

В. Т. ФИСЕНКО, Л. Д. ВИЛЕСОВ, В. И. МОЖЕЙКО, Т. Ю. ФИСЕНКО

ОБНАРУЖЕНИЕ МАНЕВРА ОБЪЕКТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЕГО ТРАЕКТОРИИ В ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ

Рассматриваются методы измерения координат объекта телевизионной следящей системой. Фильтрация ошибок измерения осуществляется с помощью адаптивного фильтра Калмана. Адаптация связана с возможностью маневра объекта в случайный момент времени и возможным последующим его пропаданием и появлением, например, из-за облачного покрова. Маневр объекта обнаруживается по оценкам скорости на выходе фильтра Калмана, адаптация осуществляется путем изменения коэффициентов фильтрации, а исчезновение объекта переводит фильтр в режим прогноза траектории. Синтезированы алгоритмы обнаружения маневра и пропадания цели, оценены динамические и флуктуационные ошибки прогноза траектории, вызванные выходом объекта из зоны затенения.

Ключевые слова: сопровождение при пропадании объекта, адаптивный фильтр Калмана.

При создании телевизионных систем наблюдения актуальной задачей является измерение координат объекта. Измерения всегда сопровождаются ошибками, поэтому оценки координат объекта на выходе телевизионного измерителя поступают на вход фильтра, который осуществляет их фильтрацию. В случае использования фильтра Калмана на его выходе выдается информация о сглаженных координатах цели, их прогнозе на следующий кадр наблю-

дения, а также в зависимости от порядка фильтра — скорость или скорость и ускорение объекта. Теория фильтра Калмана описана в многочисленной литературе, см., например, [1, 2].

Сопровождаемый объект может исчезать из области наблюдения, например, за счет облачного покрова. Но система сопровождения должна продолжать свою работу, прогнозируя траекторию объекта по последним полученным данным об измеренных параметрах движения объекта до момента его появления. Параметры движения объекта могут изменяться (объект совершает маневр), и необходимо за короткое время принять решение о наличии маневра, а фильтр Калмана должен адаптироваться к этим изменениям. Под маневром объекта будем понимать изменение его скорости в случайный момент времени. Маневр необходимо своевременно обнаружить для того, чтобы перестроить фильтр Калмана в соответствии с изменившимися параметрами движения цели.

Известно, что фильтр Калмана определяется рекурсивной процедурой [1, 2]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_{k+1}(\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_k), \quad (1)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ — оцениваемый вектор состояния для k -го кадра, размерность вектора определяется порядком фильтра; \mathbf{K}_{k+1} — вектор коэффициентов фильтра; \mathbf{F} — матрица прогноза; \mathbf{Z}_{k+1} — входные данные от измерителя координат, например, для фильтра третьего порядка

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{v} \\ \hat{a} \end{bmatrix}_{k+1}, \quad \mathbf{K}_{k+1} = \begin{bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{bmatrix}_{k+1}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

\hat{x} , \hat{v} , \hat{a} — соответственно оценки координаты, скорости и ускорения объекта.

Задача прогноза движения объекта решается также с помощью фильтра Калмана. При этом на его вход вместо координат с выхода телевизионного измерителя поступает информация о прогнозируемых координатах (работа фильтра с нулевыми коэффициентами). Прогноз на один кадр наблюдения определяется рекурсивной процедурой

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_k.$$

Ошибка прогноза определяется ошибкой измерения компонентов вектора состояния на последний кадр наблюдения объекта. Для фильтра третьего порядка вектор ошибок, прогнозируемый на последующий кадр, равен

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xk} \\ \varepsilon_{vk} \\ \varepsilon_{ak} \end{bmatrix},$$

где ε_{xk} , ε_{vk} , ε_{ak} — соответственно ошибки измерения координаты, приращения координаты (скорости) и приращения скорости (ускорения) для k -го кадра изображения. Операция выполняется рекурсивно до появления пропавшего объекта.

Наличие маневра объекта (цели) приводит к динамическим ошибкам фильтрации, которые существенно влияют на прогноз траектории в случае, если до окончания отработки фильтром динамической ошибки происходит пропадание объекта. Кроме того, существенное влияние на результат прогноза оказывают и флуктуационные ошибки измерения координат телевизионной следящей системой.

Способ решения задачи обнаружения маневра существенно зависит от системы координат, в которой наблюдается движение объекта. Например, если объект движется с постоянной скоростью в декартовой системе координат, то при переходе к сферической системе координат в результате нелинейных преобразований проявляется нелинейность траектории цели как функции времени. Но если угол зрения телевизионного измерителя по азимуту и углу места ограничен областью $\pm 20^\circ$, то с приемлемой для прогноза точностью линейность траектории в

сферической системе сохраняется, так же как и в декартовой системе координат. Поэтому далее маневрирование объекта будем наблюдать в сферической системе координат, т.е. на выходе телевизионного измерителя.

Структурная схема телевизионной следящей системы с адаптивным фильтром Калмана представлена на рис. 1. Координаты объекта через коммутатор поступают на вход фильтра Калмана второго порядка, который работает с малой полосой пропускания для обеспечения заданного диапазона флуктуационной ошибки. При наличии маневра объекта фильтр Калмана переводится в режим третьего порядка, одновременно увеличиваются его коэффициенты, происходит расширение полосы пропускания для скорейшей компенсации динамической ошибки измерения. Поскольку значения коэффициентов матрицы \mathbf{K} зависят от порядка фильтра и номера кадра, то они могут быть вычислены заранее и храниться в памяти вычислителя. Затем после отработки динамической ошибки коэффициенты фильтра плавно уменьшаются до уровня, обеспечивающего заданную флуктуационную ошибку. В случае пропадания объекта на вход фильтра Калмана вместо координат поступают прогнозируемые координаты с выхода фильтра Калмана, что эквивалентно работе фильтра с нулевыми коэффициентами. При этом фильтр Калмана рекурсивно с частотой кадров воспроизводит траекторию объекта.

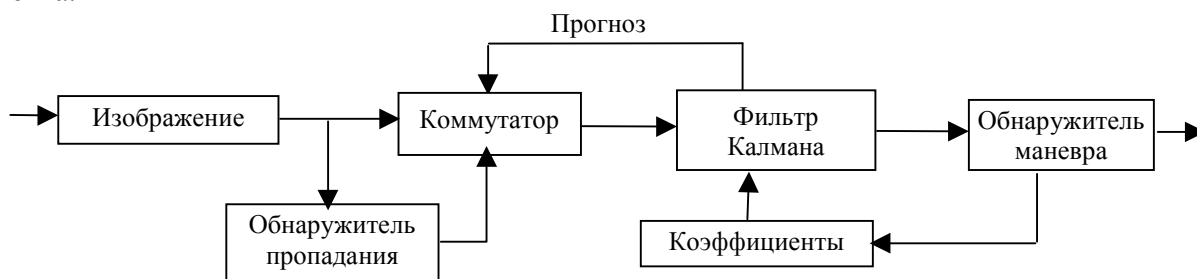


Рис. 1

Фильтр Калмана содержит два канала измерения (фильтрации) координат объекта. Маневр цели может быть обнаружен в одном из каналов или в двух каналах одновременно, поэтому обнаружение маневра необходимо выполнять в каждом из каналов и результаты принятия решения использовать для соответствующего канала.

Ниже задача обнаружения маневра решается для одного из каналов. Пусть на интервале времени длительностью $2T$ наблюдаются отсчеты скорости объекта на выходе фильтра Калмана, следующие с частотой повторения кадров изображения. Весь интервал $2T$ состоит из двух подынтервалов T_1 и T_2 , каждый из которых имеет длительность T .

С учетом ошибок измерения скорость на выходе фильтра Калмана представим в виде векторов—строк \mathbf{v}_1 и \mathbf{v}_2 , состоящих из n компонентов (выборочных данных), соответственно на интервалах T_1 и T_2 :

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \bar{\mathbf{v}}_1 + \mathbf{w}_1, \quad \mathbf{v}_2 = \bar{\mathbf{v}}_2 + \mathbf{w}_2, \\ \mathbf{v}_1 &= [v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}], \quad \mathbf{v}_2 = [v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n}], \\ \bar{\mathbf{v}}_1 &= [\bar{v}_{11}, \bar{v}_{12}, \dots, \bar{v}_{1n}], \quad \bar{\mathbf{v}}_2 = [\bar{v}_{21}, \bar{v}_{22}, \dots, \bar{v}_{2n}], \\ \mathbf{w}_1 &= [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n}], \quad \mathbf{w}_2 = [w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n}], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{v}}_1$ и $\bar{\mathbf{v}}_2$ — истинные (равные математическому ожиданию возможной траектории движения), но неизвестные векторы скорости, также состоящие из n компонентов каждый, \mathbf{w}_1 и \mathbf{w}_2 — соответствующие векторы ошибок измерения скорости на выходе фильтра Калмана для интервалов времени T_1 и T_2 .

Рассмотрим пары отсчетов скорости на выходе фильтра Калмана на интервалах T_1 и T_2 . Всего число таких пар n . Очевидно, что пары v_{1k} и v_{2k} ($k=1, \dots, n$) статистически независимы,

так как независимы приращения координат объекта $x_{1(k+1)} - x_{1k} = v_{1(k+1)}$ и $x_{2(k+1)} - x_{2k} = v_{2(k+1)}$ на входе фильтра Калмана. Независимость отсчетов скорости внутри интервалов T_1 и T_2 строго соблюдается через один отсчет и более, так как скорость есть приращение координаты, а приращения $x_{1(k+1)} - x_{1k} = v_{1(k+1)}$ и $x_{1k} - x_{1(k-1)} = v_{1k}$ ($k=1, \dots, n$) статистически зависимы через общий отсчет координаты x_{1k} . Но эта зависимость несущественна: коэффициент корреляции не более 0,5, и совместное распределение пар скоростей представим как произведение распределений отдельных пар. Для гауссовой аппроксимации распределения пар отсчетов скорости можно представить совместную плотность распределения вероятности (функцию правдоподобия) в виде

$$p(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 / \bar{\mathbf{v}}_1, \bar{\mathbf{v}}_2) = \prod_{k=1}^n p(v_{1k} / \bar{v}_{1k}) p(x_{2k} / \bar{v}_{2k}) = \\ = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \sigma)^{2n}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (v_{1k} - \bar{v}_{1k})^2 + (v_{2k} - \bar{v}_{2k})^2 \right\}, \quad (4)$$

где σ — среднее квадратическое значение ошибки (СКО) измерения скорости на выходе фильтра Калмана — известно и для всех отсчетов принято одинаковым. Компоненты — средние значения \bar{v}_{1k} и \bar{v}_{2k} , $k=1, \dots, n$ — неизвестны.

Обозначим вектор параметров $\Theta = (\bar{\mathbf{v}}_1, \bar{\mathbf{v}}_2)$, который принадлежит пространству (области) $\Omega = R_{2n}$ (евклидово пространство $2n$ измерений), и вектор входных данных $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$, который принадлежит выборочному пространству также $2n$ измерений.

Задача обнаружения маневра объекта сводится к наблюдению за его скоростью на выходе фильтра Калмана на интервалах времени T_1, T_2 и принятию решения о наличии маневра, если скорости на указанных интервалах различаются. Сформулируем задачу обнаружения как проверку гипотез H_N (маневра нет) и H_M (имеет место маневр) относительно векторов скорости на интервалах времени T_1 и T_2 :

$$H_N: \Theta \in \{ \bar{\mathbf{v}}_1 = \bar{\mathbf{v}}_2 \} = \Omega_N; \quad H_M: \Theta \in \{ \bar{\mathbf{v}}_1 \neq \bar{\mathbf{v}}_2 \} = \Omega_M. \quad (5)$$

Области Ω_N и Ω_M образуют все параметрическое пространство неизвестных скоростей:

$$\Omega_N + \Omega_M = \Omega.$$

Так как значения $\bar{\mathbf{v}}_1$ и $\bar{\mathbf{v}}_2$ неизвестны, то измерения на выходе фильтра Калмана $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ подчиняются распределениям для вектора параметров Θ

$$\{ p(\mathbf{v} / \Theta) : \Theta \in \Omega \}. \quad (6)$$

Для решения задачи обнаружения необходимо преодолеть параметрическую априорную неопределенность относительно Θ . Для этого используем принцип инвариантности [3], который основан на представлении априорной неопределенности в виде некоторого преобразования g из группы G над входными данными \mathbf{v} . Под воздействием g преобразуются параметры исходного семейства распределений, т.е. преобразование g индуцирует в параметрическое пространство Ω некоторое преобразование g_* . Если совокупность g составляет группу: $\{g\} = G$, то $\{g_*\} = G_*$ есть также группа [3].

Для группы G должны быть выполнены следующие условия:

1) определена операция группового умножения, которая любым двум элементам $g_1, g_2 \in G$ ставит в соответствие элемент

$$g_3 = g_2 g_1 \in G;$$

2) групповое умножение ассоциативно

$$g_1(g_2g_3)=(g_1g_2)g_3;$$

3) существует единичный элемент $e \in G$ такой, что для всех $g \in G$

$$ge=eg=g;$$

4) каждому элементу $g \in G$ ставится в соответствие обратный элемент $g^{-1} \in G$ такой, что

$$gg^{-1}=g^{-1}g=e.$$

Группа G называется группой преобразований, если элементы g являются преобразованиями пространства входных реализаций на себя, и групповое умножение g_2g_1 определяется как последовательные преобразования g_1 и g_2 .

Для использования принципа инвариантности в задаче обнаружения необходимо выполнение следующих условий [3, 4].

1. Семейство распределений $\{p(\mathbf{x}/\Theta) : \Theta \in \Omega\}$ должно обладать свойством симметрии относительно группы G , т.е. каждому элементу $g \in G$ в G_* найдется такой элемент g_* , что $g_*\Theta \in \Omega$ и

$$p(g\mathbf{x}/g_*\Theta) \times \left| \frac{\partial g\mathbf{x}}{\partial \mathbf{x}} \right| = p(\mathbf{x}/\Theta), \quad (7)$$

где $\frac{\partial g\mathbf{x}}{\partial \mathbf{x}}$ — матрица Якоби.

2. Индуцированная группа G_* преобразований g_* в пространстве Ω должна сохранять гипотезы H_N и H_M : $g_*\Theta \in \Omega_i$; $i=N, M$ для всех $\Theta \in \Omega_i$ и $g_* \in G_*$.

Переходя к решению поставленной задачи, отметим, что преобразования сдвига

$$g\mathbf{v}=(\mathbf{v}_1-\Delta, \mathbf{v}_2-\Delta); \quad \Delta \in R_n, \quad (8)$$

где $\Delta=[\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n]$ — вектор сдвигов в пространстве R_n описывает исходную априорную неопределенность относительно скорости. Нетрудно показать, что совокупность преобразований сдвига удовлетворяет условиям группы. Эта группа индуцирует в параметрическое пространство Ω группу G_* преобразований

$$g_*\Theta=(\bar{\mathbf{v}}_1-\Delta, \bar{\mathbf{v}}_2-\Delta). \quad (9)$$

При этом нетрудно проверить выполнение условия симметрии (7) семейства распределений (6) относительно группы G , а индуцированная группа сохраняет гипотезы H_N и H_M , определяемые из (5), для всех $\Theta \in \Omega_i$, $i=N, M$ и $g_* \in G_*$. Таким образом, выполнены необходимые условия, которые позволяют к данной задаче применить принцип инвариантности.

Следующим шагом решения задачи является определение максимального инварианта (МИ) групп G и G_* [4]. В рассматриваемом примере случайный вектор

$$\mathbf{z}=\mathbf{v}_1-\mathbf{v}_2 \quad (10)$$

является МИ группы G преобразований сдвига (8). МИ индуцированной группы G_* равен

$$\Theta_z=\Delta\bar{\mathbf{v}}=\bar{\mathbf{v}}_1-\bar{\mathbf{v}}_2. \quad (11)$$

Затем, следуя инвариантному методу, задачу обнаружения сформулируем как проверку гипотез относительно МИ группы G_* :

$$H_N : \{\Delta\bar{\mathbf{v}}=0\}=\Omega_{Nz}, \quad H_M : \{\Delta\bar{\mathbf{v}} \neq 0\}=\Omega_{Mz}.$$

При принятой гауссовой аппроксимации (4) функция правдоподобия для случайного вектора \mathbf{z} равна

$$p(\mathbf{z} / \Delta \bar{\mathbf{v}}) = \prod_{k=1}^n p(z_k / \Delta \bar{v}_k) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \sigma)^n} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (z_k - \Delta \bar{v}_k)^2 \right\}, \quad (12)$$

где $z_k = v_{1k} - v_{2k}$; $\Delta \bar{v}_k = \bar{v}_{1k} - \bar{v}_{2k}$.

Решение принимается в результате сравнения логарифма отношения правдоподобия для МИ с пороговым значением. Поскольку гипотеза H_M относительно Θ_z является двусторонней, в соответствии с критерием Неймана—Пирсона сравнение осуществляется с двумя пороговыми значениями c_1 и c_2 :

$$c_2(\alpha) < \ln l_{\Theta_z} = \ln \frac{p(\mathbf{z} / \Delta \bar{\mathbf{v}} \neq 0)}{p(\mathbf{z} / \Delta \bar{\mathbf{v}} = 0)} < c_1(\alpha), \quad (13)$$

где α — вероятность ложной тревоги. Подставив (12) в (13) и свернув относительно нуля распределение для суммы случайных величин, получим правило принятия решения для порогового значения $c(\alpha)$

$$\left| \sum_{k=1}^n (v_{1k} - v_{2k}) \right| > c(\alpha), \quad (14)$$

где $c(\alpha)$ вычисляется по заданному значению α .

Полученное решающее правило является инвариантным (независимым от неизвестного вектора скоростей), равномерно наиболее мощным и несмещенным [3], т.е. оптимальным в классе инвариантных решающих правил.

Результаты моделирования одного канала телевизионной следящей системы в системе MatLab представлены на рис. 2—4. Смоделирована следующая ситуация: в поле зрения телевизионной системы 6° , что соответствует 712 элементам раstra, объект движется равномерно и прямолинейно со скоростью $0,02^\circ$, или 10 элементов раstra за кадр, затем на 5-й секунде совершает маневр с ускорением 0,2 элемента раstra за кадр. Обнаружение маневра произошло на 5,5-й секунде. На 12-й объект пропадает и вновь появляется на 22-й; СКО измерения координат объекта ε на входе фильтра Калмана равна $0,008^\circ$, что соответствует одному элементу раstra и распределена по нормальному закону (математическое ожидание равно нулю).

На рис. 2, а показана зависимость скорости объекта — истинная (1) и измеренная на выходе фильтра Калмана (2). На рис. 2, б представлены кривые зависимости ускорения объекта от времени (3 — сигнал на выходе обнаружителя маневра). Решение о наличии маневра принято на 5,5-й секунде.

На рис. 3 приведена зависимость ошибки по координате (1) и ошибки прогноза координаты (при потере объекта) от времени в следящем контуре фильтра Калмана. Кривая 2 — зависимость коэффициента κ_1 (первого компонента в векторе \mathbf{K}) фильтра Калмана от времени (см. формулы (1), (2)). Закон изменения коэффициентов позволил ускорить переходный процесс для динамической (неслучайной) ошибки и минимизировать значение СКО. При фильтрации значения коэффициентов фильтра \mathbf{K} плавно уменьшаются с увеличением номера кадра и, достигнув нижней границы, остаются постоянными.

На рис. 4 показана зависимость ошибок прогноза в элементах раstra от нижней границы коэффициентов фильтра Калмана за время пропадания объекта на 10-й секунде. Кривая 1 — зависимость динамической ошибки, 2 — СКО, 3 — сумма модуля динамической и СКО. Таким образом, по горизонтальной оси отложены значения, равные номеру кадра, на котором устанавливается нижняя граница коэффициентов фильтра.

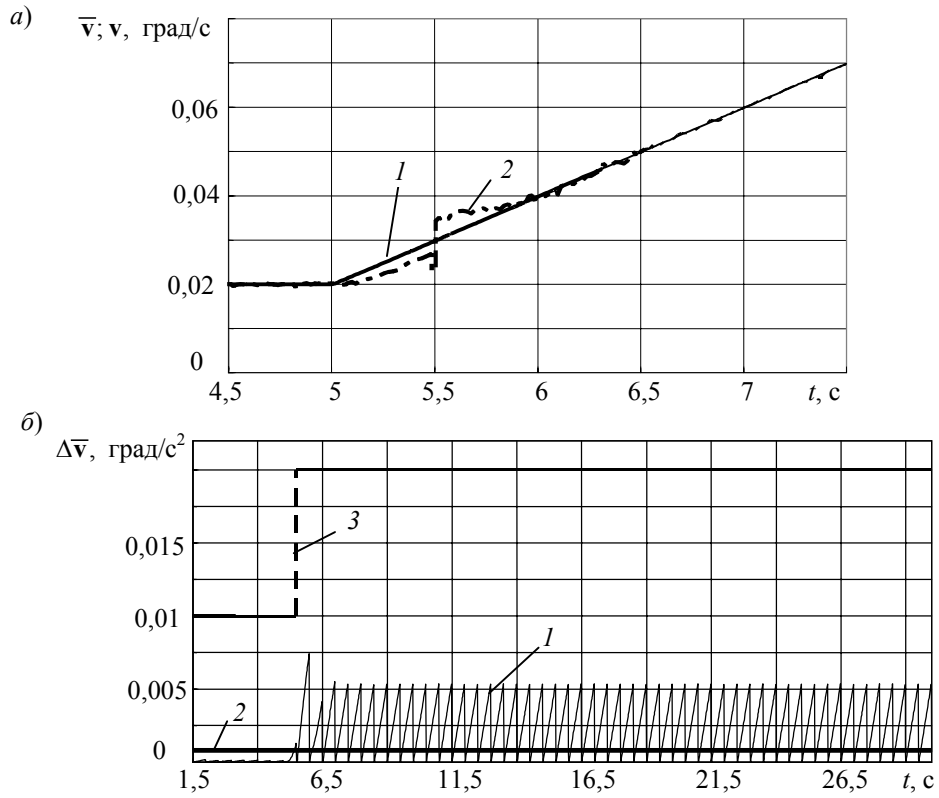


Рис. 2

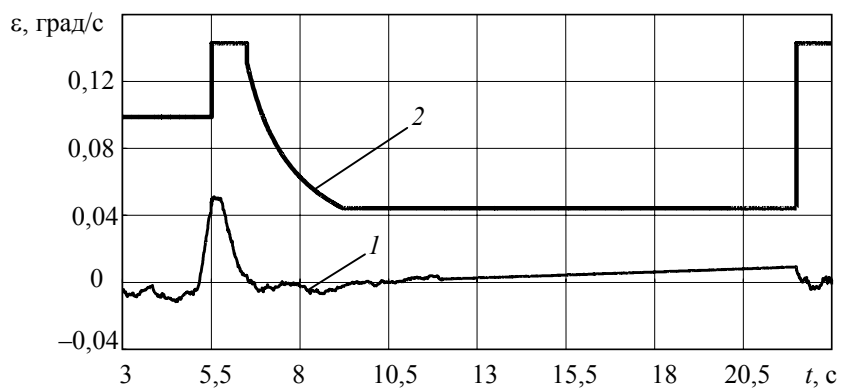


Рис. 3

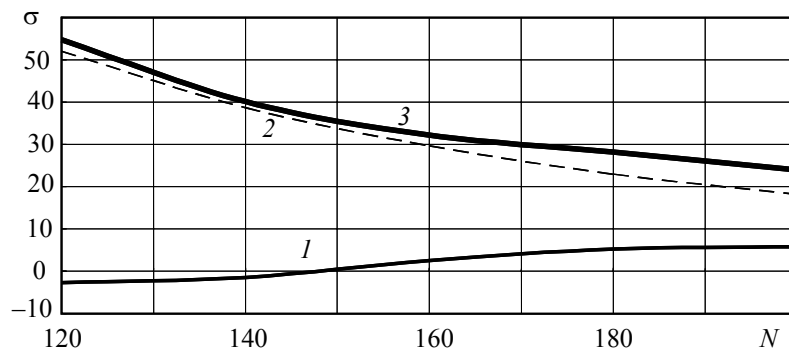


Рис. 4

Закключение. Представлена схема функционирования телевизионной следящей системы с адаптивными фильтрами Калмана. На основе статистического синтеза получен алгоритм обнаружения маневра объекта по его траектории на выходе фильтра Калмана, позволяющий управлять коэффициентами фильтра для минимизации ошибок переходного процесса в результате маневра и достижения необходимых флуктуационных ошибок измерения и ошибок прогнозирования координат в телевизионной следящей системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. М.: Вильямс, 2004.
2. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
3. Леман Э. Проверка статистических гипотез. М.: Мир, 1979. 341 с.
4. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир, 1978. 560 с.

Сведения об авторах

- Валерий Трофимович Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; директор;
E-mail: valery@eoss.ru
- Леонид Дмитриевич Вилесов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра радиоэлектроники и телевидения; E-mail: vilesov@aanet.ru
- Владимир Иванович Можейко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; начальник сектора;
E-mail: Lab2@eoss.ru
- Татьяна Юрьевна Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Центральный научно-исследовательский институт „Комета“, Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; вед. науч. сотр.;
E-mail: tatiana@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
29.05.08 г.