

УДК 621.388

Ю. В. Мартышевский

(Томск)

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ  
СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ**

Проведен статистический синтез адаптивной телевизионной следящей системы, устойчивой к возникновению аномальных измерений в виде аддитивных и мультипликативных помех. Исследована точность и устойчивость определения координат оптического ориентира. Результаты получены путем прямого вероятностного моделирования телевизионных следящих систем на РС.

**Введение.** Телевизионные следящие системы (ТСС) применяются для определения координат и слежения за оптическими ориентирами в геофизических измерениях и в топографии при строительстве и контроле таких объектов, как мосты, виадуки, плотины и т. д. При этом, измеряя координаты ориентиров, судят о поведении контролируемого объекта. Процесс измерения характеризуется высокой точностью, мобильностью и, как правило, отсутствием какой-либо специальной подготовки, а следовательно, низкой стоимостью.

Работа ТСС основана на том, что проецируемое оптической системой световое поле преобразуется телевизионным датчиком путем покадрового считывания информации в двумерный массив дискретных отсчетов видеосигнала размером  $L \times L$  элементов [1].

Слежение за ориентирами осуществляется посредством обработки видеосигнала в стробе размером  $M \times N$  элементов. Количество отслеживаемых ориентиров определяется решаемой задачей и ограничено такими факторами, как быстродействие, требуемая точность измерения.

Реальные условия работы ТСС характеризуются наличием помех и значительными фоновыми неопределенностями.

Условно действующие на ТСС помехи можно разделить на аддитивные, обусловленные шумами усилителей и телевизионных датчиков; мультипликативные, обусловленные мерцанием сигнала, возникающим при распространении оптического излучения в турбулентной атмосфере, дефектами датчика и фоновыми неоднородностями.

Влияние помех проявляется в наличии случайных срывов слежения, приводящих при традиционных способах обработки информации в ТСС к повторному обнаружению, поиску и захвату ориентира. В итоге возрастают временные затраты и снижается быстродействие ТСС.

Оптимизация ТСС при наличии указанных факторов предполагает разработку алгоритмов обработки, обладающих адаптивными свойствами и обеспечивающих устойчивость работы ТСС при аномальных аддитивных ошибках, а также пропусках полезного сигнала. Разработка устойчивых алгоритмов проводится на основе марковской теории нелинейной динамической фильтрации, обеспечивающей получение реализуемых структур ТСС.

**Модель сигнала и полезного сообщения.** Наиболее часто в качестве датчиков ТСС применяют приборы с зарядовой связью (ПЗС). Современная технология производства ПЗС не исключает присутствия дефектов на детектирующей поверхности датчика. Это приводит к тому, что чувствитель-

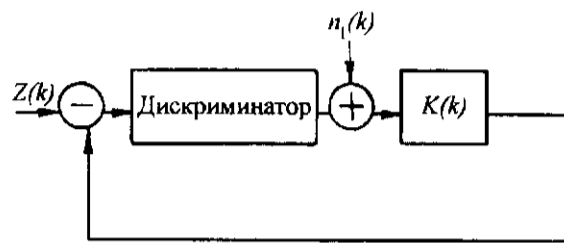


Рис. 1

ность отдельных элементов (или группы) ПЗС значительно отличается от номинальной. В результате при считывании такого элемента накопленный им видеосигнал (заряд) имеет малую амплитуду, в то время как шум, обусловленный выходным каскадом ПЗС и видеоусилителем, остается на прежнем уровне.

В общем случае сигнал на выходе телевизионного датчика является смесью видеосигнала, несущего информацию о положении центра ориентира, и помех в виде шума, причем измеряемый сигнал и полезное сообщение связаны, как правило, нелинейной зависимостью [2, 3].

Для упрощения решения поставленной задачи будем считать ТСС частично заданной, т. е. состоящей из дискриминатора и адаптивного следящего фильтра (рис. 1), а измерения координат по каналам  $X$  и  $Y$  независимыми. Это позволит, не теряя общности, существенно уменьшить объем вычислений при моделировании.

Представим сигнал при считывании кадра в виде

$$Z(k) = HX(k)G_1(k) + G_2(k)n_0(k), \quad (1)$$

где  $H = [1; 0]$  — вектор-строка наблюдения;  $X(k)$  — информативный процесс (измерение координат положения центра изображения ориентира);  $G_1(k)$ ,  $G_2(k)$  — случайные функции, определяющие соответственно мультипликативные замирания и наличие аномальных уровней аддитивного шума;  $n_0(k)$  — последовательность эквивалентного белого шума с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_0$ .

При унимодальном распределении яркости в изображении ориентира его координаты по оси  $X$  определяются [4] таким образом:

$$x(k) = x_c(k) + n_1(k). \quad (2)$$

Здесь  $x_c(k)$  — координаты центра изображения;

$$x_c(k) = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M x_{ij} Z_{ij}}{S}; \quad S = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M Z_{ij};$$

$x_{ij}$  — текущий отсчет координаты в пределах строка;  $Z_{ij}$  — яркость  $ij$ -го элемента изображения;  $S$  — энергия сигнала;  $n_1(k)$  — эквивалентная помеха в виде шума с  $E[n_1(k)] = 0$  и средним квадратическим отклонением, равным

$$\sigma^2 = \frac{x_c^2 MN \sigma_0^2}{S^2 + MN \sigma_0^2} + \frac{\sigma_0^2 \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M x_{ij}^2}{S^2 + MN \sigma_0^2} + \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M Z_{ij}^2}{12S^2}.$$

Достаточно общим является представление траектории движения объекта в виде суммы квазидетерминированной ( $x_{\text{кл}}(t)$ ) и случайной ( $x_{\text{сл}}(t)$ ) составляющих [2].

В пространстве состояний траектория движения представляется в виде дискретного уравнения

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & T_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

— матрица перехода дискретной системы;

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_c \sqrt{\alpha T_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

— матрица шума состояния;  $\alpha$  — величина, обратная интервалу корреляции;  $\sigma_c$  — величина среднего квадратического отклонения случайной составляющей  $x_{\text{сл}}(t)$ ;  $n(k)$  — дискретная последовательность гауссова шума с  $E[n(k)] = 0$  и единичной интенсивностью, причем  $\text{cov}E[n(k)n_0(k)] = 0$ ;  $T_0$  — время считывания кадра изображения.

Решение задачи. Для уравнений (1), (3) и принятых ранее допущений оптимальная в среднеквадратическом смысле оценка соответствует линейному модифицированному фильтру Калмана [5].

В дискретном времени алгоритм фильтрации определяется: уравнением оценки

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k/k-1) + \rho(1/k)K_1(k)\tilde{Z}(k) + (1 - \rho(1/k))K_c(k)\tilde{Z}(k), \quad (4)$$

уравнением дисперсии ошибок фильтрации

$$P(k/k) = P(k/k-1) - \rho(1/k)K_c(k)HP(k/k-1) + \rho(1/k)[1 - \rho(1/k)]K_c(k), \quad (5)$$

$$\tilde{Z}(k)K_c^T(k)Z^T(k) - K_c(k)HP(k/k-1).$$

В уравнения (4), (5) входят: экстраполированная оценка

$$\hat{X}(k/k-1) = F\hat{X}(0/0), \quad \hat{X}(0/0) = E(X(k)),$$

невязка измерений

$$\tilde{Z}(k) = [Z(k) - HX(k/k-1)],$$

априорная ковариационная матрица ошибок

$$P(k/k-1) = FP(0/0)F^T + Q\sigma_c Q^T, \quad P(0/0) = \text{cov}[\hat{X}(0)],$$

апостериорная вероятность исправного состояния канала измерения

$$\rho(1/k) = q(k) \exp\left\{-\frac{\tilde{Z}(k)\tilde{Z}(k)^T}{2P(k/k-1) + \sigma}\right\} \left\{ q(k) \exp\left\{-\frac{\tilde{Z}(k)\tilde{Z}(k)^T}{2P(k/k-1) + \sigma}\right\} + \left(\frac{P(k/k-1) + \sigma}{P(k/k-1) + C^2\sigma}\right)^{1/2} [1 - q(k)] \exp\left\{-\frac{\tilde{Z}(k)\tilde{Z}(k)^T}{2P(k/k-1) + C^2\sigma}\right\} \right\}^{-1},$$

коэффициент усиления фильтра

$$K_i(k) = P(k/k-1)H^T [H^T P(k/k-1)H^T + i^2\sigma]^{-1}, \quad i = 1, C.$$

При  $G_1 = 0$  оценка формируется путем прогноза текущей оценки с  $k$ -го на  $k + 1$ -й шаг.

Структурная схема оптимальной ТСС определяется уравнением (4) и представляет собой двухконтурную взаимосвязанную динамическую систему с замкнутой обратной связью и переменными во времени коэффициентами усиления. Матричный коэффициент усиления этого фильтра изменяется в зависимости от значения апостериорной вероятности  $\rho(1/k)$ , которая определяет вес текущего измерения  $Z(k)$  в образовании оценки  $\hat{X}(k)$  по правилу

$$\hat{X}(k) = \hat{X}_n(k)\rho(1/k) + [1 - \rho(1/k)]\hat{X}_a(k),$$

где  $\hat{X}_n(k)$  и  $\hat{X}_a(k)$  — оптимальные оценки информационного сообщения при нормальном и аномальном измерениях.

Данный фильтр отличается от калмановского тем, что он является нелинейным фильтром вследствие зависимости  $\rho(1/k)$  и  $K(k)$  от текущего  $Z(k)$ .

По окончании кадра ТСС формируется оптимальная оценка всех компонент траектории движения объекта. За время обратного хода по строкам и кадру оценка экстраполируется на следующий кадр.

Результаты моделирования. Статистический анализ точности определения координат ориентира проводился путем прямого вероятностного моделирования синтезированных алгоритмов на ЭВМ.

При расчетах величины, входящие в (4), (5), нормировались относительно времени кадра  $T_0$ . Поле кадра дискретизировалось на  $256 \times 256$  элементов. Распределение яркости, создаваемое изображением на детектирующей поверхности датчика, принималось гауссовым. Размеры изображения на уровне  $1/e$  составляли 25—35 элементов, при этом размеры строка — 50—70 элементов.

Установлено, что в производственных условиях вероятность появления мультипликативной составляющей сигнала достаточно высока, так как, кроме перечисленных факторов, она обусловлена и помехами индустриального характера, такими как: дым, изменение контраста ориентира, затенение ориентира подвижными конструкциями и т. д., учесть которые не всегда удается. Поэтому на основании проводимых ранее экспериментов принято, что  $\xi = 0.85$ .

Исследование проводилось при наличии как точечных дефектов, т. е. дефектов отдельных элементов датчика, так и «слепых» пятен, когда неработоспособны локальные области датчика в 10—20 элементов [6].

Вероятность аддитивной составляющей рассчитывалась как отношение  $q(k) = N_d/N_c$ , где  $N_d$  — количество дефектных элементов;  $N_c$  — количество

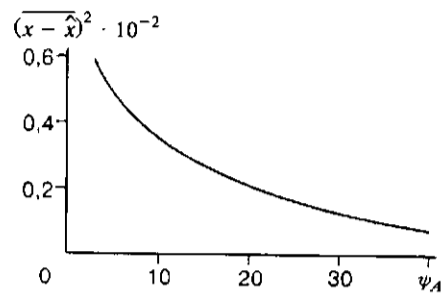


Рис. 2

элементов в строке. Для размеров «слепого» пятна в 20 элементов величина  $q(k)$  не превышала 0,9.

Функции  $G_1$  и  $G_2$  принимались случайными:

$$G_1 = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } \zeta, \\ 0 & \text{с вероятностью } (1 - \zeta), \end{cases} \quad G_2 = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } q, \\ C & \text{с вероятностью } (1 - q). \end{cases}$$

Моделирование проводилось при фиксированных значениях последовательности, т. е. аномальные измерения моделировались в одни и те же моменты времени (показано стрелками) и при их равномерном распределении.

Расчеты осуществлялись для значений параметров случайной составляющей траектории  $\alpha = 0,01$ ,  $\sigma_c = 0,02$ .

Параметры квазидетерминированной составляющей траектории принимались случайными по нормальному закону распределения и известными  $\bar{b} = 0$ ,  $\bar{a} = 0,001$  и  $\sigma_a = 0,0002$ ,  $\sigma_b = 0,0002$ .

Начальные значения матрицы ковариации  $\text{diag}\{0,01; 0,01; 0,01\}$ .

Отношение сигнал/шум определялось как  $\psi_A = \frac{Z_{\max}}{C\sigma_0}$ , здесь  $Z_{\max}$  — максимальное значение яркости в изображении.

Результаты моделирования приведены на рис. 2—4. На рис. 2 показано поведение во времени дисперсии ошибки определения координат центра изображения ориентира  $(x - \hat{x})^2$  от отношения сигнал/шум  $\psi_A$ . На рис. 3 сплошной линией показано поведение дисперсии оценки во времени (с  $k = 10$ —20 моделируется увеличение шума при  $C = 5$ , а с  $k = 35$ —45 — при  $G_1 = 0$ ),

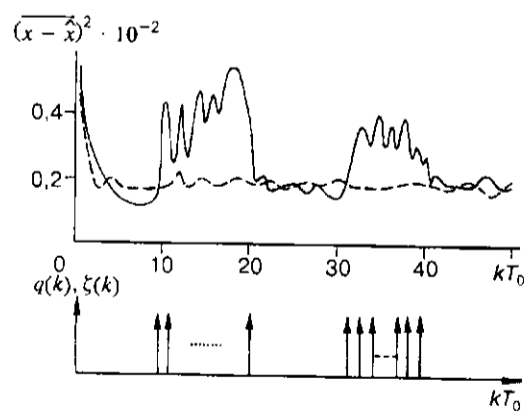


Рис. 3

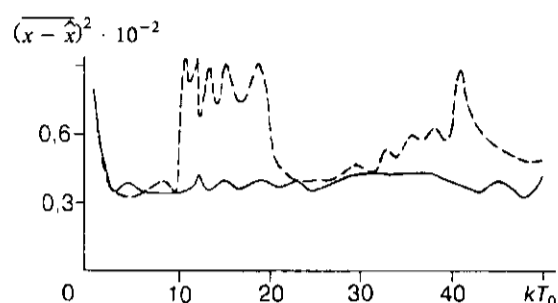


Рис. 4

штриховой — поведение дисперсии оценки при отсутствии аномальных измерений. На рис. 4 сплошной линией показано поведение дисперсии оценки при равномерном распределении вероятности появления как мультипликативных исчезновений сигнала, так и аддитивной помехи, а штриховой — поведение дисперсии при возникновении немоделируемых аномальных измерений. Результаты получены путем усреднения по 100 реализациям случайных процессов.

#### ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают, что ошибка определения координат ориентира при  $\psi_A = 20$  составляет 0,005 от размера чувствительного элемента телевизионного датчика.

Использование предложенных алгоритмов позволяет существенно повысить устойчивость работы ТСС. Например, при  $C = 10$  сигнал/шум  $\psi_A < 2$ , однако срывов слежения по сравнению с [3] не наблюдается, а время переходного процесса вполне допустимо. Установлено также, что «точечные» дефекты датчика практически не оказывают влияния на работу ТСС. Дефекты в виде «слепых» пятен приводят к увеличению дисперсии оценки координат, однако срывов слежения не происходит. Срывы слежения возникают только при исчезновении сигнала более чем в 14—15 последовательных кадрах.

Отсутствие учета исчезновения сигнала при моделировании работы ТСС приводит к срыву слежения уже на третьем—четвертом кадре. Полученные результаты предполагается использовать в качестве потенциальных характеристик ТСС для дистанционного контроля деформации строительных конструкций при воздействии на них динамических нагрузок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 991455 СССР. Устройство для определения координат точечных световых объектов /Ю. В. Мартышевский, В. А. Кормилин. Оpubл. 1983, Бюл. № 3.
2. Мартышевский Ю. В. Анализ точности определения координат лазерного пучка телевизионной следящей системы // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1990. № 8. С. 34.
3. Мартышевский Ю. В., Тисленко В. И. Анализ характеристик срывов слежения в диссекторной следящей системе с динамическим фильтром Калмана // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1986. № 9. С. 53.
4. Bar-Shalom Y., Shertukde H. M., Pattipati K. R. Use the measurements from an imaging sensor for precision target tracking // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. 1989. 25(6). P. 863.
5. Гришин Ю. П., Казаринов Ю. М. Динамические системы, устойчивые к отказам. М.: Радио и связь, 1985.
6. CCD Image Sensors Dalsa Inc. // Manual Book. Waterloo, Ontario, Canada, 1995.

Поступила в редакцию 31 мая 1996 г.