

## ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ МАНЕВРИРУЮЩЕЙ ЦЕЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТАМИ УСИЛЕНИЯ $\alpha$ , $\beta$ ФИЛЬТРА

к.т.н. В.Р. Хачатуров, к.т.н. К.М. Руккас, А.В. Просов  
(представил д.т.н., проф. А.В. Кобзев)

*В статье предложен адаптивный алгоритм нечеткого управления коэффициентом усиления  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтра для повышения точности оценивания параметров траектории маневрирующей цели. Показано, что использование предложенного алгоритма по сравнению с двухточечным экстраполятором позволяет повысить точность оценивания параметров траектории слабоманеврирующей цели.*

**Постановка проблемы.** Сопровождение маневрирующих объектов является сложной задачей, так как практический синтез алгоритмов сопровождения маневрирующих целей, как правило, осуществляется в условиях априорной неопределенности о характере маневра. Одним из перспективных направлений преодоления априорной неопределенности о характере маневра, без значительного увеличения вычислительных затрат, является использование нечеткой логики [1 – 4].

**Анализ литературы.** Основанные на нечеткой логике алгоритмы используются для предотвращения расходимости фильтра Калмана и повышения точности оценивания параметров движения маневрирующей цели за счет нечеткого адаптивного совместного управления величинами матриц маневра и шумов измерения [2], нечеткого адаптивного управления величиной только матрицы шумов измерения [3], а также для адаптации алгоритмов многогипотезного движения цели [4]. На практике в РЛС для сопровождения целей широкое применение находят  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтры [5]. Этот алгоритм, являясь одним из самых простых, однако, не обладает высокой точностью при сопровождении маневрирующих целей. В то же время, в известной литературе отсутствуют данные об использовании нечеткого управления коэффициентами усиления  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтра на участке маневра цели.

**Цель статьи** – исследование возможности нечеткого управления коэффициентами усиления невязки  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтра для повышения точности оценивания параметров траектории маневрирующей цели.

**Алгоритм  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтрации параметров траектории цели.** С помощью  $\alpha$ ,  $\beta$  алгоритма может быть создано многомерное устройство сопровождения. Для конкретности рассмотрим одномерный случай, когда проводятся измерения только одной координаты – дальности  $\theta$  с дисперсией ошибок измерения  $\sigma_\theta^2$ . При отсутствии маневра цель движется прямолинейно и равномерно, а при наличии маневра с ускорением. При этом считается, что ошибки первичных измерений дальности имеют гауссово распределение с нулевым средним и некоррелированные в соседних циклах. Проводится фильтрация координаты дальности и скорости ее изменения с использованием  $\alpha$ ,  $\beta$  алгоритма [5]:

$$\hat{\theta}_n = \theta_{n/n-1} + \alpha \left( \theta_n^u - \theta_{n/n-1} \right); \quad (1)$$

$$\hat{\dot{\theta}}_n = \hat{\dot{\theta}}_{n/n-1} + \beta/T_0 \left( \theta_n^u - \theta_{n/n-1} \right);$$

$$\theta_{n/n-1} = \hat{\theta}_{n-1} + \hat{\dot{\theta}}_{n-1} T_0,$$

где  $\theta_n^u$  – результат первичного измерения координаты  $\theta$  на  $n$  шаге;  $\hat{\theta}_n$  и  $\hat{\dot{\theta}}_n$  – оценки координаты и скорости изменения координаты на  $n$  шаге соответственно;  $\theta_{n/n-1}$  – экстраполированное значение координаты на  $n$  шаге по результатам оценивания координаты  $\theta$  на  $n - 1$  шаге;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты усиления невязки;  $T_0$  – период обзора пространства.

Существуют различные способы выбора коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ . Зависимость качества фильтрации от двух коэффициентов усиления можно свести к зависимости только от одного коэффициента усиления  $\alpha$ . Так, из условия минимизации динамической ошибки экстраполяции координаты, обусловленную маневром объекта при заданном ограничении на случайную ошибку фильтрации координаты, определяемую ошибками измерения, получено соотношение [5]:

$$\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha). \quad (2)$$

Одним из возможных способов сопровождения цели на участке маневра является изменение значений коэффициентов усиления невязки в зависимости от интенсивности маневра. Понижение точности при этом повышается устойчивостью сопровождения на участке маневра. В известных алгоритмах используется фиксированный набор значений коэффициентов усиления невязки в зависимости от интенсивности маневра либо отказываются от фильтрации параметров траектории цели и переходят к двухточечному экстраполятору [5] с уравнениями:

$$\hat{\theta}_n = \theta_n^u, \quad \hat{\dot{\theta}}_n = \left( \theta_n^u - \theta_{n-1}^u \right) / T_0; \quad \theta_{n/n-1} = \hat{\theta}_{n-1} + \hat{\dot{\theta}}_{n-1} T_0.$$

Предлагается в алгоритме  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтрации параметров траектории, после обнаружения начала маневра, осуществить управление коэффициентом усиления фильтра  $\alpha$  на основе нечеткой логики.

**Алгоритм нечеткого управления коэффициентом усиления фильтра.** Обработка входной (четкой) информации в алгоритме нечеткого управления может быть описана следующим образом. Текущие значения входных переменных преобразуются в лингвистические (фаззифицируются). На основании полученных лингвистических значений и с использованием базы правил производится нечеткий логический вывод, в результате которого вычисляются лингвистические значения выходных переменных. Заключительным этапом обработки является вычисление нечетких значений управляющих параметров (дефаззификация).

Введем на участке маневра коэффициент усиления невязки  $\alpha_f$

$$\alpha_f = \alpha + (1 - \alpha) \omega, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент усиления невязки при отсутствии маневра;  $\omega$  – параметр управления. Предлагается с помощью алгоритма нечеткого управления в зависимости от степени интенсивности маневра управлять значением параметра  $\omega$  из его области определения, заданной интервалом  $\Omega = [0, 1]$ . При  $\omega = 0$  величина  $\alpha_f = \alpha$ , а при значении  $\omega = 1$  фильтрация параметров траектории цели отсутствует. Предложенный коэффициент усиления невязки  $\alpha_f$  используется в выражениях (1, 2) вместо  $\alpha$  для оценивания параметров траектории цели на участке маневра.

В качестве входных переменных алгоритма нечеткого управления коэффициентом усиления предлагается использовать абсолютные величины нормированной невязки, полученные в соседних циклах оценивания  $v_n$  и  $v_{n-1}$ . На  $n$ -м цикле обновления информации абсолютная величина нормированной невязки  $v_n$  равна

$$v_n = |(\theta_n - \theta_{n/n-1})| / \sigma_{нев}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{нев} = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_{\theta/n-1}^2}$ ,  $\sigma_{\theta/n-1}^2 = \frac{2\alpha^2 + \alpha\beta + 2\beta}{\alpha(4 - 2\alpha - \beta)} \sigma_\theta^2$  – дисперсия ошибок

экстраполяции координаты  $\theta$  [5].

Интенсивность маневра предлагается оценивать в лингвистических переменных ОЧЕНЬ МАЛЫЙ (ОМАЛ), МАЛЫЙ (МАЛ), СРЕДНИЙ (СРЕД), БОЛЬШОЙ (БОЛ). Вид предлагаемых характеристических функций принадлежности  $\mu(v)$  приведен на рис. 1.

Процедура фазификации (приведение к нечеткости) осуществляется в соответствии с выражением

$$v = \max v_{\text{НЧ}} = \max(\mu_1(v) \wedge \mu_2(v) \wedge \dots \wedge \mu_k(v)), \quad \forall v \in A, \quad (5)$$

где  $v_{\text{НЧ}}$  – нечеткое значение невязки,  $k$  – общее число функций принадлежности ( $k = 4$  для рис. 1),  $A = [0, 10]$  – область определения  $v$ .

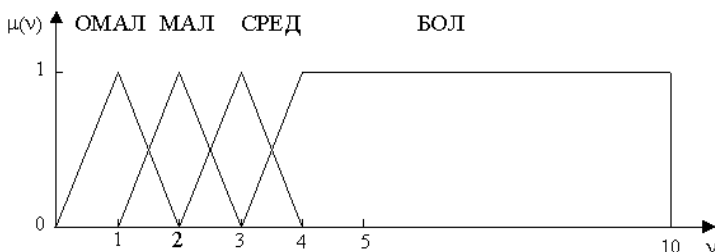


Рис. 1. Функции принадлежности  $\mu(v)$

В качестве выходных значений переменной  $\omega$  предлагается использовать следующие лингвистические переменные ОЧЕНЬ МАЛЫЙ (ОМАЛ), МАЛЫЙ (МАЛ), СРЕДНИЙ (СРЕД), БОЛЬШОЙ (БОЛ). Вид предлагаемых характеристических функций принадлежности  $\mu(\omega)$  приведен на рис. 2.

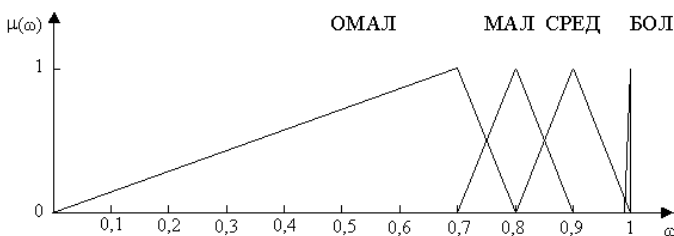


Рис. 2. Функции принадлежности  $\mu(\omega)$

Для осуществления нечеткого вывода были разработаны правила получения лингвистических значений  $\omega$  (или база правил) (см. табл. 1).

На основании полученных лингвистических данных и с использованием базы правил производится нечеткий логический вывод, в результате которого вычисляются лингвистические значения выходной переменной  $\omega$ . Пример получения нечеткого значения  $\omega$  с использованием базы правил табл. 1: **Если** невязка на предыдущем цикле  $v_{n-1}$  МАЛ и на текущем цикле  $v_n$  ОМАЛ, **то** интенсивность маневра  $\omega$  МАЛ.

Правила получения лингвистических значений  $\omega$ 

Невязка на предыдущем шаге $v_{n-1}$	Невязка на текущем шаге $v_n$			
	ОМАЛ	МАЛ	СРЕД	БОЛ
ОМАЛ	ОМАЛ	СРЕД	БОЛ	БОЛ
МАЛ	МАЛ	СРЕД	БОЛ	БОЛ
СРЕД	СРЕД	СРЕД	БОЛ	БОЛ
БОЛ	СРЕД	БОЛ	БОЛ	БОЛ

Для вычисления четких значений управляющего параметра  $\omega$  воспользуемся методом центра тяжести [1]. Соотношение для приведения к четкому значению имеет вид

$$\hat{\omega} = \frac{\int_{\Omega} \omega \mu(\omega) d\omega}{\int_{\Omega} \mu(\omega) d\omega}, \quad (6)$$

где  $\hat{\omega}$  – оценка четкого значения параметра  $\omega$ , полученная путем приведения к четкости методом центра тяжести.

Итак, входными данными алгоритма нечеткого управления являются абсолютные величины нормированной невязки, полученные в соседних циклах оценивания, а результатом работы алгоритма оценка  $\hat{\omega}$ . Последовательность действий алгоритма нечеткого управления сводится к следующему:

- 1) производится получение нечеткого значения интенсивности маневра в соответствии с функциями принадлежности, приведенными на рис. 2;
- 2) на основании базы знаний (табл. 1) осуществляется нечеткий логический вывод, результатом которого есть лингвистическое значение параметра усиления  $\omega$ ;
- 3) вычисляется четкое значение управляющего параметра  $\omega$  в соответствии с выражением (6).

Полученное значение  $\hat{\omega}$  подставляется в выражение (3) для изменения значения коэффициента усиления  $\alpha_f$ .

**Результаты моделирования.** Для иллюстрации работы предложенного нечеткого адаптивного алгоритма рассмотрим результаты моделирования работы двух  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтров на участке маневра. При отсутствии маневра цель движется прямолинейно и равномерно, а при наличии маневра в течении  $T_{\text{ман}} = 10T_0$  с ускорением. Обнаружение начала и оконч-

чания маневра осуществлено сравнением величины нормированной невязки  $v_n$  на  $n$ -м шаге с порогом  $S_0$  при вероятности ложной тревоги  $F=10^{-2}$ . При отсутствии маневра коэффициент усиления обоих фильтров  $\alpha = 0,6$ . Период обновления информации  $T_0 = 5$  с. Цель начала маневра на 10-м шаге. На рис. 3 приведены полученные по 100 статистическим реализациям графики зависимости средних относительных среднеквадратических ошибок (СКО) сглаживания  $\sigma_{\hat{\theta}}/\sigma_{\theta}$  параметра  $\theta$  от числа измерений  $n$  при различных значениях интенсивности маневра  $a = \ddot{\theta}/g$ , где  $\ddot{\theta}$  – ускорение цели,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

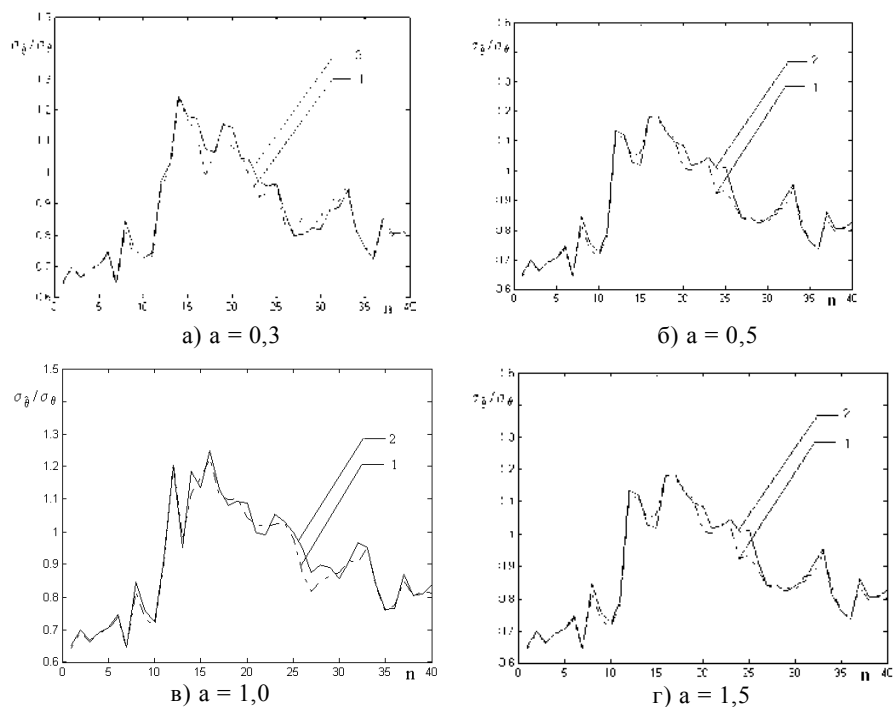


Рис. 3. Относительные среднеквадратические ошибки сглаживания  $\theta$

После обнаружения начала маневра работа первого фильтра осуществляется в соответствии с предложенным алгоритмом нечеткого управления (кривые 1), а второй фильтр реализует алгоритм двухточечного экстраполятора (кривые 2). СКО измерения координаты  $\theta$  составляет  $\sigma_{\theta} = 0,1$  км. Моделирование осуществлялось в системе MATLAB-6.0 с использованием пакета нечеткой логики Fuzzy Logic.

Из анализа кривых рис. 3 следует, что использование предложенного алгоритма адаптивного управления коэффициентом усиления  $\alpha$ ,  $\beta$  фильтра на участке маневра позволяет снизить относительные среднеквадратические ошибки оценивания на 5 – 10 % при интенсивности маневра  $a = 0,3$  по сравнению с двухточечным экстраполятором и обеспечивает практически одинаковые результаты работы при интенсивностях маневра  $a = 0,5 – 1,5$ . Из рис. 3, б – г видно, что применение алгоритма адаптивного нечеткого управления коэффициентом усиления позволяет снизить также среднеквадратические ошибки оценивания координаты  $\theta$  после окончания маневра на 5 – 7 %.

**Выводы.** Таким образом, использование предложенного адаптивного алгоритма нечеткого управления коэффициентом усиления  $\alpha$  позволяет повысить точность оценивания параметров траектории слабоманеврирующей цели ( $a = 0,3$ ) на 5 – 10 % по сравнению с двухточечным экстраполятором и обеспечивает практически одинаковые результаты работы при маневре средней и большой интенсивности ( $a = 0,5 – 1,5$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асаи, Д. Вадама, С. Иваи и др.; Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.*
2. *Sasiadek J.Z., Hartana P. Sensor Data Fusion Using Kalman Filter // Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Information Fusion. – Paris, France. – 2000, July 10 – 13.*
3. *Escamilla-Ambrosio P.J., Mort N., Multisensor Data Fusion Architecture Based on Adaptive Kalman Filters and Fuzzy Logic Performance Assessment // Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Information Fusion. – Annapolis, USA. – 2002, July 8 – 10.*
4. *Ding Z., Leung H., Chan K. Model-Set Adaptation Using a Fuzzy Kalman Filter // Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Information Fusion. – Paris, France. – 2000, July 10 – 13.*
5. *Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КВиЦ, 2000. – 428 с.*

Поступила 22.10.2002

**ХАЧАТУРОВ Валерий Рубенович**, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1975 окончил ВИРТА ПВО им. Говорова. Область научных интересов – радиолокация.

**РУККАС Кирилл Маркович**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры Харьковского военного университета. В 1991 году окончил Пушкинское ВУРЭ. Область научных интересов – искусственный интеллект, компьютерные сети.

**ПРОСОВ Андрей Валериевич**, адъюнкт научного центра при ХВУ. В 1997 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – вторичная обработка информации в радиоэлектронных системах.