

УДК 62-50

UDC 62-50

АДАПТИВНЫЙ ЭКСТРАПОЛЯТОР**ADAPTIVE EXTRAPOLATOR**

*Костоглотов А. А., Лазаренко С. В.,
Кузин А. П., Чурилов С. И.*

Донской государственный технический
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

kostoglotov@me.com

rh3311@mail.ru

alexpavkuzin@gmail.com

thor231@mail.ru

*Kostoglotov A. A., Lazarenko S. V.,
Kuzin A. P., Churilov S. I.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

kostoglotov@me.com

rh3311@mail.ru

alexpavkuzin@gmail.com

thor231@mail.ru

Представлен новый подход к синтезу экстраполяторов для широкого класса объектов, движение которых подчинено вариационному принципу Гамильтона-Остроградского. Разработан шаговый динамический экстраполятор в форме, пригодной для практической реализации в современных системах контроля радиоэлектронной обстановки. Выполнен анализ эффективности функционирования предлагаемого экстраполятора в задачах обработки информации.

The article presents a new approach to the synthesis of extrapolators for a wide class of objects the motion of which is subject to the variational Hamilton-Ostrogradskiy principle. A systematic dynamic extrapolator is developed in a form suitable for practical implementation in modern electronic environment monitoring systems. The efficiency analysis of the proposed extrapolator in information processing problems is carried out.

Ключевые слова: динамическая модель, фильтрация, экстраполятор, навигация, параметры движения, траектория, прогнозирование.

Keywords: dynamic model, filtration, extrapolator, navigation, motion parameters, trajectory, prediction.

Введение. Последние десятилетия характеризуются ростом маневренных возможностей воздушных, морских и наземных целей. Это обусловило увеличение числа публикаций, посвященных способам описания моделей динамики маневрирующих целей, используемых при построении радиотехнических систем [1–10].

Системы навигации, сопровождения, селекции маневрирующих целей функционируют в условиях информационного конфликта, сложной помеховой обстановки, включают в свой состав подсистемы обнаружения сигнала, определения его параметров и решают задачи первичной, вторичной и третичной обработки информации, причем грани между ними постепенно размываются. В таких условиях особую актуальность приобретают проблемы построения математических моделей движения маневрирующих целей как системообразующих элементов проектирования эффективных систем различного назначения. Синтез современных цифровых систем требует построения дискретных моделей экстраполяторов движения.

Актуальность данной проблемы демонстрируют задачи навигации и сопровождения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), задачи разделения цифровых потоков при контроле радиоэлектронной обстановки [11–17].

Основная часть. Системы определения параметров движения имеют обычно калмановскую структуру, состоящую из экстраполятора и взвешенного с учетом ковариационной матрицы ошибок фильтрации дискриминатора [18].

Экстраполятор определяется структурой переходной матрицы, построенной на основе кинематических моделей движения целей, которые структурно отличны от динамических моделей и представляют собой аппроксимации истинного закона движения на ограниченном участке траектории, что служит причиной возникновения динамических ошибок, существенно возрастающих в случае маневра цели.

Доминирующим при выборе используемой кинематической модели является статистический подход, и решение принимается на заданном классе моделей-претендентов с различными параметрами. Развитие этого подхода нашло отражение в решении проблемы сопровождения маневрирующих целей, что привело к возникновению многомодельных алгоритмов фильтрации. Однако эти алгоритмы не получили широкой практической реализации в силу сложности процедуры выбора модели.

В настоящее время отсутствуют конструктивные подходы и методы регулярного оперативного синтеза динамических моделей движения, пригодные для практического применения. Вместе с тем, как отмечают специалисты, для обеспечения гарантированно устойчивого высокоточного сопровождения современных ЛА необходимы новые модели, структурно подобные динамическим моделям. Эти модели определяют в дискретном времени новый класс экстраполяторов, которые в сравнении с кинематическими моделями обладают свойством структурной адаптации к истинной траектории движения.

Ниже представлен новый подход к синтезу экстраполяторов для широкого класса объектов, движение которых подчинено вариационному принципу Гамильтона-Остроградского [19]. Использование предлагаемого подхода позволяет получить решение в замкнутой форме и синтезировать эффективные фильтры сопровождения на основе нового класса экстраполяторов. Полученные фильтры сопровождения превосходят фильтры класса α - β , не уступают фильтрам Калмана по точностным характеристикам и, что исключительно важно для практического применения, обладают небольшой вычислительной сложностью.

Таким образом, цель работы — повышение точности сопровождения динамических объектов в условиях их маневров и возмущений измерительного процесса при низком уровне вычислительных затрат.

Динамическая модель движения

Согласно фундаментальным положениям механики математическая модель движения маневрирующей цели является следствием принципа Гамильтона-Остроградского [19]

$$\delta'R = \int_{t_0}^{t_1} (\delta T + \delta'A) dt = 0, \quad (1)$$

где δ — вариация кинетической энергии $\delta'A$ — элементарная работа, интеграл действия

$$R = \int_{t_0}^{t_1} (T + A) dt, \quad (2)$$

кинетическая энергия

$$T = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{k=1}^n a_{sk} \dot{q}_s \dot{q}_k, \quad (3)$$

работа неизвестных обобщенных сил $Q_s(q, \dot{q}, u)$, определяется выражением

$$A = \int_{q_s(t_0)}^{q_s(t_1)} \sum_{s=1}^n \left(U_s - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial \Pi}{\partial q_s} \right) dq_s = \int_{q_s(t_0)}^{q_s(t_1)} \sum_{s=1}^n Q_s(q, \dot{q}, u) dq_s \quad (4)$$

где q — вектор координат цели, u — вектор управлений, $t \in [t_0, t_1]$ a_{sk} — элементы матрицы квадратичной формы кинетической энергии, $\frac{\partial \Pi}{\partial q_s}$ — потенциальные обобщенные силы, U_s — управляющие обобщенные силы, $\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_s}$ — диссипативные обобщенные силы, n — число степеней свободы.

В силу справедливости (1) уравнения движения цели могут быть представлены в форме уравнений Лагранжа второго рода [19, 20]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s, q(t_0) = q_0, \dot{q}(t_0) = \dot{q}_0, s = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где вектор обобщенных сил выбирается из множества допустимых значений

$$Q \in \overline{G}_Q. \quad (6)$$

Уравнение наблюдения имеет вид

$$y_s(t) = q_s(t) + \xi_s(t), \quad (7)$$

где ξ_s — случайные воздействия на канал наблюдения с известной интенсивностью.

В пространстве наблюдений выбран целевой функционал

$$J_1 = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \sum_{s=1}^n R_{\xi_{ss}}^{-1} [y_s(t) - \hat{q}_s(t)]^2 dt, \quad (8)$$

где $R_{\xi_{ss}}$ — элементы диагональной весовой матрицы, характеризующей интенсивность помех в канале наблюдений; знак \wedge означает оценку.

Задача синтеза модели движения маневрирующей цели рассматривается как оптимизационная задача в квазидетерминированной постановке: найти траекторию $\hat{q}(t) \in R^n$ и вектор обобщенных сил Q как функцию обобщенных координат, обеспечивающие минимум (8) при ограничениях (5) и (6).

Процедура поиска минимума (8) при ограничениях (5) и (6) с учетом интеграла действия (2) требует применения метода неопределенных множителей Лагранжа

$$J = J_1 + \int_{t_0}^{t_1} \lambda [T + A] dt, \quad (9)$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа,

J_1 — целевой функционал (8).

Решение поставленной задачи с использованием для синтезирующей функции

$$\mu_s = -\lambda \left| \frac{\dot{\hat{q}}_s}{L \hat{q}_s} \right|, \quad (10)$$

где L — константа кривой переключения, имеет вид

$$\ddot{\hat{q}}_s(t) = \frac{|Q_s|}{\lambda a_{ss}} \left[\lambda \frac{|\dot{\hat{q}}_s(t)| \dot{\hat{q}}_s(t)}{L_s |\hat{q}_s(t)|} + R_{\xi_{ss}}^{-1} (y_s(t) - \hat{q}_s(t)) \right], q_s(t_0) = q_{0s}, \dot{q}_s(t_0) = \dot{q}_{0s}, s = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Применение конечномерной аппроксимации позволяет получить для экстраполятора следующее выражение:

$$\hat{q}_s(k+1) = 2\hat{q}_s(k) - \hat{q}_s(k-1) + \frac{|\hat{q}_s(k) - \hat{q}_s(k-1)|(\hat{q}_s(k) - \hat{q}_s(k-1))}{a_{ss}L\hat{q}_s(k)} + \frac{\Delta t^2}{a_{ss}R_{\xi_{ss}}}(y_s(k) - \hat{q}_s(k)), \quad (12)$$

где k — момент времени, Δt — интервал дискретизации.

Применение экстраполятора в задачах навигации и сопровождения БПЛА.

Задачи сопровождения и навигации БПЛА близки по своей сути и связаны с использованием алгоритмов фильтрации измерительной информации, которые содержат в своем составе экстраполяторы движения. Эффективность применения разработанного экстраполятора можно оценить по результатам статистического моделирования процесса сопровождения маневрирующей цели, двигающейся по различным траекториям в плоскости с изменяющимся ускорением.

Исходные данные для статистического моделирования представлены в таблице 1, где α_{q_1} и α_{q_2} — величины, обратные постоянным времени маневра по соответствующим координатам, D_{q_1} и D_{q_2} — дисперсии ускорений цели по соответствующим координатам, σ_{q_1} и σ_{q_2} — среднеквадратические отклонения (СКО) измерений по наблюдаемым координатам.

Таблица 1

Исходные данные для статистического моделирования

		Траектория 1	Траектория 2	Траектория 3	Траектория 4
Начальные значения	$q_1(0)$, м	$3 \cdot 10^5$	$3,041 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
	$\dot{q}_1(0)$, м/с	2,4	-320	192,8	192,8
	$\ddot{q}_1(0)$, м/с ²	0	0	0,6	0,6
	$q_2(0)$, м	$3,4 \cdot 10^{-5}$	0,165	0,644	0,644
	$\dot{q}_2(0)$, м/с	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,01
	$\ddot{q}_2(0)$, м/с ²	0	0	$-0,7 \cdot 10^{-3}$	$-0,7 \cdot 10^{-3}$
Параметры модели Зингера	α_{q_1} , с ⁻¹	0,1	0,1	0,1	0,1
	D_{q_1} , м ² /с ⁴	$2,4 \cdot 10^3$	$2,16 \cdot 10^3$	440	210
	α_{q_2} , с ⁻¹	0,1	0,1	0,1	0,1
	D_{q_2} , м ² /с ⁴	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$0,16 \cdot 10^{-6}$
σ_{q_1} , м		$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	100	100
σ_{q_2} , рад		$4,4 \cdot 10^{-3}$	$17 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Интервал дискретизации, с		5	5	1	1
Количество экспериментов при статистическом моделировании		100	100	100	100

На рисунках 1–4 приведены моделируемые траектории.

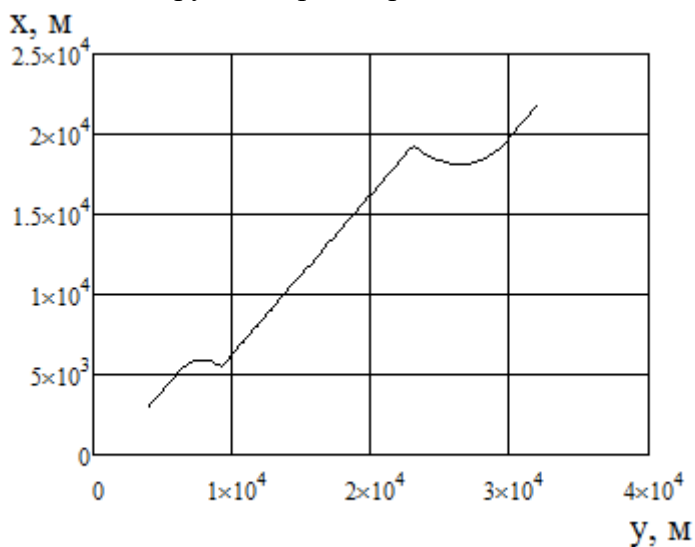


Рис. 1. Траектория 1

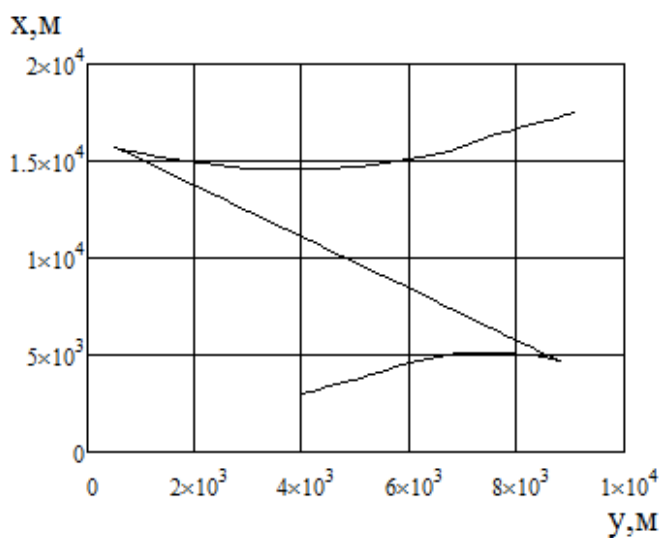


Рис. 2. Траектория 2

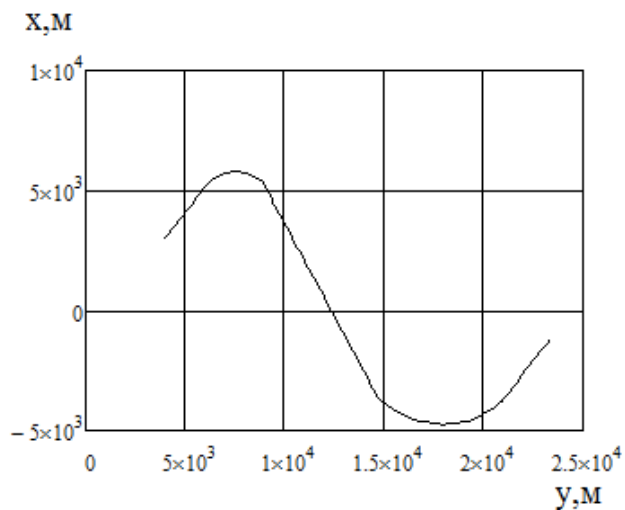


Рис. 3. Траектория 3

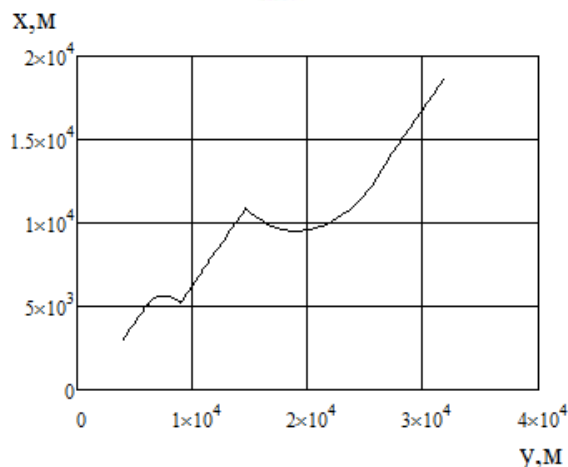


Рис. 4. Траектория 4

В таблицу 2 сведены результаты статистического моделирования для всех траекторий, где $\sigma_{\hat{q}_1}$ и $\sigma_{\hat{q}_2}$ — СКО оценок наблюдаемых координат, а $\sigma_{\hat{q}_1}/\sigma_{q_1}$ и $\sigma_{\hat{q}_2}/\sigma_{q_2}$ — отношения, характеризующие изменение качества сопровождения цели при использовании фильтра по сравнению с прямым использованием необработанных данных измерения.

Таблица 2

Результаты статистического моделирования

		Траектория 1	Траектория 2	Траектория 3	Траектория 4
$\frac{\sigma_{\hat{q}_1}}{\sigma_{q_1}}$	ФК	1,2	1,15	4,16	4,82
	ФК с моделью Зингера	0,8	0,75	0,77	0,77
	разработанный фильтр	0,75	0,7	0,76	0,76
Выигрыш в точности оценки \hat{q}_1 разработанного фильтра, %	в сравнении с ФК	36,8	39,4	81,6	84,3
	в сравнении с ФК с моделью Зингера	5,9	6,6	0,7	1,9
$\frac{\sigma_{\hat{q}_2}}{\sigma_{q_2}}$	ФК	1,43	1,12	3	2,1
	ФК с моделью Зингера	0,86	0,76	0,9	0,762
	разработанный фильтр	0,75	0,7	0,8	0,76
Выигрыш в точности оценки \hat{q}_2 разработанного фильтра, %	в сравнении с ФК	47,4	37,5	73,1	63,9
	в сравнении с ФК с моделью Зингера	11,7	8,3	3,4	0,4

Анализ применения программы построения адаптивного алгоритма ОПМ для рекуррентной оценки координат МЦ представлен на рис. 5, что подтверждает известные результаты.

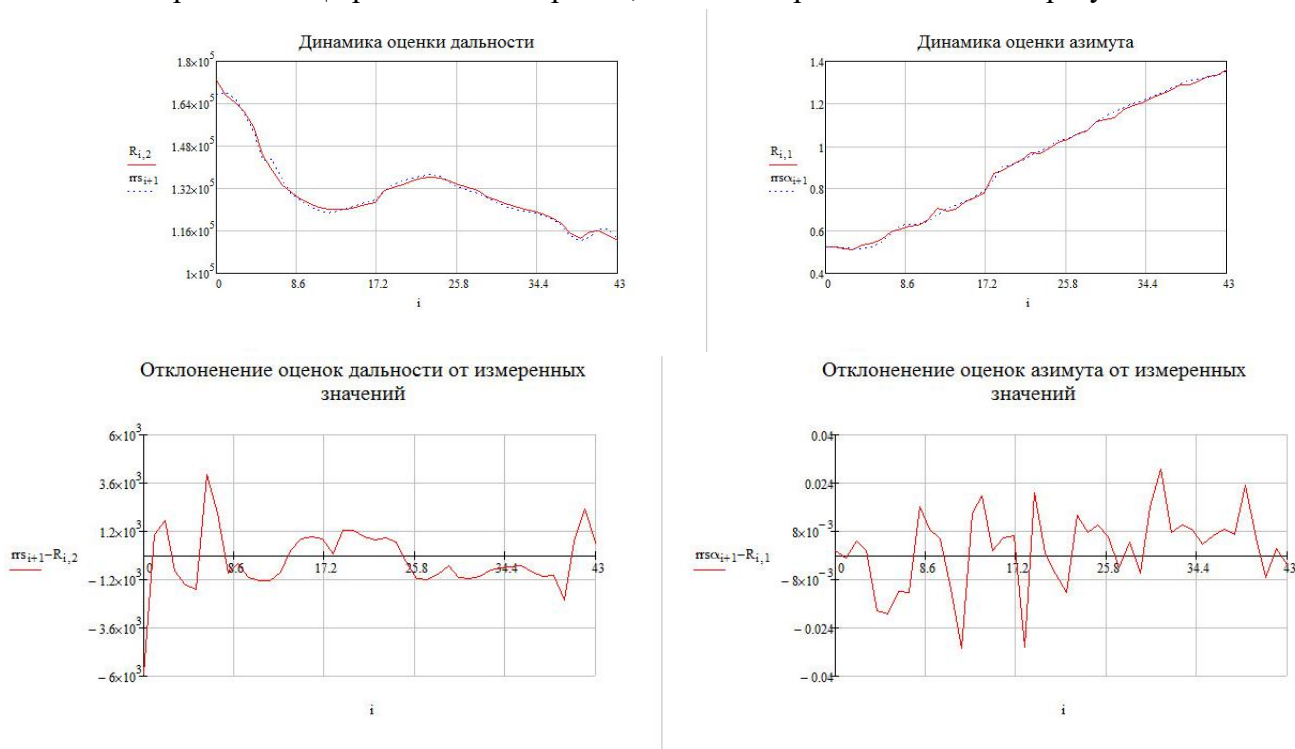


Рис. 5. Анализ результатов

Подсчет элементарных операций показывает, что для реализации фильтра Калмана с моделью Зингера необходимо совершить 215 элементарных операций, а для разработанного фильтра 73 элементарных операции. Под элементарными операциями понимаются операции сложения, вычитания, умножения, деления.

Результаты моделирования показывают, что на участке маневрирования разработанный фильтр реагирует быстрее на маневр цели и превосходит по точности фильтры Калмана и Зингера, что объясняется использованием нового экстраполятора с эффектом структурной адаптации. При этом практическая реализация разработанного фильтра потребует вычислительных затрат объемом, в 2,9 раза меньшим в сравнении с ФК с моделью Зингера.

Применение экстраполятора в задачах о разделении цифровых потоков при контроле радиоэлектронной обстановки.

Задача контроля радиоэлектронной обстановки требует разделения цифровых потоков принимаемых сигналов, когда в пределах видимости возможны наблюдения от десятков до сотен объектов, при этом источники излучения характеризуются близкими частотными и временными параметрами и эффективными для их разделения являются пространственные признаки с учетом движения объектов локации. Необходимость учета признаков движения остро проявляется при разделении сигналов от групповых высокоманевренных целей, когда ошибки измерений радиоканала становятся сравнимыми с динамическими ошибками за счет движения объектов.

Актуальность задачи связана с тем, что в существующих средствах радиоконтроля для разделения сигналов используются антенные системы с узкими диаграммами направленности,

обеспечивающими релейское разрешение по пространству в совокупности со статистической обработкой потоков импульсов. Недостатками таких средств являются низкое разрешение по пространству групповых целей, малое число статистически разделяемых импульсных потоков и низкое быстродействие, связанное с необходимостью медленного сканирования по пространству.

Одним из вариантов решения задачи разделения цифровых потоков является использование пространственного признака (пеленга) в качестве параметра разрешения сигналов. Практическая реализация процесса разделения цифровых потоков может быть основана на методах кластерного анализа. Особенность задачи кластеризации в данном случае обусловлена двумя обстоятельствами. Первое из них обусловлено тем, что разработку алгоритма кластеризации необходимо проводить по специальному критерию, который определяется статистикой набега фазы импульса сигнала, отличной от гауссовой, и метрикой амплитудно-фазовых распределений формируемых фронтами излучений множества источников импульсных сигналов. Второе обстоятельство связано с тем, что среди множества объектов существуют и достаточно динамичные объекты, движущиеся со скоростью 20–0 узлов. Это может внести существенные динамические ошибки при определении пеленгов. К примеру, при скорости ~ 40 узлов динамическая ошибка определения пространственной координаты за несколько периодов обзора $T = 25$ с достигает 500 м, а на расстоянии до цели 10 км — $\sim 2,5^\circ$ по азимуту. Это говорит о том, что в некоторых случаях динамические ошибки пеленга становятся сравнимыми со случайными ошибками, что при последующем использовании методов сверхразрешения с прореживанием данных может привести к существенным ошибкам и появлению ложных максимумов.

При наличии движения объекта излучения задача кластеризации может иметь существенно различные решения. Поэтому определение оценки смещения центра кластера является важной задачей при осуществлении процесса кластеризации. Традиционные решения базируются на алгоритмах скользящего среднего и обладают невысокой эффективностью. Сложность реализации такого рода алгоритмов состоит в отсутствии модели движения центра кластера, что приводит к различным эвристическим вариантам, когда принимается некоторая гипотеза о характере динамики, которая в действительности часто не подтверждается.

Результаты математического моделирования приведены на рис. 6, где представлены — дрейф пеленга, наблюдаемая реализация, оценка смещения пеленга на основе скользящего среднего, оценка смещения пеленга в соответствии с алгоритмом (12).

Результаты моделирования показывают, что алгоритм (12) оценки смещения пеленга обеспечивает снижение ошибки определения центра кластера до 35 % в сравнении с оценками скользящего среднего, что демонстрирует преимущества их применения.

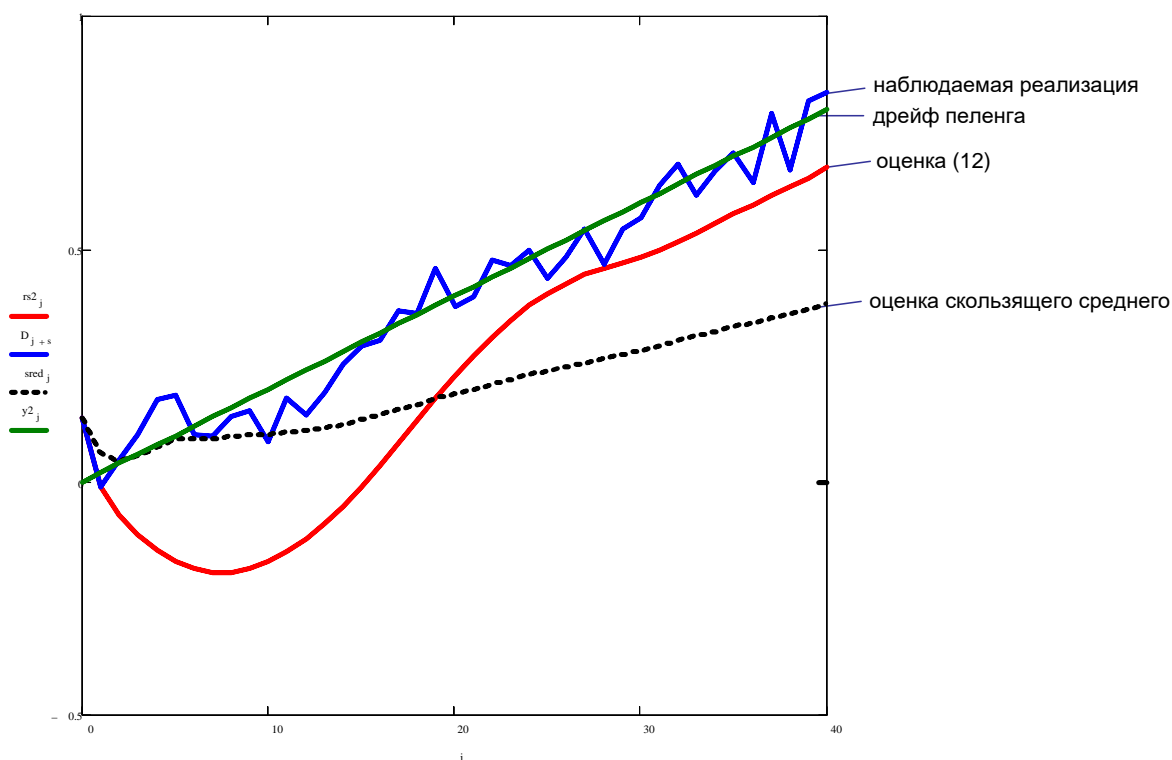


Рис. 6. Результаты математического моделирования

Варианты решения задач кластеризации могут быть реализованы по конечной выборке и по выборке нарастающего объема. Алгоритмы кластеризации по конечной выборке связаны с формированием матрицы близости (отличия) и, в конечном счете, сводятся к построению эффективного либо в вычислительном плане, либо по минимуму времени окончания вычислительных процедур. Недостатки таких алгоритмов связаны с существенным увеличением затрат при нарастании выборки и возможной потерей работоспособности при изменении положений центров кластеров во времени. Алгоритмы кластеризации по выборке нарастающего объема связаны с построением вычислительных процедур, основанных на построении динамических фильтров с максимальной степенью упрощения, однако позволяют ввести в процесс кластеризации признак движения и, таким образом, разделить кластеры, элементы которых не удастся разделить только по пространственному признаку.

Таким образом, реализацию алгоритмов кластеризации необходимо проводить в два этапа. На первом этапе — по конечной выборке с формированием матрицы близости на основе скользящего среднего с целью предварительного расчета центров кластеров и формирования элементов кластера. На втором этапе процедуру оценки центра кластера рекомендуется осуществлять в соответствии с алгоритмом (12).

Заключение. Разработанный подход к синтезу экстраполяторов учитывает динамический характер модели для широкого класса объектов, движение которых подчинено вариационному принципу Гамильтона-Остроградского. Данный шаговый динамический экстраполятор позволяет использовать его для решения задач контроля радиоэлектронной обстановки, обработки информации средств наблюдения, сопровождения и навигации беспилотных летательных аппаратов, декомпозиции цифровых потоков.

Анализ эффективности функционирования разработанного экстраполятора показывает, что в условиях маневров динамических объектов и возмущений измерительного процесса он обеспечивает повышение на 5–10% точности определения параметров движения объектов при решении задач навигации и сопровождения при низком уровне вычислительных затрат (примерно 30% базового).

Библиографический список

1. Rong LI, X. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models / X. Rong LI, P. Vesselin, Jilkov // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. — 2003. Vol. 39, No. 4. October. — P. 1333–1364.
2. Кузьмин, С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. — Москва : Радио и связь, 1986. — 352 с.
3. Бочкарев, А. М. Цифровая обработка радиолокационной информации при сопровождении целей / А. М. Бочкарев, А. Н. Юрьев, М. Н. Долгов // Зарубежная радиоэлектроника. — 1991. — № 3. — С. 3–22.
4. Blackman, S. S. Design and Analysis of Modern Tracking Systems / S. S. Blackman, R. F. Popoli // Boston. MA : Artech House. — 1999. — 1229 p.
5. Bar-Shalom, Y., Li X. R. and Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation // Theory, Algorithms, and Software. New York : Wiley. 2001. — 558 p.
6. Фарина, А. Цифровая обработка радиолокационной информации / А. Фарина, Ф. Студер. — Москва : Радио и связь, 1993. — 320 с.
7. Верба, В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения: принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография. / В. С. Верба. — Москва : Радиотехника, 2014. — 528 с.
8. Magill, D. T. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Processes / D. T. Magill // IEEE Trans, on Automatic Control. — 1965. Vol. AC-10. October. P. 434 — 439.
9. Blom, H. A. P. Combining IMM and JPDA for tracking multiple maneuvering targets in clutter. / H. A. P. Blom, E. A. Bloem // Proc. 5th Int. Conf. on Information Fusion. Annapolis — USA. 2002. — P. 705–712.
10. Прангишвили, И. В. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным технологиям / И. В. Прангишвили [и др.]. — Москва : Проблемы управления, 2004. — № 4. — С. 2–6.
11. Костоглотов, А. А. Синтез модели процесса с нестационарными возмущениями на основе максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоглотов [и др.]. // Математическое моделирование. — 2016. — Т. 28, № 12. — С. 133–142.
12. Костоглотов, А. А. Структурный синтез дискретных адаптивных следящих систем на основе объединенного принципа максимума // А. А. Костоглотов [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 1 (88). — С. 105–112.
13. Костоглотов, А. А. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов [и др.] // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. — 2010. — № 3. — С. 9–14.
14. Костоглотов, А. А. Синтез оптимального регулятора на основе использования физических принципов / А. А. Костоглотов // Нелинейный мир. — 2012. — № 11. — С. 819–827.
15. Костоглотов, А. А. Метод оценки параметров движения управляемого летательного аппарата на основе объединенного принципа максимума с построением опорной траектории / А. А.

Костоготов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. — 2012. — № 6. — С. 61–66.

16. Костоготов, А. А. Сравнительная оценка характеристик фильтра объединенного принципа максимума и вариантов реализации фильтра Калмана при сопровождении маневрирующей цели / А. А. Костоготов, А. А. Кузнецов, А. А. Мурашов // Радиотехника. — 2014. — № 8. — С. 45–49.

17. Костоготов, А. А. Синтез адаптивных систем сопровождения на основе гипотезы о стационарности гамильтониана гиперповерхности переключения / А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко // Радиотехника и электроника. — 2017. — Т. 62, № 2. — С. 121–125.

18. Singer, R. A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets / R. A. Singer // IEEE Trans. — 1970. July. AES-6, № 4. — P. 473–483.

19. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. — Москва: Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1961. — 824 с.