

СИНТЕЗ ФИЛЬТРА СОПРОВОЖДЕНИЯ СО СТРУКТУРНОЙ АДАПТАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ПРИНЦИПА МАКСИМУМА

А. А. Костоготов^а, доктор техн. наук, профессор

А. А. Кузнецов^б, канд. техн. наук, доцент

С. В. Лазаренко^а, канд. техн. наук

В. А. Лосев^а, аспирант

^аДонской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, РФ

^бВоенно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, РФ

Постановка проблемы: рост маневренных возможностей аэродинамических целей обусловил увеличение неопределенности их движения из-за недостаточной эффективности используемых кинематических моделей при решении задач текущей оценки параметров движения. Это определяет актуальность разработки динамических моделей маневрирующих целей при построении адаптивных фильтров сопровождения. **Цель исследования:** синтез фильтра сопровождения с разработанной по методологии объединенного принципа максимума динамической моделью движения. **Результаты:** разработан фильтр сопровождения маневрирующих объектов, отличающийся от известных новой нелинейной структурой модели движения, полученной как решение в текущем времени обратной задачи динамики на основе методологии объединенного принципа максимума. Использование новой модели обеспечивает повышение потенциальных точностных характеристик сопровождения, что подтверждается результатами математического моделирования. Повышение качества сопровождения связано с изменением структуры традиционной модели, положенной в основу фильтра сопровождения, что позволяет говорить об эффекте структурной адаптации разработанного фильтра. **Практическая значимость:** разработанный фильтр за счет эффекта структурной адаптации обеспечивает в сравнении с традиционными фильтрами выигрыш в эффективности сопровождения маневрирующей цели по критерию максимум точности — минимум вычислительных затрат.

Ключевые слова — модель движения маневрирующей цели, принцип Гамильтона — Остроградского, объединенный принцип максимума, инвариантное погружение, фильтр Калмана.

Введение

Маневренные возможности аэродинамических целей постоянно наращиваются [1]. Это определило актуальность работ, направленных на разрешение неопределенности движения маневрирующих целей, которая обусловлена отсутствием точной модели динамики цели. За последние четыре десятилетия были разработаны способы описания моделей динамики маневрирующих целей, используемых при построении адаптивных фильтров сопровождения (ФС) [2–9]. Лучшей является та модель, которая наиболее адекватна характеру движения цели и достаточно проста для реализации в реальных системах сопровождения [3, 9].

Чаще всего для построения адаптивных ФС используются кинематические модели движения [2, 3, 5], описываемые полиномом, коэффициенты которого — параметры траектории цели [7]. В кинематических моделях движения (КМД) учитывается движение центра масс цели без выявления причин [2, 4, 5], что определило их относительную простоту и привело к широкому распространению. Однако аппроксимация истинного закона движения на ограниченном участке траектории является причиной возникновения динамических ошибок, существенно возрастающих в случае маневра цели [7, 10, 11].

Наличие априорной неопределенности параметров КМД маневрирующей цели предопределило возникновение многомодельного (многогипотезного) подхода [4, 12], его реализацию в виде IMM-алгоритма [13] и его вариаций. В результате многомодельные алгоритмы сопровождения получаются высокоразмерными, для их реализации требуются существенные вычислительные затраты. Это ограничивает их применение в сложной помеховой обстановке в реальном масштабе времени [3]. Таким образом, необходимость повышения эффективности КМД приводит к их усложнению и трудности практической реализации.

Более адекватными и интуитивно привлекательными перед КМД являются динамические модели движения (ДМД), в которых используются сведения об инерции движущегося объекта и силах, воздействующих на него [2]. Нелинейность ДМД послужила причиной их ограниченного применения. Зачастую к ним прибегали для описания движения баллистических целей [2].

Одним из способов получения ДМД является решение задачи сопровождения как обратной задачи динамики. Для решения такого рода задач с использованием вариационного принципа Гамильтона — Остроградского и принципа максимума Понтрягина разработан подход, названный авторами объединенным принципом макси-

му (ОПМ) [14–18]. Работа посвящена развитию подхода к синтезу структурно адаптивных ФС с использованием ДМД, разработанных на основе методологии ОПМ.

Цель работы — построение модели движения маневрирующего объекта на основе ОПМ и синтез непрерывного ФС.

Постановка задачи синтеза ДМД маневрирующей цели как обратной задачи динамики

Согласно положениям аналитической механики, математическая модель движения маневрирующей цели является следствием принципа Гамильтона — Остроградского [19]

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

$$t \in [t_0, t_1],$$

в котором:

— интеграл действия

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

— кинетическая энергия

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

где a_{sk} — элементы матрицы квадратичной формы кинетической энергии; n — число степеней свободы;

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

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

$$= \int_{q_s(t_0)}^{q_s(t_1)} \sum_{s=1}^n Q_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{u}) dq_s, \quad (4)$$

где U_s — управляющие обобщенные силы; $\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_s}$ —

диссипативные обобщенные силы; $\frac{\partial \Pi}{\partial q_s}$ — потен-

циальные обобщенные силы; \mathbf{q} — вектор координат цели; \mathbf{u} — вектор управлений.

Тогда уравнения движения летательного аппарата могут быть представлены в форме уравнений Лагранжа второго рода [19]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s,$$

$$\mathbf{q}(t_0) = \mathbf{q}_0, \quad \dot{\mathbf{q}}(t_0) = \dot{\mathbf{q}}_0, \quad s = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где вектор обобщенных сил выбирается из множества допустимых значений:

$$\mathbf{Q} \in \overline{G_Q}. \quad (6)$$

Уравнение наблюдения имеет вид

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(\mathbf{q}, t) + \xi(t), \quad (7)$$

где $\mathbf{H} \in R^n$ — известная вектор-функция; $\xi \in R^n$ — вектор случайных воздействий на канал наблюдения с известной интенсивностью.

В пространстве наблюдений выбран целевой функционал [6]

$$J_1 = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{q}}, t)]^T \mathbf{R}_\xi^{-1} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{q}}, t)] dt, \quad (8)$$

где $\mathbf{R}_\xi \in R^{n \times n}$ — диагональная весовая матрица с элементами главной диагонали $R_{\xi_{ss}}$, характеризующими интенсивность помех в канале наблюдений; знак $\hat{}$ означает оценку.

Задача синтеза ДМД маневрирующей цели рассматривается как *обратная задача динамики*: требуется найти вектор обобщенных сил \mathbf{Q} как функцию обобщенных координат, а также соответствующую ему траекторию $\hat{\mathbf{q}}(t) \in R^n$, обеспечивающие минимум целевого функционала (8) при ограничениях (5) и (6).

Синтез ДМД с использованием методологии объединенного принципа максимума

Процедуру поиска минимума функционала (8) необходимо проводить с учетом ограничения в форме дифференциальных уравнений (5), которые следуют из принципа Гамильтона — Остроградского. Тогда применение метода неопределенных множителей Лагранжа в совокупности с ограничением в форме интеграла действия (2) требует отыскания условий минимума расширенного целевого функционала

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

где λ — неопределенный множитель Лагранжа.

Решение такой задачи получено на основе *теоремы объединенного принципа максимума* [14–17]: для того чтобы обобщенная сила \mathbf{Q} и соответствующая ей траектория фазового пространства $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ доставляли минимум расширенному функционалу (9) при ограничениях (5), (6), необходимо и достаточно выполнение условия максимума для функции обобщенной мощности Φ переменных $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{2n}$

$$\Phi(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \max_{\mathbf{Q} \in G_Q} \sum_{s=1}^n \left[\begin{array}{c} \lambda Q_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \\ - R_{\xi_{ss}}^{-1} \frac{\partial H_s}{\partial \dot{q}_s} [y_s(t) - H_s(\hat{\mathbf{q}}, t)] \end{array} \right] \dot{q}_s,$$

$$\lambda = \text{const}. \quad (10)$$

Обобщенная сила, доставляющая минимум целевому функционалу, определяется выражением

$$Q_s = \lambda^{-1} \left[\begin{array}{c} \mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{q}_s + \\ + R_{\xi_{ss}}^{-1} \frac{\partial H_s}{\partial \dot{q}_s} [y_s(t) - H_s(\hat{\mathbf{q}}, t)] \end{array} \right], \quad (11)$$

откуда структура уравнений модели динамики цели определяется выражением

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = \\ & = \lambda^{-1} \left[\mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{q}_s + R_{\xi_{ss}}^{-1} \frac{\partial H_s}{\partial \dot{q}_s} [y_s(t) - H_s(\hat{\mathbf{q}}, t)] \right], \\ & \mathbf{q}(t_0) = \mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}(t_0) = \dot{\mathbf{q}}_0, \quad s = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (12)$$

Использование синтезирующей функции вида

$$\mu_s = -\lambda \left| \frac{\dot{q}_s}{L_s \hat{q}_s} \right|, \quad (13)$$

где L — константа кривой переключения управления [14, 16, 18], позволяет привести выражение (12) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_s &= \frac{1}{\lambda a_{ss}} \left[-\lambda \left| \frac{\dot{q}_s}{L_s \hat{q}_s} \right| \dot{q}_s + R_{\xi_{ss}}^{-1} \frac{\partial H_s}{\partial \dot{q}_s} [y_s(t) - H_s(\hat{\mathbf{q}}, t)] \right], \\ & s = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение (14) представляет собой построенную по оперативным данным структуру универсальной модели с адаптацией к маневру цели, которая может быть записана в следующем виде

$$\begin{aligned} \hat{\ddot{q}}_s &= \frac{1}{\lambda a_{ss}} \left[-\lambda \left| \frac{\hat{q}_s}{L_s \hat{q}_s} \right| \hat{q}_s + R_{\xi_{ss}}^{-1} \frac{\partial H_s}{\partial \dot{q}_s} [y_s(t) - H_s(\hat{\mathbf{q}}, t)] \right] = \\ & = \frac{1}{a_{ss}} \left[-\left| \frac{\hat{q}_s}{L_s \hat{q}_s} \right| \hat{q}_s \right] + \frac{1}{\lambda a_{ss}} \left(R_{\xi_{ss}}^{-1} \frac{\partial H_s}{\partial \dot{q}_s} [y_s(t) - H_s(\hat{\mathbf{q}}, t)] \right) = \\ & = F(\hat{q}_s, \dot{\hat{q}}_s) + \eta_s, \end{aligned} \quad (15)$$

где $F(\hat{q}_s, \dot{\hat{q}}_s) = \frac{1}{a_{ss}} \left[-\left| \frac{\hat{q}_s}{L_s \hat{q}_s} \right| \hat{q}_s \right]$; η_s — центрированный относительно оценки \hat{q}_s случайный процесс.

Синтез ФС методом инвариантного погружения

Вывод уравнений фильтра представлен для случая наблюдения одной координаты. В векторной форме уравнения состояния (15) и наблюдения (7) имеют вид

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) + \mathbf{G}\eta(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0, \quad (16)$$

где $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $x_1 = q$, $x_2 = \dot{q}$; $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -b \frac{x_2 |x_2}{|x_1|} \end{bmatrix} = \mathbf{f}(x_1, x_2)$ — функция, непрерыв-

ная вместе с производными на множествах $\{x_1 > 0, x_2 > 0\}$, $\{x_1 > 0, x_2 < 0\}$, $\{x_1 > 0, x_2 = 0\}$;

введено обозначение $b = \frac{1}{aL}$; $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & a\lambda R_{\xi 1} \end{bmatrix}$;

$\eta(t) = \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \end{bmatrix}$ — случайный процесс с матрицей интенсивностей $\mathbf{R}_\eta = \begin{bmatrix} R_{\eta 1} & 0 \\ 0 & R_{\eta 2} \end{bmatrix}$;

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(\mathbf{x}(t), t) + \xi(t), \quad (17)$$

где $\mathbf{H}(\mathbf{x}(t), t)$ — известная вектор-функция;

$\xi(t) = \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{bmatrix}$ — вектор белого гауссова шума с известными локальными характеристиками:

$$\mathbf{M}[\xi(t)] = 0, \quad \mathbf{M}[\xi(t)\xi^T(t+\tau)] = \frac{1}{2} \mathbf{R}_\xi \delta(\tau), \quad (18)$$

где $\delta(t)$ — векторная дельта-функция;

$\mathbf{R}_\xi = \begin{bmatrix} R_{\xi 1} & 0 \\ 0 & R_{\xi 2} \end{bmatrix}$ — матрица интенсивностей шумов измерений.

Критерий оценки имеет вид

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_0^t [\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t), t)]^T \mathbf{R}_\xi^{-1} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t), t)] dt + \\ & + \frac{1}{2} \int_0^t \eta^T(t) \mathbf{R}_\eta^{-1} \eta(t) dt. \end{aligned} \quad (19)$$

Синтез ФС — задача оценки $\hat{\mathbf{x}}(s)$ процесса (16), (17), когда момент времени s , в который желательно получить оценку, соответствует точке t интервала наблюдения $[0, t]$ и t увеличивается. Необходимо получить $\hat{\mathbf{x}}$ как функцию от t , доставляющую минимум критерию (19).

Оценка $\hat{\mathbf{x}}(t)$, соответствующая минимуму функционала (19), удовлетворяет двухточечной краевой задаче [20]

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(s) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(s), s) - \mathbf{G}\mathbf{R}_\eta^{-1} \mathbf{G}^T \eta(s); \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \eta(s) &= \frac{\partial \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}(s), s)}{\partial \hat{\mathbf{x}}(s)} \mathbf{R}_\xi^{-1} [\mathbf{y}(s) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(s), s)] - \\ & - \frac{\partial \mathbf{f}^T(\hat{\mathbf{x}}(s), s)}{\partial \hat{\mathbf{x}}(s)} \eta(s) \end{aligned} \quad (21)$$

при граничных условиях [20, 21]

$$\eta(t) = 0, \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = \mathbf{x}^0 + \mathbf{P}^0 \eta(0), \quad (22)$$

где \mathbf{P}^0 — заданная матрица; \mathbf{x}^0 — начальное значение оценки.

Требуется найти $\hat{\mathbf{x}}$ как функцию t при увеличении интервала наблюдения. Подобного рода задачи с успехом решаются разработанным Р. Беллманом методом инвариантного погружения [20, 21].

Применение метода инвариантного погружения к рассмотренной двухточечной краевой задаче позволяет получить уравнения ФС

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), t) + \mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}(t), t)}{\partial \hat{\mathbf{x}}(t)} \mathbf{R}_\xi^{-1} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t), t)]; \\ \dot{\mathbf{P}} &= \mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{f}^T(\hat{\mathbf{x}}(t), t)}{\partial \hat{\mathbf{x}}(t)} + \frac{\partial \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), t)}{\partial \hat{\mathbf{x}}(t)} \mathbf{P} + \mathbf{G} \mathbf{R}_\eta \mathbf{G}^T - \\ &- \mathbf{P} \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{x}}(t)} \left[\frac{\partial \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}(t), t)}{\partial \hat{\mathbf{x}}(t)} \mathbf{R}_\xi^{-1} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t), t)] \right] \mathbf{P}, \\ \mathbf{P}(0) &= \mathbf{P}^0, \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = \mathbf{x}^0, \end{aligned} \quad (23)$$

отличающегося новой структурой функции, определяющей динамику цели:

$$\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), t) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -b|\hat{x}_2|\hat{x}_2 \\ |\hat{x}_1| \end{bmatrix}, \quad (24)$$

полученной по методологии ОПМ.

Анализ функционирования ФС

Методом статистического моделирования выполнен анализ качества функционирования разработанного фильтра при сопровождении маневрирующей цели. Рассмотрены три различные траектории. Наблюдается наклонная дальность $q_1(t)$ и азимут $q_2(t)$.

По точности оценок разработанный ФС сравнивался с классическим фильтром Калмана (ФК) [6] и фильтром Калмана с моделью Зингера (ФКЗ) [9]. За показатель точности выбрана средняя квадратическая ошибка (СКО) оценки координаты цели.

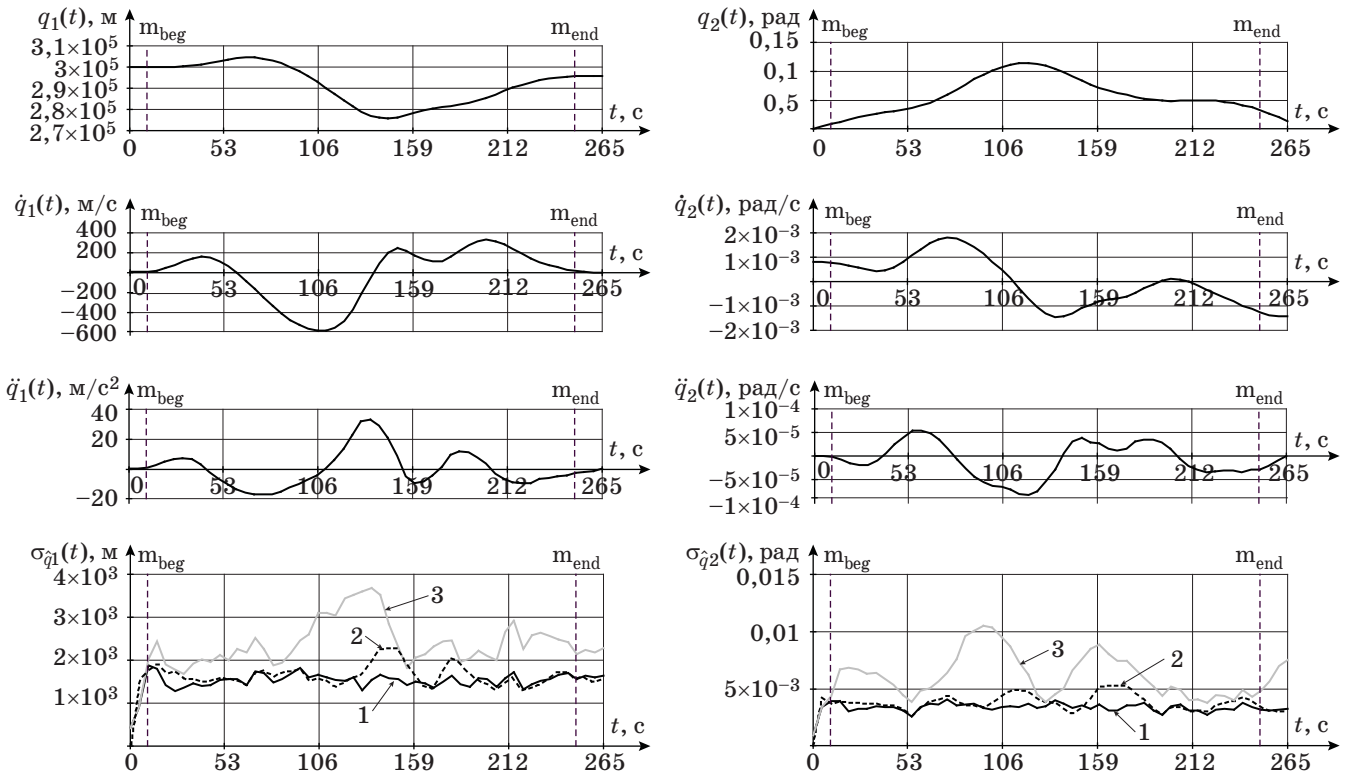
Исходные данные для статистического моделирования представлены в табл. 1, где α_{q_1} и α_{q_2} — обратные постоянные времени маневра по соответствующим координатам; D_{q_1} и D_{q_2} — дисперсии ускорений цели по соответствующим координатам; σ_{q_1} и σ_{q_2} — СКО измерений по наблюдаемым координатам.

Графики изменения координат $q_1(t)$, $q_2(t)$, скоростей $\dot{q}_1(t)$, $\dot{q}_2(t)$, ускорений $\ddot{q}_1(t)$, $\ddot{q}_2(t)$ и ошибок оценки координат цели $\sigma_{\hat{q}_1}(t)$, $\sigma_{\hat{q}_2}(t)$ сравниваемых фильтров представлены на рис. 1–3. Здесь цифрами обозначены: 1 — СКО оценки координат цели, полученные на основе (23); 2 — СКО оценки координат цели ФКЗ; 3 — СКО оценки координат цели ФК; время начала маневрирования $t = m_{\text{beg}}$, окончания $t = m_{\text{end}}$.

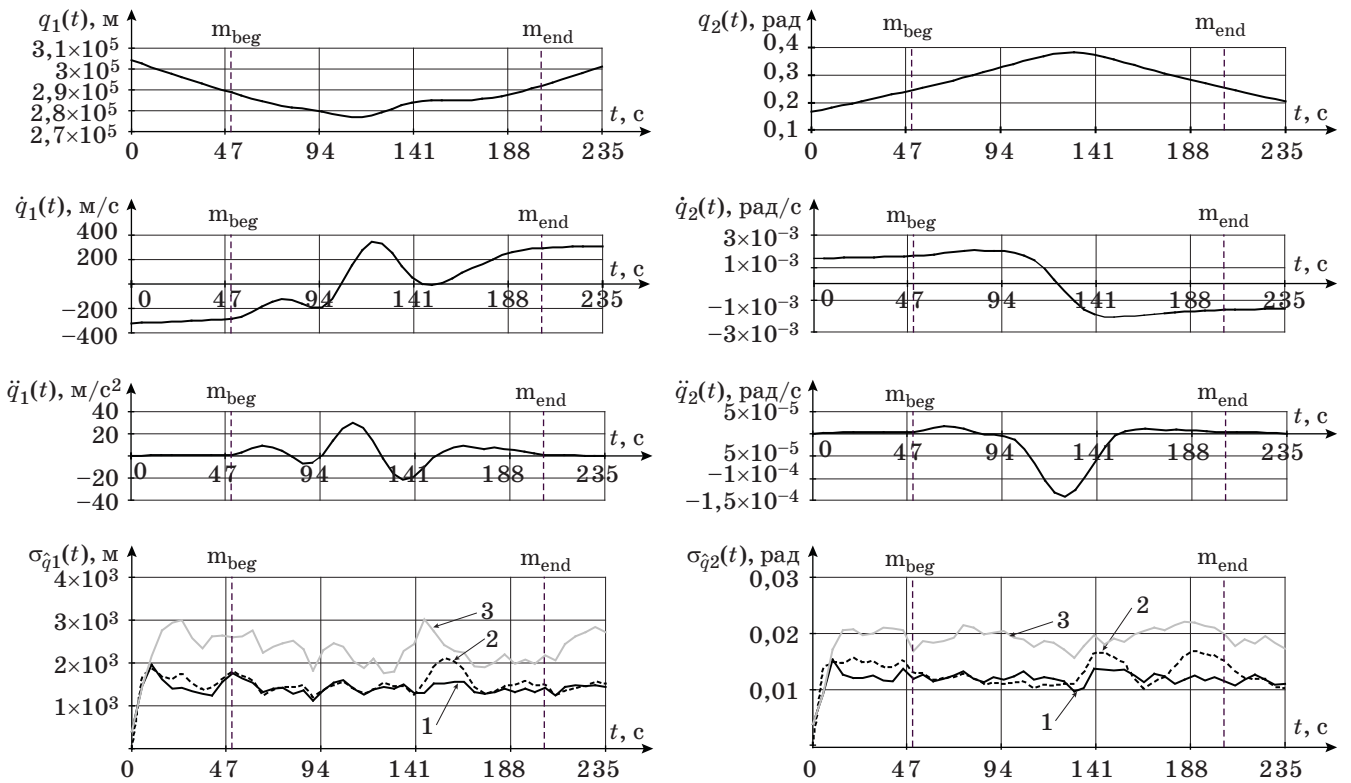
Качественный анализ представленных результатов показывает, что при равномерном дви-

■ Таблица 1. Исходные данные для статистического моделирования

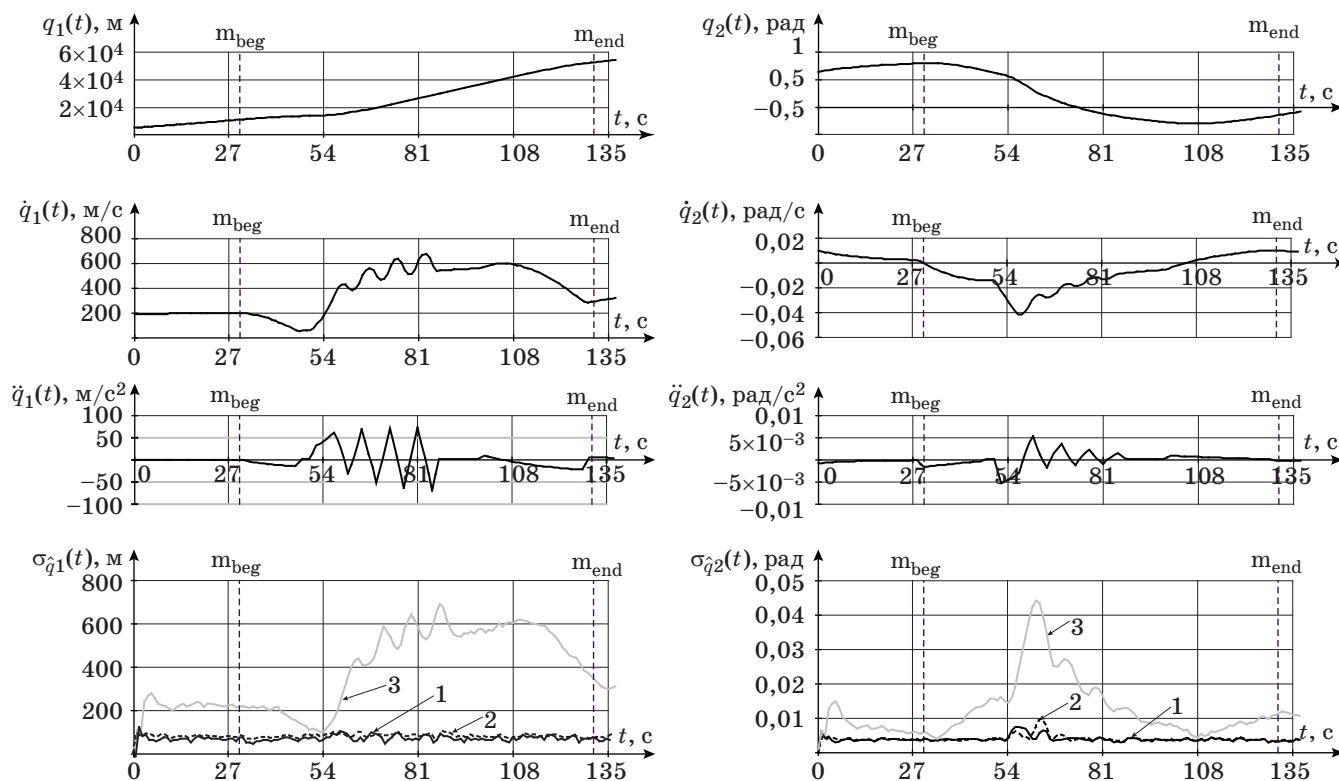
Исходные данные и параметры моделирования		Траектория		
		1	2	3
Начальные значения	$q_1(0)$, м	3×10^5	$3,041 \times 10^5$	5×10^3
	$\dot{q}_1(0)$, м/с	2,4	-320	192,8
	$\ddot{q}_1(0)$, м/с ²	0	0	0,6
	$q_2(0)$, м	$3,4 \times 10^{-5}$	0,165	0,644
	$\dot{q}_2(0)$, м/с	$7,9 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-3}$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



■ Рис. 1. Траектория 1



■ Рис. 2. Траектория 2



■ Рис. 3. Траектория 3

жении цели разработанный фильтр и ФКЗ обеспечивают сопровождение практически с равной точностью. Однако на участке маневрирования разработанный фильтр во всех рассмотренных вариантах реагирует быстрее на маневр цели и превосходит по точности ФКЗ. Этот результат обусловлен использованием в разработанном фильтре динамической модели (15), которая обладает в сравнении с ФКЗ большей чувствительностью к маневру за счет эффекта структурной адаптации. Следует отметить, что разработанный фильтр существенно превосходит по точности классический ФК.

Для количественной оценки преимуществ разработанного фильтра за счет эффекта структурной адаптации в табл. 2 представлены сводные результаты статистического моделирования, где $\frac{\sigma_{\hat{q}_1}}{\sigma_{q_1}}$ и $\frac{\sigma_{\hat{q}_2}}{\sigma_{q_2}}$ — отношения, характеризующие изменение качества сопровождения цели при использовании фильтра в сравнении с прямым использованием необработанных данных измерения.

Установлено, что для реализации ФК требуется 52 элементарные операции сложения, вычитания, умножения, деления, для ФКЗ — 214, и ФС — 73. Таким образом, для реализации ФС

■ Таблица 2. Результаты статистического моделирования

Показатели качества сопровождения		Траектория		
		1	2	3
$\frac{\sigma_{\hat{q}_1}}{\sigma_{q_1}}$	ФК	1,2	1,15	4,16
	ФКЗ	0,8	0,75	0,77
	ФС	0,75	0,7	0,76
Выигрыш в точности оценки \hat{q}_1 ФС, %	В сравнении с ФК	36,8	39,4	81,6
	В сравнении с ФКЗ	5,9	6,6	0,7
$\frac{\sigma_{\hat{q}_2}}{\sigma_{q_2}}$	ФК	1,43	1,12	3
	ФКЗ	0,86	0,76	0,9
	ФС	0,75	0,7	0,8
Выигрыш в точности оценки \hat{q}_2 ФС, %	В сравнении с ФК	47,4	37,5	73,1
	В сравнении с ФКЗ	11,7	8,3	3,4

вычислительных затрат потребуется в 2,9 раза меньше, чем для реализации ФКЗ.

В ходе моделирования произведена оценка чувствительности фильтров (ФКЗ и ФС) к изменению параметров (D_q и b). Установлено, что изменение на 50 % значений указанных параметров фильтров приводит в среднем к увеличению отношения $\frac{\sigma_{\hat{q}}}{\sigma_q}$ для традиционного на 8,5 % и предлагаемого решения на 23,5 %, что можно расценивать как плату за повышение качества сопровождения.

Заключение

В работе представлен ФС, разработанный на основе методологии ОПМ с использованием процедуры инвариантного погружения. Представлены

результаты исследования характеристик разработанного фильтра: анализ точности функционирования фильтра при сопровождении маневрирующей цели, двигающейся по различным траекториям; анализ чувствительности к изменению параметров; оценка вычислительных затрат, необходимых для реализации фильтра.

Анализ результатов статистического моделирования позволяет утверждать, что за счет использования предлагаемой ДМД возникает эффект структурной адаптации, который обеспечивает в сравнении с традиционными фильтрами повышение точности сопровождения маневрирующей цели при меньших вычислительных затратах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-08-03798 а, 15-38-20835 мол_а_вед.

Литература

1. Ашурбейли И. Р., Лаговиер А. И. Основные направления развития средств воздушно-космической обороны Российской Федерации // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 12. С. 46–54.
2. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39. N 4. P. 1333–1364. doi:10.1109/TAES.2003.1261132
3. Бочкарев А. М., Юрьев А. Н., Долгов М. Н., Щербинин А. В. Цифровая обработка радиолокационной информации при сопровождении целей // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 3. С. 3–22.
4. Blackman S. S., Popoli R. F. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. — MA: Artech House, 1999. — 1229 p.
5. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. — N. Y.: John Wiley & Sons, 2001. — 558 p.
6. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
7. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. — М.: Радио и связь, 1986. — 352 с.
8. Елисеев А. В., Музыченко Н. Ю. Метод адаптивной настройки фильтра Калмана в задаче слежения за динамическим объектом с неизвестным ускорением // Радиотехника. 2014. № 8. С. 39–44.
9. Singer R. A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1970. AES-6. N 4. P. 473–483.
10. Nabaа N., Bishop R. H. Validation and Comparison of Coordinated Turn Aircraft Maneuver Models // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2000. N 1. P. 250–259.
11. Лобейко В. И. Современные подходы к организации испытаний сложных систем. — Астрахань: Астраханский университет, 2006. — 332 с.
12. Magill D. T. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Processes // IEEE Transactions on Automatic Control. 1965. Vol. AC-10. P. 434–439.
13. Blom H. A. P., Bloem E. A. Combining IMM and JPDA for Tracking Multiple Maneuvering Targets in Clutter // Proc. 5th Intern. Conf. on Information Fusion, July 8–11, 2002. Vol. 1. P. 705–712.
14. Костоглотов А. А., Костоглотов А. И., Чеботарев А. В. Метод объединенного принципа максимума в параметрических задачах оптимального управления // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4(47). С. 15–21.
15. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов, А. А. Кузнецов, Д. С. Андрашитов, И. В. Дерябкин, С. В. Лазаренко // Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2010. № 3. С. 9–14.
16. Костоглотов А. А., Костоглотов А. И., Лазаренко С. В., Ценных Б. М. Метод оценки параметров движения управляемого летательного аппарата на основе объединенного принципа максимума с построением опорной траектории // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 61–66.
17. Костоглотов А. А., Костоглотов А. И., Кузнецов А. А., Лазаренко С. В. Синтез оптимального регулятора на основе использования физических принципов // Нелинейный мир. 2012. № 11. С. 819–827.
18. Костоглотов А. А., Кузнецов А. А., Мурашов А. А. Сравнительная оценка характеристик фильтра объединенного принципа максимума и вариантов реализации фильтра Калмана при сопровождении маневрирующей цели // Радиотехника. 2014. № 8. С. 45–49.

19. Маркеев А. П. Теоретическая механика. — М.: Наука, 1990. — 416 с.
 20. Седж Э. П., Мелса Д. Л. Идентификация систем управления. — М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. — 248 с.

21. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 2. Теория нелинейной модуляции. — М.: Сов. радио, 1975. — 344 с.

UDC 62-50

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.4.2

Synthesis of Filter Support with Structural Adaptation Based on Combined Maximum Principle

Kostoglotov A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, kostglotov@me.com

Kuznetsov A. A.^b, PhD, Tech., Associate Professor, smithaa@yandex.ru

Lazarenko S. V.^a, PhD, Tech., rh3311@mail.ru

Losev V. A.^a, Post-Graduate Student, aibolit_773@mail.ru

^aDon State Technical University, 1, Gagarin Sq., 344010, Rostov-on-Don, Russian Federation

^bProfessor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Military Air Academy, 54A, Staryh Bolshevikov St., 394064, Voronezh, Russian Federation

Purpose: The growing maneuverability of aerodynamic targets makes their movement less determinate, especially when the kinematic models used to estimate their parameters are not efficient enough. When building an adaptive filter support, it is particularly important to develop dynamic models of maneuvering targets. The purpose of this research is synthesizing a filter support with a dynamic model of motion, developed according to the combined maximum principle. **Results:** A filter support is developed for maneuvering objects, which differs from the known ones by its new non-linear structure of the motion model. It was obtained as a current-time solution of the inverse dynamics problem based on Combined Maximum Principle. The new model provides better potential accuracy characteristics of the tracking, as evidenced by mathematical modeling. Improving the quality of the tracking is associated with changes in the traditional model structure which forms the basis of the filter support, so the designed filter has the effect of structural adaptation. **Practical relevance:** Due to the structural adaptation effect, the developed filter, as compared to the traditional filters, provides a gain in the efficiency of maneuvering target tracking by the criterion of maximum accuracy and minimum computational cost.

Keywords — Maneuvering Target Motion Model, Hamilton–Ostrogradsky Principle, Combined Maximum Principle, Invariant Embedding, Kalman Filter.

References

- Ashurbeili I. R., Lagovier A. I. The Basic Trends of Development of Russian Air-Cosmic Defence. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2009, no. 12, pp. 46–54 (In Russian).
- Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I. Dynamic Models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364. doi:10.1109/TAES.2003.1261132
- Bochkarev A. M., Iur'ev A. N., Dolgov M. N., Shcherbinin A. V. Digital Processing of Radar Data When Tracking Purposes. *Zarubezhnaia radioelektronika*, 1991, no. 3, pp. 3–22 (In Russian).
- Blackman S. S., Popoli R. F. *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*. Artech House, MA, 1999. 1229 p.
- Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. New York, John Wiley & Sons, 2001. 558 p.
- Farina A., Studer F. A. *Radar Data Processing. Vol. 1. Introduction and Tracking*. New York, Research Studies Press John Wiley & Sons, 1985. 320 p.
- Kuz'min S. Z. *Osnovy proektirovaniia sistem tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii* [Principles of Design of Systems Digital Processing of Radar Data]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1986. 352 p. (In Russian).
- Eliseev A. V., Musyuchenko N. Yu. Method of Adaptive Kalman Filter Settings in the Task of Tracking for a Dynamic Object with Unknown Acceleration. *Radiotekhnika*, 2014, no. 8, pp. 39–44 (In Russian).
- Singer R. A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1970, AES-6, no. 4, pp. 473–483.
- Nabaa N., Bishop R. H. Validation and Comparison of Coordinated Turn Aircraft Maneuver Models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, no. 1, pp. 250–259.
- Lobeiko V. I. *Sovremennye podkhody k organizatsii ispytaniy slozhnykh sistem* [Modern Approaches to Testing of Complex Systems]. Astrakhan', Astrakhanskii universitet Publ., 2006. 332 p. (In Russian).
- Magill D. T. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Processes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, vol. AC-10, pp. 434–439.
- Blom H. A. P., Bloem E. A. Combining IMM and JPDA for Tracking Multiple Maneuvering Targets in Clutter. *Proc. 5th Int. Conf. on Information Fusion*, July 8–11, 2002, vol. 1, pp. 705–712.
- Kostoglotov A. A., Kostoglotov A. I., Chebotaryov A. V. A Method of Unified Maximum Principle in the Parametric Problem of Optimal Control. *Informatsionno-upravliaushchie systemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 4(47), pp. 15–21 (In Russian).
- Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Andrashitov D. S., Derjabkin I. V., Lazarenko S. V. Synthesis Algorithm Autonomous Control Pendulum on the Basis of the Incorporated Principle of the Maximum. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 3, pp. 9–14 (In Russian).
- Kostoglotov A. A., Kostoglotov A. I., Lazarenko S. V., Tsenin B. M. Method of an Estimation of Parameters of Movement of the Operated Flying Machine on the Basis of an Combined-Maximum Principle with Construction of a Basic Trajectory. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2012, no. 6, pp. 61–66 (In Russian).
- Kostoglotov A. A., Kostoglotov A. I., Kuznetsov A. A., Lazarenko S. V. Synthesis of Optimal Control Based on the Use of Physical Principles. *Nelineinyi mir*, 2012, no. 11, pp. 819–827 (In Russian).
- Kostoglotov A. A., Kuznetsov A. A., Murashov A. A. Comparative Evaluation of the Characteristics of the Filter of the Principle of Maximum and Options for Implementing a Kalman Filter in Support of Objectives Including. *Radiotekhnika*, 2014, no. 8, pp. 45–49 (In Russian).
- Markeev A. P. *Teoreticheskaiia mekhanika* [Theoretical Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 416 p. (In Russian).
- Sage A. P., Melsa J. L. *System Identification*. New York and London, Academic Press, 1971. 221 p.
- Van Trees H. L. *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part II. Nonlinear Modulation Theory*. New York, John Wiley & Sons, 1971. 368 p.