алгоритм». Вследствие чего, комплекс не способен корректно выполнять поставленные задачи при сложной электромагнитной обстановке и других дестабилизирующих факторах.

Предлагается реализовать алгоритм управления на базе систем нечеткой логики, который позволит в реальном масштабе времени формировать необходимую ДН, без строгих ограничений для параметров сигналов и внештатных ситуаций, в направлении выбранного объекта, повысит скорость работу системы, а также увеличит устойчивость к дестабилизирующим факторам. В качестве эффективной антенной системы будем использовать цилиндрическую адаптивную фазированную антенную решетку.

Принцип работы алгоритма под управлением нечеткой логики для адаптивной фазированной антенной решетки (SMART-системы) [1, 2] можно представить следующим образом. На начальном этапе происходит сканирование сектора антенной системой на 360° , определяется направление сигнала, приходящего с БПЛА. Далее информация передается на комплекс обработки радиолокационной станции (РЛС) [3, 4], которая формирует необходимый сигнал, а антенна на основе алгоритма формирует необходимую ДН. Помимо этого, антенный комплекс также определяет направление пришедшего сигнала, которому соответствует определенный сектор и его уровень мощности. В свою очередь, алгоритм формирует необходимое управляющее воздействие в виде амплитудо-фазового распределения и подает значения на комплекс РЛС.

Алгоритмы нечеткой логики основываются на использовании нечетких множеств, реализующих структурирование поступающих конкретных физических значений к определенным терм-понятиям [5]. При этом нечеткая логика позволяет проводить преобразование вектора входных сигналов в вектора выходных, используя при данной операции заложенную в нее экспертом некую базу знаний, предназначенных под конкретную задачу.

Помимо поступающей информации координат выбранной цели, мощности сигнала, необходимо также знать частотные параметры сигнала и угол относительно земли, на котором БПЛА находится от антенной решетки. Данный комплекс входных параметров необходим для обеспечения эффективного формирования ДН при различной дестабилизирующей обстановке.

Блок управления алгоритмом нечеткой логики представлен на рис. 1. Его функционирование происходит следующим образом.

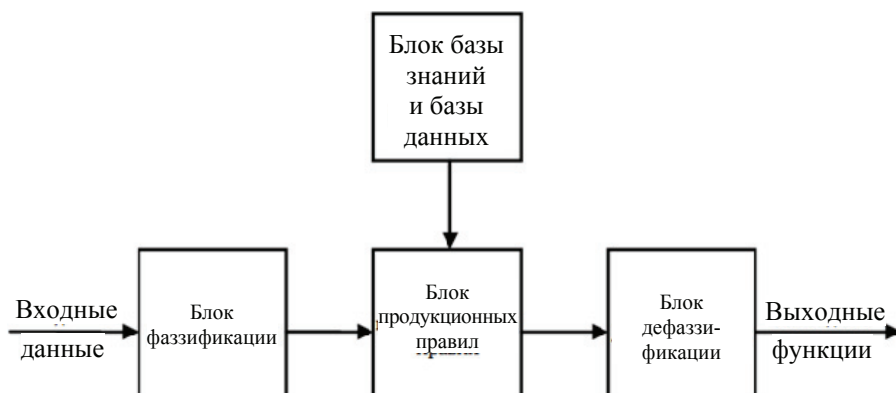


Рис. 1. Структурная схема блока управления алгоритма нечеткой логики

Входные данные, поступающие на блок фазификации, осуществляют переход из постоянного состояния в нечеткое. Далее данные анализируются блоком продукционных правил, на основе которых осуществляется формирование выходных переменных [6]. Опираясь на продукционные правила, сформированные значения на основании блока базы знаний и базы данных окончательно формируют необходимую функцию, которая, проходя через блок дефазификации, выполняя обратное преобразование из нечеткого состояния в постоянное, образует конечную выходную управляющую функцию.

Блок управления построен на базе системы нечеткого логического вывода типа Мамдами [7]. Такое решение объясняется тем, что данная система, в связи с интуитивной понятностью и интерпретацией правил, позволяет использовать количественные значения как на входе, так и получать их на выходе из системы, за счет аппарата нечеткой логики и теории нечетких множеств увеличивать быстрдействие системы при большом количестве входных переменных, а также позволять корректировать заложенные в систему базы знаний и правил, тем самым эффективнее использовать все ее возможности.

Алгоритм управления диаграммообразующего устройства на основе алгоритмов нечеткой логики

В качестве входных переменных, используемых для алгоритма нечеткой логики, рассмотрим четыре нечеткие лингвистические переменные [8]. Для каждой из них сформируем терм-множества в виде нечетких переменных. Переменную координаты обозначим как $\bar{\xi} = \{\bar{\xi}_C, \bar{\xi}_{CB}, \bar{\xi}_B, \bar{\xi}_{ЮВ}, \bar{\xi}_{Ю}, \bar{\xi}_{ЮЗ}, \bar{\xi}_З, \bar{\xi}_{СЗ}\}$, где $\bar{\xi}_n$ – направление координаты по азимуту в сторону БПЛА (серев, юг и т.д.); частоты – $\bar{f} = \{\bar{f}_{GSM}, \bar{f}_L, \bar{f}_S, \bar{f}_C\}$, где \bar{f}_n – буквенное обозначение частотного диапазона, на котором могут работать БПЛА (GSM, L-, S-, C-диапазоны); мощность – $\bar{P} = \{\bar{P}_{0.м}, \bar{P}_M, \bar{P}_{cp}, \bar{P}_0, \bar{P}_{0.б}\}$, где \bar{P}_n – величины соответственно очень малая, малая, средняя, большая, очень большая. Угол обозначим как $\bar{\phi} = \{\bar{\phi}_{31}, \bar{\phi}_{с.3}, \bar{\phi}_{32}\}$, где

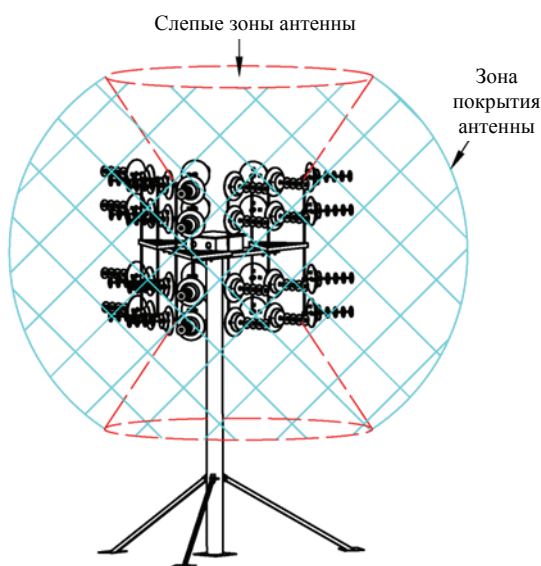


Рис. 2. Иллюстрация слепых зон антенны, в которой нет формирования ДН

$\bar{\phi}_n$ – обозначение рабочих углов, (в которых антенный комплекс способен осуществлять корректное диаграммообразование. Рабочие углы, составлены из четырех рядов кольцевых антенных решеток, работающих в широком диапазоне частот подразумевающие под собой разбиение еще на дополнительные зоны (зона 1, слепая зона, зона 2) (рис. 2). Данные параметры, проходя через блок правил, реализуют функцию, отвечающую за формирования необходимой ДН.

Для каждой из сформированных функций необходимо определить функции принадлежности нечетких множеств. Данные функции приводятся как в ана-

литическом, так и графическом виде. Построение графической и аналитической части будет проводиться в программном продукте MATLAB с дополнением Fuzzy Logic Designer [9, 10].

Аналитические выражения функции принадлежности нечеткого множества для мощности следующие:

$$\mu_{o.m} = \begin{cases} 1, & P \leq 0; \\ \frac{20-P}{20}, & P \in (0; 20); \\ 0, & P \geq 20; \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_m = \begin{cases} 0, & P \leq 20; \\ \frac{P-0}{40-P}, & P \in (0; 20); \\ \frac{20}{40-P}, & P = 40; \\ \frac{20}{20}, & P \in (20; 40); \\ 0, & P \geq 40; \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{cp} = \begin{cases} 0, & P \leq 40; \\ \frac{P-20}{60-P}, & P \in (20; 40); \\ \frac{20}{60-P}, & P = 40; \\ \frac{20}{20}, & P \in (40; 60); \\ 0, & P \geq 60; \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_b = \begin{cases} 0, & P \leq 60; \\ \frac{P-40}{80-P}, & P \in (40; 60); \\ \frac{20}{80-P}, & P = 60; \\ \frac{20}{20}, & P \in (60; 80); \\ 0, & P \geq 80; \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{o.b} = \begin{cases} 0, & P \leq 80; \\ \frac{P-80}{20}, & P \in (80; 100); \\ 1, & P \geq 100. \end{cases} \quad (5)$$

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 3.

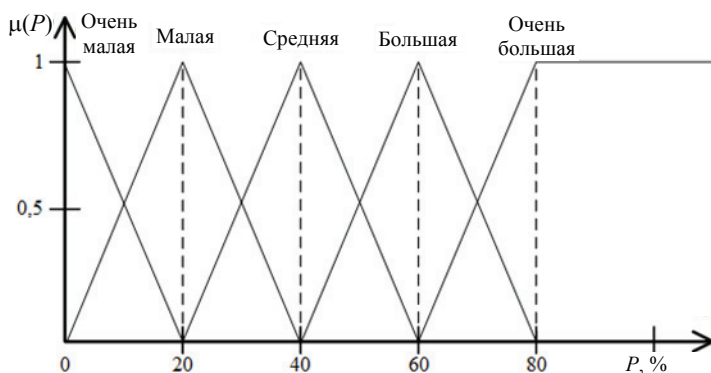


Рис. 3. Функция принадлежности в графическом виде для терм-входных переменных мощности

Аналитические выражения функции принадлежности нечеткого множества для координат представлены выражениями (6) – (13):

$$\mu_c = \begin{cases} 1, & x \leq 0; \\ \frac{45-x}{45}, & x \in (0; 45); \\ 0, & x \geq 45; \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{cb} = \begin{cases} 0, & x \leq 45; \\ \frac{x-0}{90-x}, & x \in (0; 45); \\ \frac{45}{45}, & x = 45; \\ \frac{45}{45}, & x \in (45; 90); \\ 0, & x \geq 90; \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_b = \begin{cases} 0, & x \leq 90; \\ \frac{x-45}{135-x}, & x \in (45; 90); \\ \frac{45}{45}, & x = 90; \\ \frac{45}{45}, & x \in (90; 135); \\ 0, & x \geq 135; \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{юв} = \begin{cases} 0, & x \leq 135; \\ \frac{x-90}{180-x}, & x \in (90; 135); \\ \frac{45}{45}, & x = 135; \\ \frac{45}{45}, & x \in (135; 180); \\ 0, & x \geq 180; \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{ю} = \begin{cases} 0, & x \leq 180; \\ \frac{x-135}{225-x}, & x \in (135; 180); \\ \frac{45}{45}, & x = 180; \\ \frac{45}{45}, & x \in (180; 225); \\ 0, & x \geq 225; \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{юз} = \begin{cases} 0, & x \leq 225; \\ \frac{x-180}{270-x}, & x \in (180; 225); \\ \frac{45}{45}, & x = 225; \\ \frac{45}{45}, & x \in (225; 270); \\ 0, & x \geq 270; \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_3 = \begin{cases} 0, & x \leq 270; \\ \frac{x-225}{315-x}, & x \in (225; 270); \\ \frac{45}{45}, & x = 270; \\ \frac{45}{45}, & x \in (270; 315); \\ 0, & x \geq 315; \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{сз} = \begin{cases} 0, & x \leq 315; \\ \frac{x-315}{45}, & x \in (315; 360); \\ 1, & x \geq 360. \end{cases} \quad (13)$$

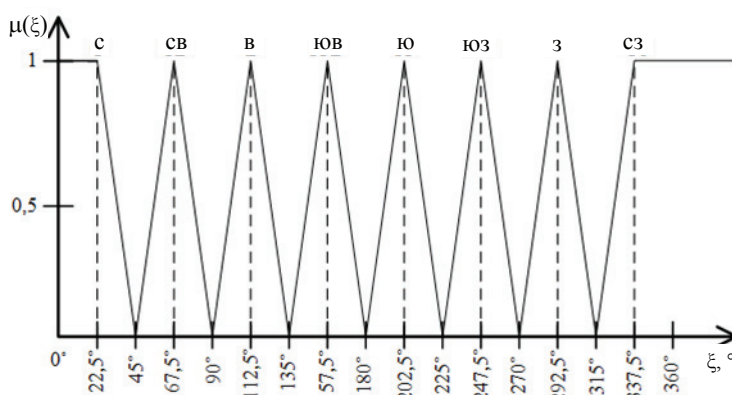


Рис. 4. Функция принадлежности в графическом виде для терм-входных переменных координат по азимуту

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 4.

Аналитические выражения функции принадлежности нечеткого множества для частоты представлены выражениями (14) – (17):

$$\mu_{\text{GSM}} = \begin{cases} 1-f & 0, f \leq 0,78; \\ 0,22 & f \in (0,78; 1); \\ 0 & f \geq 1; \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{\text{L}} = \begin{cases} \frac{f-0}{90-f} & 0, f \leq 1; \\ 0,22 & f \in (0,78; 1); \\ 1 & f = 1; \\ \frac{90-f}{1} & f \in (1; 2); \\ 1 & 0, f \geq 2; \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{\text{S}} = \begin{cases} \frac{f-1}{4-f} & 0, f \leq 2; \\ 1 & f \in (1; 2); \\ \frac{1}{2} & f = 2; \\ \frac{1}{2} & f \in (2; 4); \\ 0 & f \geq 4; \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu_{\text{C}} = \begin{cases} \frac{f-2}{8-f} & 0, f \leq 4; \\ 2 & f \in (2; 4); \\ \frac{2}{4} & f = 4; \\ \frac{2}{4} & f \in (4; 8); \\ 4 & 0, f \geq 8. \end{cases} \quad (17)$$

В графическом виде данные выражения показаны на рис. 5.

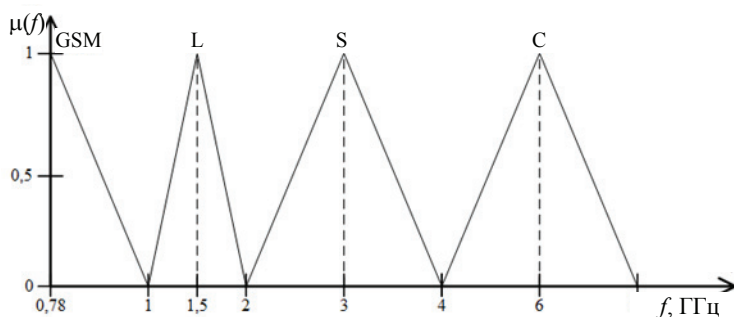


Рис. 5. Функция принадлежности в графическом виде для терм-входных переменных частоты

Аналитические выражения функции принадлежности нечеткого множества для угла представлены выражениями (18) – (26):

$$\mu_{31} = \begin{cases} 1, & \phi \leq 0; \\ \frac{-90-\phi}{15}, & \phi \in (-90; -75); \\ 0, & \phi \geq -75; \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu_{2_1} = \begin{cases} 0, & \phi \leq -75; \\ \frac{\phi+75}{15}, & \phi \in (-90; -75); \\ 1, & \phi = -75; \\ \frac{-75-\phi}{15}, & \phi \in (-75; -60); \\ 0, & \phi \geq -60; \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu_{3_1} = \begin{cases} 0, & \phi \leq -60; \\ \frac{\phi+60}{15}, & \phi \in (-75; -60); \\ 1, & \phi = -60; \\ \frac{-60-\phi}{15}, & \phi \in (-60; -45); \\ 0, & \phi \geq -45; \end{cases} \quad (20)$$

$$\mu_{4_1} = \begin{cases} 0, & \phi \leq -45; \\ \frac{\phi+45}{15}, & \phi \in (-60; -45); \\ 1, & \phi = -45; \\ \frac{-45-\phi}{15}, & \phi \in (-45; -30); \\ 0, & \phi \geq -30; \end{cases} \quad (21)$$

$$\mu_{с.з} = \begin{cases} 0, & \phi \leq -30; \\ \frac{\phi+30}{30-\phi}, & \phi \in (-45; -30); \\ 1, & \phi = -30; \\ \frac{30-\phi}{60}, & \phi \in (-30; 30); \\ 0, & \phi \geq 30; \end{cases} \quad (22)$$

$$\mu_{2_4} = \begin{cases} 0, & \phi \leq 30; \\ \frac{\phi+30}{45-\phi}, & \phi \in (-30; 30); \\ \frac{60}{45-\phi}, & 1, \phi = 30; \\ \frac{60}{15}, & \phi \in (30; 45); \\ 15, & 0, \phi \geq 45; \end{cases} \quad (23)$$

$$\mu_{2_3} = \begin{cases} 0, & \phi \leq 45; \\ \frac{\phi-30}{60-\phi}, & \phi \in (30; 45); \\ \frac{15}{60-\phi}, & 1, \phi = 45; \\ \frac{15}{15}, & \phi \in (45; 60); \\ 15, & 0, \phi \geq 60; \end{cases} \quad (24)$$

$$\mu_{2_2} = \begin{cases} 0, & \phi \leq 60; \\ \frac{\phi-45}{75-\phi}, & \phi \in (45; 60); \\ \frac{15}{75-\phi}, & 1, \phi = 60; \\ \frac{15}{15}, & \phi \in (60; 75); \\ 15, & 0, \phi \geq 75; \end{cases} \quad (25)$$

$$\mu_{31} = \begin{cases} 0, & \phi \leq 75; \\ \frac{\phi-75}{15}, & \phi \in (75; 90); \\ 15, & 1, \phi \geq 90. \end{cases} \quad (26)$$

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 6.

В качестве выходных переменных, используемых для алгоритма нечеткой логики, рассмотрим шесть нечетких лингвистических переменных. Для каждой из них сформируем терм-множества в виде нечетких переменных. Такими переменными будут являться: амплитуда $\bar{A} = \{\bar{A}_{о.м}, \bar{A}_м, \bar{A}_{ср}, \bar{A}_б, \bar{A}_{о.б}\}$, где \bar{A}_n – величины очень малая, малая, средняя, большая, очень большая; фаза $\bar{\Psi} = \{\bar{\Psi}_{о.м}, \bar{\Psi}_м, \bar{\Psi}_{ср}, \bar{\Psi}_б, \bar{\Psi}_{о.б}\}$, где $\bar{\Psi}_n$ – величины очень малая, малая, средняя, большая, очень боль-

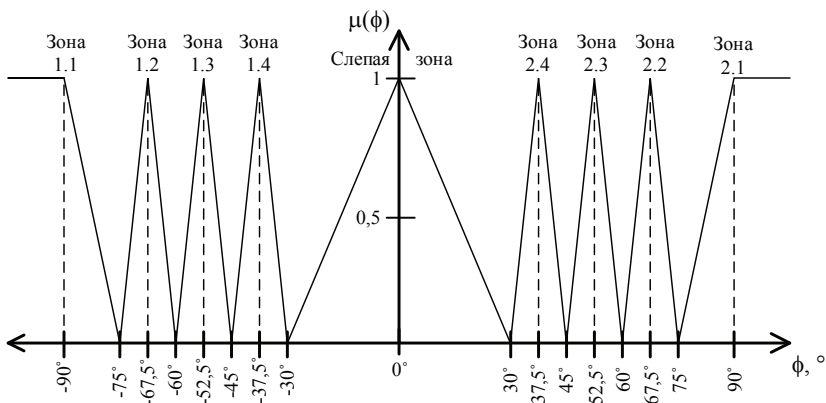


Рис. 6. Функция принадлежности в графическом виде для терм-входных переменных рабочих углов антенного комплекса

шая; сектор $\bar{S} = \{\bar{S}_1, \bar{S}_2, \bar{S}_3, \bar{S}_4, \bar{S}_5, \bar{S}_6\}$, где \bar{S}_n – секторы соответственно 1, ..., 6; частота (аналогичные параметры как и у входной функции); «угол места» $\bar{\varphi} = \{\bar{\varphi}_{о.н}, \bar{\varphi}_{н1}, \bar{\varphi}_{н2}, \bar{\varphi}_{о.в}\}$, где $\bar{\varphi}_n$ – величины очень низко, нормаль 1, нормаль 2, очень высоко; ряд $\bar{R} = \{\bar{R}_н, \bar{R}_{ср}, \bar{R}_в\}$, где \bar{R}_n – величины соответственно нижний, средний и верхний ряды. Произведем аналогичные операции, как и с входными переменными.

Аналитические выражения функции принадлежности нечеткого множества для «угла места» представлены выражениями (27) – (30):

$$\mu_{о.н} = \begin{cases} 1, & \varphi \leq -30; \\ \frac{-15 - \varphi}{15}, & \varphi \in (-30; -15); \\ 0, & \varphi \geq -15; \end{cases} \quad (27)$$

$$\mu_{н1} = \begin{cases} 0, & \varphi \leq -15; \\ \frac{\varphi + 30}{15}, & \varphi \in (-30; -15); \\ \frac{15}{-5 - \varphi}, & \varphi = -15; \\ \frac{-5 - \varphi}{15}, & \varphi \in (-15; -5); \\ 0, & \varphi \geq -5; \end{cases} \quad (28)$$

$$\mu_{н2} = \begin{cases} 0, & \varphi \leq 0; \\ \frac{\varphi - 5}{-5 - \varphi}, & \varphi \in (-15; 5); \\ \frac{15}{-5 - \varphi}, & \varphi = 0; \\ \frac{-5 - \varphi}{15}, & \varphi \in (5; 15); \\ 0, & \varphi \geq 15; \end{cases} \quad (29)$$

$$\mu_{о.в} = \begin{cases} \frac{\varphi - 15}{15}, & \varphi \in (15; 30); \\ 0, & \varphi \geq 30. \end{cases} \quad (30)$$

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 7.

Аналитические выражения функции принадлежности нечеткого множества для частотного диапазона сигнала будет аналогичны входной функции.

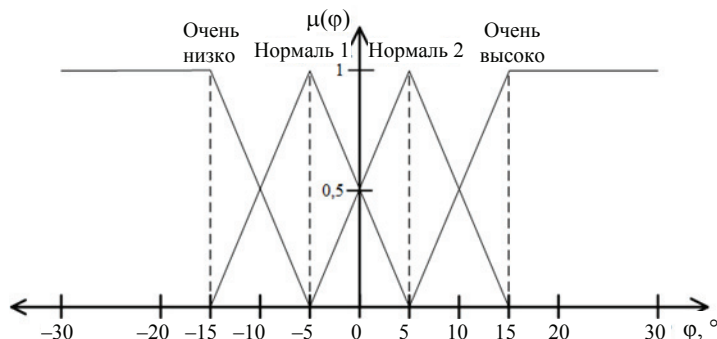


Рис. 7. Функция принадлежности в графическом виде для терм-выходных переменных «угла места»

Аналитические выражения выходной функции принадлежности нечеткого множества для амплитуды представлены выражениями (31) – (35):

$$\mu_{0,м} = \begin{cases} 0,2 - A & 1, A \leq 0; \\ \frac{0,2 - A}{0,2}, & A \in (0; 0,2); \\ 0,2 & 0, A \geq 0,2; \end{cases} \quad (31)$$

$$\mu_{м} = \begin{cases} \frac{A - 0}{0,2}, & 0, A \leq 0,2; \\ \frac{0,2}{0,4 - A}, & A \in (0; 0,2); \\ \frac{0,2}{0,4 - A}, & 1, A = 0,2; \\ \frac{0,2}{0,2}, & A \in (0,2; 0,4) \\ 0,2 & 0, A \geq 0,4; \end{cases} \quad (32)$$

$$\mu_{ср} = \begin{cases} \frac{A - 0,2}{0,6 - A}, & 0, A \leq 0,4; \\ \frac{0,2}{0,6 - A}, & A \in (0,2; 0,4); \\ \frac{0,2}{0,2}, & 1, A = 0,4; \\ \frac{0,2}{0,2}, & A \in (0,4; 0,6); \\ 0,2 & 0, A \geq 0,6; \end{cases} \quad (33)$$

$$\mu_{б} = \begin{cases} \frac{A - 0,4}{0,8 - A}, & 0, A \leq 0,4; \\ \frac{0,2}{0,8 - A}, & A \in (0,4; 0,6); \\ \frac{0,2}{0,2}, & 1, A = 0,6; \\ \frac{0,2}{0,2}, & A \in (0,6; 0,8); \\ 0,2 & 0, A \geq 0,8; \end{cases} \quad (34)$$

$$\mu_{0,б} = \begin{cases} \frac{A - 0,8}{0,2}, & 0, A \leq 0,8; \\ \frac{A - 0,8}{0,2}, & A \in (0,8; 1); \\ 0,2 & 1, A \geq 1. \end{cases} \quad (35)$$

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 8.

Аналитические выражения выходной функции принадлежности нечеткого множества для фазы представлены выражениями (36) – (40):

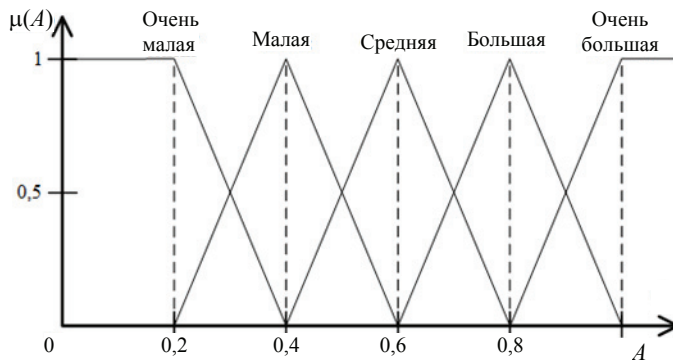


Рис. 8. Функция принадлежности в графическом виде для терм-выходных переменных амплитуды

$$\mu_{o,m} = \begin{cases} 1, & \Psi \leq 0; \\ \frac{30 - \Psi}{30}, & \Psi \in (0; 30); \\ 0, & \Psi \geq 30; \end{cases} \quad (36)$$

$$\mu_m = \begin{cases} 0, & \Psi \leq 30; \\ \frac{\Psi - 0}{60 - \Psi}, & \Psi \in (0; 30); \\ \frac{30}{60 - \Psi}, & \Psi = 30; \\ \frac{30}{30}, & \Psi \in (30; 60); \\ 0, & \Psi \geq 0,4; \end{cases} \quad (37)$$

$$\mu_{cp} = \begin{cases} 0, & \Psi \leq 60; \\ \frac{\Psi - 30}{90 - \Psi}, & \Psi \in (30; 60); \\ \frac{30}{90 - \Psi}, & \Psi = 60; \\ \frac{30}{30}, & \Psi \in (60; 90); \\ 0, & \Psi \geq 90; \end{cases} \quad (38)$$

$$\mu_b = \begin{cases} 0, & \Psi \leq 90; \\ \frac{\Psi - 60}{120 - \Psi}, & \Psi \in (60; 90); \\ \frac{30}{120 - \Psi}, & \Psi = 90; \\ \frac{30}{30}, & \Psi \in (90; 120); \\ 0, & \Psi \geq 120; \end{cases} \quad (39)$$

$$\mu_{o,b} = \begin{cases} 0, & \Psi \leq 120; \\ \frac{\Psi - 120}{60}, & \Psi \in (120; 180); \\ 1, & \Psi \geq 180. \end{cases} \quad (40)$$

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 9.

Аналитические выражения выходной функции принадлежности нечеткого множества для сектора представлены выражениями (41) – (46):

$$\mu_{S1} = \begin{cases} 1, & S \leq 0; \\ \frac{120 - S}{120}, & S \in (0; 120); \\ 0, & S \geq 120; \end{cases} \quad (41)$$

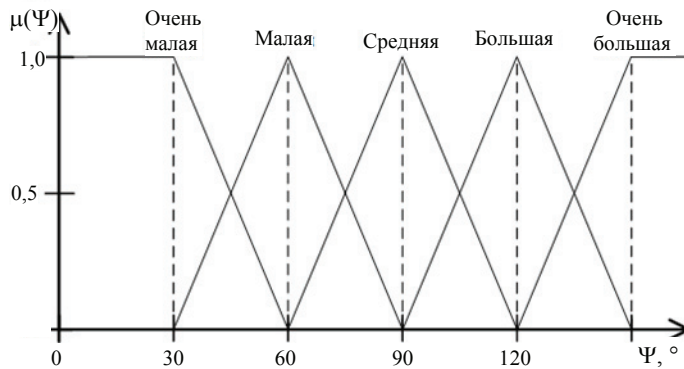


Рис. 9. Функция принадлежности в графическом виде для терм-выходных переменных фаз

$$\mu_{S2} = \begin{cases} 0, & S \leq 120; \\ \frac{S-0}{60-S}, & S \in (0; 120); \\ \frac{120}{60-S}, & 1, \quad S = 120; \\ \frac{120}{120}, & S \in (60; 180); \\ 0, & S \geq 180; \end{cases} \quad (42)$$

$$\mu_{S3} = \begin{cases} 0, & S \leq 180; \\ \frac{S-06}{240-S}, & S \in (60; 180); \\ \frac{120}{240-S}, & 1, \quad S = 180; \\ \frac{120}{120}, & S \in (120; 240); \\ 0, & S \geq 240; \end{cases} \quad (43)$$

$$\mu_{S4} = \begin{cases} 0, & S \leq 120; \\ \frac{S-120}{300-S}, & S \in (120; 240); \\ \frac{120}{300-S}, & 1, \quad S = 240; \\ \frac{120}{120}, & S \in (180; 300); \\ 0, & S \geq 300; \end{cases} \quad (44)$$

$$\mu_{S5} = \begin{cases} 0, & S \leq 300; \\ \frac{S-180}{360-S}, & S \in (180; 300); \\ \frac{120}{360-S}, & 1, \quad S = 300; \\ \frac{120}{120}, & S \in (240; 360); \\ 0, & S \geq 360; \end{cases} \quad (45)$$

$$\mu_{S6} = \begin{cases} 0, & S \leq 360; \\ \frac{S-300}{60}, & S \in (300; 360); \\ 1, & S \geq 360. \end{cases} \quad (46)$$

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 10.

Аналитические выражения выходной функции принадлежности нечеткого множества для ряда представлены выражениями (47) – (49):

$$\mu_B = \begin{cases} 1, & R \leq 0; \\ \frac{60-R}{60}, & R \in (0; 60); \\ 0, & R \geq 60; \end{cases} \quad (47)$$

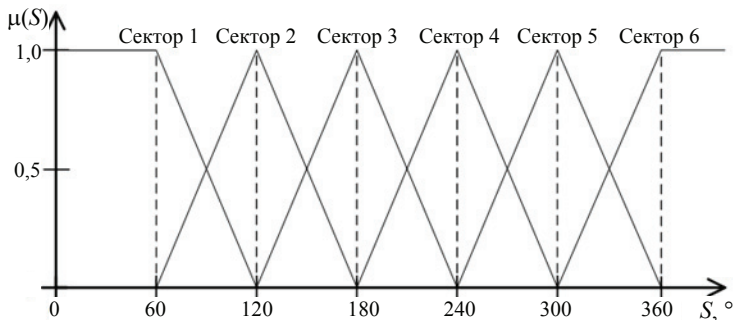


Рис. 10. Функция принадлежности в графическом виде для терм-выходных переменных сектора

$$\mu_{\text{ср}} = \begin{cases} 0, & R \leq 60; \\ \frac{R-0}{60-R}, & R \in (0; 60); \\ 1, & R = 60; \\ \frac{60-R}{75-60}, & R \in (60; 75); \\ 0, & R \geq 75; \end{cases} \quad (48)$$

$$\mu_{\text{н}} = \begin{cases} 0, & R \leq 75; \\ \frac{R-60}{90-60}, & R \in (60; 90); \\ 1, & R \geq 90. \end{cases} \quad (49)$$

В графическом виде данные выражения представлены на рис. 11.

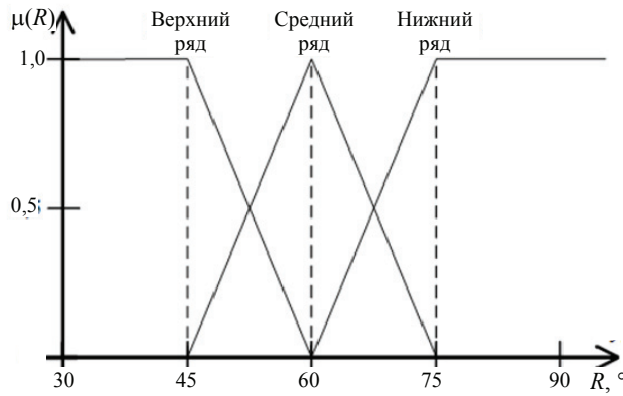


Рис. 11. Функция принадлежности в графическом виде для терм-выходных переменных ряда



Рис. 12. Структурная схема системы нечеткой логики

Входные и выходные функции создают систему, структура которой указана на рис. 12. Входные данные поступают на блок продукционных правил, в котором, в соответствии заданными параметрами, происходит обработка данных в выходную функцию. Пример формирования правил в данном блоке представлен в следующих выражениях:

$$\text{Если } (\overline{\xi_C}, \text{ и } \overline{P_{o.m.}}, \text{ и } \overline{\phi_{31}}, \text{ и } \overline{h_{GSM}}), \text{ то } (\overline{A_{o.m.}}, \text{ и } \overline{\Psi_{o.m.}}, \text{ и } \overline{S_1}, \text{ и } \overline{h_{GSM}}, \text{ и } \overline{R_H}); \quad (50)$$

$$\text{Если } (\overline{\xi_n}, \text{ и } \overline{P_n}, \text{ и } \overline{\phi_n}, \text{ и } \overline{h_n}), \text{ то } (\overline{A_n}, \text{ и } \overline{\Psi_n}, \text{ и } \overline{S_n}, \text{ и } \overline{h_n}, \text{ и } \overline{R_n}). \quad (51)$$

Заключение

Применение эффективных алгоритмов управления на базе систем нечеткой логики позволяет в реальном масштабе времени без строгих ограничений по параметрам входного сигнала пространственно управлять формируемой антенной решеткой, диаграммой направленности, которая, в свою очередь, способна осуществлять ведение помеховой цели в различных помеховых обстановках и дестабилизирующих факторах, а также при формировании необходимых узконаправленных лучей выполнять подавления нежелательного сигнала БПЛА, находящегося в зоне действия формируемого пространственного барьера. Помимо этого, использование такого алгоритма в системах диаграммообразующего устройства антенными комплексами совместно со станциями постановки пространственного барьера позволяет расширить функциональные возможности данных станций, увеличить быстроедействие, скорость определения цели и постановки помехи.

Список литературы

1. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток : учеб. пособие для вузов / В. С. Филиппов, Л. И. Пономарев, А. Ю. Гринев [и др.] ; под ред. Д. И. Воскресенского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1994. – 592 с.
2. Вендик, О. Г. Антенны с электрическим сканированием (Введение в теорию) / О. Г. Вендик, М. Д. Парнес ; под ред. Л. Д. Бахраха. – М. : САЙНС-ПРЕСС, 2001. – 252 с.
3. Перунов, Ю. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю. М. Перунов, К. И. Фомичев, Л. М. Юдин. – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
4. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы : учеб. для вузов / П. А. Бакулев. – М. : Радиотехника, 2004. – 320 с.
5. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 384 с.
6. Klir, G. J. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications / G. J. Klir, B. Yuan. New Jersey, 1995. – 588 p.
7. Hooda, D. S. Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control. An Introduction / D. S. Hooda, V. Raich. – Oxford, U.K. : Alpha Science International Ltd., 2017. – 402 p.
8. Борисов, В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – М. : Горячая линия–Телеком, 2007. – 284 с.
9. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
10. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MatLab. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.

An Algorithm to Control the Patterning Device of a Digital Antenna Array for Spatial Barrier Systems

M. M. Kiryupin, O. A. Belousov, A. A. Trishakov

*Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems,
mik6339@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: unmanned aerial vehicles; defuzzification; directional pattern; chart-forming device; fuzzy logic; spatial barrier; fuzzification; phased array antennas; SMART systems.

Abstract: The application of fuzzy logic algorithms in beam-forming devices of antenna complexes for setting up a spatial barrier against unmanned aerial vehicles is considered. This will allow the formation of the necessary radiation pattern in real time, without strict restrictions on the parameters of the input signal, in the direction of the selected object; it will increase the speed of the system, its variability and reliability in emergency situations, and also increase resistance to destabilizing factors.

References

1. Voskresenskij D.I., Granovskaja R.A., Davydova N.S. [et al.]. *Antenny i ustrojstva SVCh. Proektirovanie fazirovannyh antennyh reshetok: uchebn. posobie dlja uzov* [Microwave antennas and devices. Design of phased array antennas], Moscow: Radio i svjaz', 1981. 592 p. (In Russ.).
2. Vendik O.G., Parnes M.D.; Bahrah L.D. (Ed.). *Antenny s `elektricheskim skanirivaniem* [Antennas with electric scanning], Moscow: SAJNS-PRESS, 2002, 252 p. (In Russ.).
3. Perunov Yu.M., Fomichev K.I., Yudin L.M. *Radio `elektronnoe podavlenie informacionnyh kanalov system upravlenija oruzhiem* [Electronic suppression of information channels of weapon control systems], Moscow: Radiotekhnika, 2003, 416 p. (In Russ.).
4. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy: uchebnik dlja vuzov* [Radar systems: Textbook for universities], Moscow: Radiotekhnika, 2004. (In Russ.).
5. Rutkovskaja D., Pilin'skij M., Rutkovskij L. *Nejronnyeseti, geneticheskie algoritmy i nechetkiesistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems], Moscow: Gorjachaja linija - Telekom, 2013, 384 p. (In Russ.).
6. Klir G. J., Yuan B. *Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and Applications*, New Jersey, 1995, 588 p.
7. Hooda D.S., Raich V. *Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control an Introduction*, Oxford, U.K.: Alpha Science International Ltd., 2017, 402 p.
8. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. *Nechjotkie modeli i seti* [Fuzzy models and networks], Moscow: Gorjachajalinija - Telekom, 2007, 284 p. (In Russ.).
9. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzy TECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH], St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2003, 736 p. (In Russ.).
10. D'jakonov V, Kruglov V. *Matematicheskie pakety rasshirenija MatLab. Spetsial'nyj spravocnik* [Mathematical MatLab extension packages. Special reference], St. Petersburg: Piter, 2001, 480 p. (In Russ.).

Algorithmus zur Steuerung des Diagrammbildungsgeräts der digitalen Antennenanordnung für Installieren der räumlichen Barrieren

Zusammenfassung: Es ist die Anwendung von Fuzzy-Logic-Algorithmen in den Diagrammformungsgeräten von Antennenkomplexen zum Aufbau einer räumlichen Barriere gegen unbemannte Luftfahrzeuge in Betracht gezogen, die es ermöglichen, das erforderliche Richtliniendiagramm in Echtzeit ohne strenge Einschränkungen für die Parameter des Eingangssignals in Richtung des ausgewählten Objekts zu erstellen; sie erhöhen die Systemgeschwindigkeit, ihre Variabilität und Zuverlässigkeit in außergewöhnlichen Situationen und erhöhen die Stabilität gegenüber destabilisierenden Faktoren.

Algorithme de contrôle de diagramme du réseau d'antenne numérique pour les systèmes de barrière spatiale

Résumé: Est examiné l'application des algorithmes de logique floue dans les dispositifs de formation de la barrière spatiale contre les véhicules aériens sans pilote qui permettent de former en temps réel le diagramme nécessaire de rayonnement sans restrictions strictes sur les paramètres du signal d'entrée dans la direction de l'objet sélectionné; cela permet d'augmenter la vitesse du système, sa variabilité et sa fiabilité dans les situations de freelance ainsi que la résistance aux facteurs de déstabilisation.

Авторы: *Кирюнин Михаил Михайлович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Белюсов Олег Андреевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Тришаков Алексей Александрович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.