РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АВТОМЕТРИЯ

№ 3 1995

УДК 621.388.3

Ю. В. Мартышевский

(Томск)

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СВЕТОВОГО ОБЪЕКТА ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМОЙ НА ДИССЕКТОРЕ

На основе марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации проведен анализ точности определения координат светового объекта диссекторной следящей системой с учетом нестационарного шума, генерируемого диссектором. Получены характеристики точности определения координат объектов, оценена эффективность полученных алгоритмов.

Телевизионные следящие системы (ТСС) на диссекторе находят широкое применение при определении координат и слежении за точечными световыми объектами (ТСО) в устройствах оптической связи и лазерной локации [1].

Вопросу анализа точности ТСС посвящен ряд работ. Однако, как правило, в них принимается допущение о стационарности шума, генерируемого диссектором, что может быть справедливо лишь при малоконтрастных объектах, либо проводится анализ точности определения координат при заданной линейной структуре фильтра, что снижает значимость полученных результатов [2].

Развитие современной элементной базы микропроцессоров и микроЭВМ ставит новые задачи анализа качественных характеристик и синтеза алгоритмов определения координат ТСС, работающей в условиях целого комплекса случайных входных воздействий.

В настоящей работе на основе марковской теории нелинейной фильтрации проведена оценка точности определения координат ТСО и получен оптимальный алгоритм обработки информации в ТСС. В качестве источника ошибок рассматриваются флуктуации тока сигнала на выходе диссектора, обусловленные собственными шумами трубки.

Модель наблюдаемого сигнала и полезного сообщения. Для применения марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации необходимо задать модель наблюдаемого сигнала, поступающего с диссектора видеосигнала, и полезного сообщения, описывающего траекторию перемещения изображения ТСО по фотокатоду диссектора.

Особенность телевизионного датчика на диссекторе состоит в том, что интенсивность флуктуационного тока на выходе зависит от среднего уровня освещенности.

В режиме слежения при сканировании изображения объекта относительно апертуры по траектории следящего микрорастра суммарный ток диссектора может быть представлен аддитивной суммой:

$$Y(t) = S(t) + n(t) = AS(\lambda(t), t) + n_s(t) + n(t), \tag{1}$$

$n(t)$ — белый гауссов шум, обусловленный наличием фона (шума фона); $n_s(t)$ — белый гауссов шум, обусловленный наличием полезного сигнала (сигнальный шум); $\lambda(t)$ — полезное сообщение (изменение координаты ТСО); $S(\cdot)$ — нормированная функция, определяющая форму среднего тока полезного сигнала; A — значение среднего тока полезного сигнала в максимуме сигнальной функции.

Гауссовы шумы $n(t)$ и $n_s(t)$ предполагаются статистически независимыми, поскольку порождены несвязанными световыми потоками фона и сигнала. Таким образом, флуктуационный сигнал на выходе диссектора содержит нестационарный белый гауссов шум.

Корреляционная функция флуктуационного тока согласно [3] имеет вид

$$R(t,\tau) = N(t)\delta(t-\tau) = N_0\left(1 + \frac{P}{1-P}S(\lambda(t),t)\right)\delta(t-\tau), \qquad (2)$$

где $\delta(t-\tau)$ — дельта-функция Дирака; P — электрический контраст.

Наличие в наблюдаемом сигнале (1) нестационарного шума с зависящей от сообщения спектральной плотностью мощности существенно усложняет анализ точности измерения координат ТСО.

При анализе точности измерения координат ТСО будем считать, что измерения координаты по осям X и Y не коррелированы, а адекватной моделью сообщения является стационарный марковский гауссов процесс первого порядка с корреляционной функцией

$$R_\lambda(\tau) = \sigma_\lambda^2 e^{-\alpha_0|\tau|}, \qquad (3)$$

где α_0 — величина, обратная интервалу корреляции сообщения; σ_λ^2 — дисперсия процесса $\lambda(t)$.

Исходя из (1)—(3) запишем уравнения состояния и наблюдения, учитывая при этом, что $X_1(t) \equiv \lambda(t)$:

$$\dot{X}_1(t) = -\alpha_0 X_1(t) + \sigma_1\sqrt{2\alpha_0}\,n_1(t), \qquad (4)$$

$$Y(t) = AS(X_1(t),t) + \sqrt{N_0(1 + (P/(1-P))S(X_1(t),t)}\,n_0(t)), \qquad (5)$$

где $n_1(t)$ и $n_0(t)$ — статистические независимые белые гауссовы шумы с единичной спектральной плотностью; σ_1^2 — дисперсия сообщения $X_1(t)$.

Предлагаются два варианта решения этой задачи.

Так как составляющая шума наблюдения $n_s(t)$ несет информацию о сообщении, перепишем (1) в виде

$$Y(t) = AS(X_1(t),t) + \sqrt{AS(X_1(t),t)}\,n_{0s}(t) + \sqrt{N_0}\,n_0(t), \qquad (6)$$

где $n_0(t)$ — белый стационарный шум фона с единичной спектральной плотностью; $n_{0s}(t)$ — гауссов сигнальный шум с единичной спектральной плотностью.

Представляется целесообразным учесть шумовую составляющую сигнала вводом дополнительного процесса $X_2(t)$ со свойствами, близкими к белому шуму.

В этом случае (6) имеет вид

$$Y(t) = AS(X_1(t),t) + \sqrt{AS(X_1(t),t)}\,X_2(t) + \sqrt{N_0}\,n_0(t), \qquad (7)$$

где $X_2(t)$ — гауссов марковский процесс с единичной интенсивностью:

$$\dot{X}_2(t) = -\beta_0 X_2(t) + \beta_0 n_2(t), \qquad (8)$$

$n_2(t)$ — белый нормальный шум. Параметр β_0, определяющий корреляционные свойства процесса, удовлетворяет условию

$$\alpha_0^{-1} \gg T_{и} \gg \beta_0^{-1}, \qquad (8а)$$

где $T_и$ — длительность видеосигнала на уровне 0,606 А.

Таким образом, задача сводится к оценке вектора сообщения: $\dot{X}(t) = |X_1(t); X_2(t)|^T$, удовлетворяющего уравнениям (4), (8) и нелинейно связанного с наблюдаемым сигналом (7).

Для уравнений (4), (7), (8) при гауссовой аппроксимации апостериорной плотности вероятностей вектора оптимальная в среднеквадратичном смысле оценка вектора определяется в дискретном времени уравнением прогноза и коррекции [4]:

$$\hat{X}(k+1/k) = \Phi X(k/k);$$

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k+1/k) + K(-k+1)\left\{Y(k+1) - S_0(\hat{X}(k+1/k), k+1)\right\},$$

где

$$S_0(\cdot) = AS(\hat{X}_1(k+1/k), k+1) + \sqrt{AS(X_1(k+1/k), k+1)}\,\hat{X}_2(k+1/k)$$

— нелинейная функция наблюдений;

$$\Phi = \begin{vmatrix} 1-\alpha_0\Delta t & 0 \\ 0 & 1-\beta_0\Delta t \end{vmatrix}$$

— матрица перехода дискретной системы; Δt — интервал дискретизации по времени.

Коэффициент усиления динамического фильтра

$$K(k+1) = D(k+1)\dot{S}_0(k+1/k)N_0^{-1}\Delta t,$$

где $\dot{S}_0(\cdot) = \dfrac{\partial S_0(\cdot)}{\partial \hat{X}(k+1/k)}$ — вектор-строка — градиент скалярной функции.

Матрица ковариаций оценивания

$$D(k+1) = D\left(\frac{k+1}{k}\right) - D\left(\frac{k+1}{k}\right)\dot{S}_0^T\left\{\dot{S}_0 D\left(\frac{k+1}{k}\right)\dot{S}_0^T \frac{-N_0}{\Delta t}\right\}\dot{S}_0(\cdot)D\left(\frac{k+1}{k}\right).$$

Априорная матрица ковариаций ошибки

$$D\left(\frac{k+1}{k}\right) = \Phi D(k)\Phi^T + G,$$

где матрица $G = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 2\alpha_0\Delta t & 0 \\ 0 & 2\beta_0\Delta t \end{vmatrix}$.

Для реализации алгоритмов формирования оценки, согласно уравнениям, необходимо задать начальные значения вектора и матрицы ковариации.

Другой путь решения задачи предусматривает объединение независимых шумов и запись наблюдаемого сигнала в виде (6) с последующей заменой в (2) сообщения $X_1(t)$ на его оценочные значения $\hat{X}_1(t)$.

Наблюдения примут вид

$$Y(t) = AS(X_1(t), t) + \sqrt{N_0(1 + (P/(1-P))S(\hat{X}_1(t), t))}\,n_0(t). \qquad (9)$$

В этом случае сообщение является скалярной функцией и алгоритмы фильтрации существенно упрощаются.

Результаты моделирования. Численные результаты анализа точности получены методом прямого вероятностного моделирования алгоритмов обра-

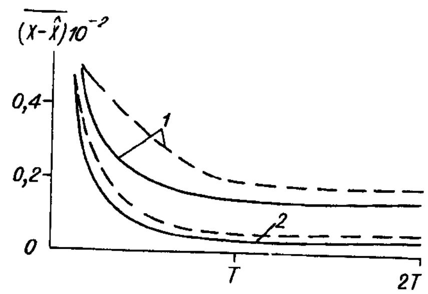

Рис. 1. Изменение дисперсии σ_x^2 ошибки определения координат объекта во времени:
1 — для первого варианта, 2 — для второго варианта нестационарного шума

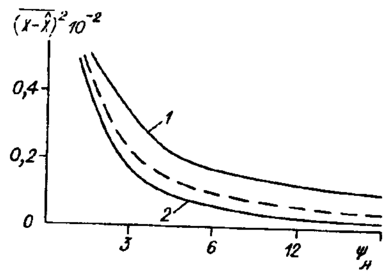

Рис. 2. Зависимость σ_x^2 от отношения сигнал/шум ψ_A

ботки на компьютере. Форма видеосигнала, образующегося при сканировании изображения точечного светового объекта, аппроксимировалась гауссоидой длительностью $T_и = T/2$, где T — длительность интервала сканирования. Величины σ_x, Δt, α_0, β_0, имеющие размерность времени, нормировались к длительности интервала сканирования T, которая принималась равной единице.

Путем эмпирических повторных расчетов нормированная величина интервала дискретизации выбрана равной 0,05. При этом ошибки за счет дискретизации не превышали 3 %.

Начальные значения оценок принимались равными средним значениям процессов $X_1(t)$ и $X_2(t)$. Начальные значения элементов ковариационной матрицы составляли $D_{11}(0) = 0{,}2$, $D_{22}(0) = 1$, D_{12} и $D_{21} = 0$, что соответствовало ранее принятым свойствам процессов и априорному предположению о наличии изображения ТСО в пределах микрорастра.

Расчеты проведены для типовых нормированных параметров сообщения: $\sigma_1/T = 0{,}1$, $\alpha = \alpha_0 T = 0{,}15$.

Кривые *1* и *2* на рис. 1—3 относятся соответственно к фильтрам, выполненным по первому и второму вариантам.

Усреднение по случайным начальным условиям $\hat{X}_1(0)$ и $\hat{X}_2(0)$ проводилось при их нормальном распределении (штриховая линия на рис. 1 и 2). Условие (8а) было выполнено при значении $\beta_0 T = 15$.

При расчетах отношение сигнал/шум принималось равным отношению амплитуды видеосигнала к интенсивности фонового шума $\psi_A = A/\sigma_ш$.

На рис. 1 показано изменение во времени дисперсии ошибки измерения координат ТСО

$$\sigma_x^2 = \overline{(X_1 - \hat{X}_1)^2}.$$

На рис. 2 приведена зависимость σ_x^2 от отношения сигнал/шум ψ_A. На рис. 3 показана зависимость σ_x^2 отношения σ_x^2/σ_x^{2*} от контраста ТСО P. Здесь же приведены результаты эксперимента. Из графика рис. 3 видно, что σ_x^2 увеличивается при возрастании P по сравнению с дисперсией оценки σ_x^{2*}, полученной для случая, если бы в наблюдении (1) присутствовал только стационарный шум, обусловленный фоном. Наличие неста-

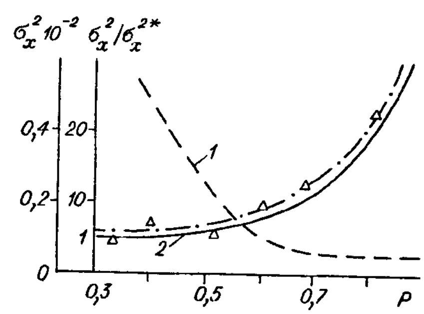

Рис. 3. Зависимости σ_x^2 и отношения σ_x^2/σ_x^{2*} от контраста объекта (штриховая линия) и контраста (сплошная линия) соответственно; Δ — результаты эксперимента

ционарной составляющей шума приводит к тому, что при $P = 0{,}9$ дисперсия оценки более чем в 20 раз превышает потенциально достижимую оценку.

ВЫВОДЫ

Результаты, представленные на рис. 1—3, показывают достаточно быструю сходимость предложенных алгоритмов. Ошибка определения координат ТСО при $\psi_A = 20$ составляла 2 % от размеров микрорастра.

Несмотря на то что полученные алгоритмы дают примерно одинаковую оценку потенциальной точности, алгоритм по первому варианту оказывается двумерным и требует большего объема вычислений.

Приведенные на рис. 3 результаты исследования эффективности алгоритмов показывают, что при контрастах ТСО $P < 0{,}5$ учет нестационарной составляющей шума диссектора не оказывает существенного влияния на точность определения координат объекта. Однако при контрасте $P > 0{,}5$ нестационарная составляющая сигнала уже существенно определяет точность полученных оценок.

Практическая проверка показала работоспособность алгоритмов и правильность принятых моделей и допущений.

Полученные результаты могут быть использованы при обосновании требований к техническим характеристикам разрабатываемых ТСС на диссекторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **А. с. 811302 СССР.** Устройство для определения координат точечных световых объектов /Ю. В. Мартышевский. Опубл. 07.03.81, Бюл. № 9.
2. **Ободан В. Я., Путилов Ю. М.** Оптимальное определение временного положения видеосигнала диссектора с учетом нестационарности его шума // Автометрия. 1983. № 1.
3. **Верешкин А. Е.** К определению корреляционной функции нестационарных шумов в диссекторной и суперортиконной камерах // Радиотехника и электроника. 1969. № 12.
4. **Сейдж Э., Мелс Дж.** Теория оценивания и ее применения в связи и управлении. М.: Связь, 1976.

Поступила в редакцию 27 апреля 1994 г.