

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ (ТЕПЛОВИЗИОННЫХ) КООРДИНАТОРОВ В СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ

*Зубарев Ю.Б., д.т.н., чл.-кор. РАН, советник генерального директора, ЗАО «МНИТИ», e-mail: osa@mniti.ru;*

*Арзуманян Э.П., д.т.н., главный научный сотрудник, ЗАО «МНИТИ», e-mail: arzedouard@gmail.com;*

*Миколайчук Д.В., начальник сектора, ЗАО «МНИТИ», e-mail: amid\_mik@mail.ru.*

**Ключевые слова:** цифровые координаты, видеосигнал, чересстрочная развертка телевизионного изображения.

### Введение

В настоящее время широкое распространение получили системы наблюдения и безопасности, использующие телевизионные или тепловизионные датчики для съема сигналов изображения. Со временем требования к таким системам повышаются, в частности, в сторону расширения области применения и увеличения функциональных возможностей. Одним из интересных направлений их применения являются мобильные системы, предназначенные для оперативной съемки локальных событий. В этом случае критерием качества работы комплекса является обеспечение минимальной динамической ошибки при максимальной угловой скорости оптической оси оптико-электронной системы (ОЭС), применяемой для широкого обзора местности. В данной работе рассматривается контур слежения с астатизмом первого порядка. Следящие контуры с более высокими порядками астатизма весьма чувствительны к флуктуационной составляющей сигналов, управляющих электроприводом ОЭС. Эта чувствительность особенно свойственна системам, использующим принцип управления следящим приводом по растровому изображению.

### Постановка задачи

В цифровых координаторах из-за дискретизации видеосигнала, а также дискретности ТВ раstra возникает регулярная ошибка вычисления координат, составляющая  $\pm 1$  т.э. (телевизионный элемент, вертикальный размер которого соответствует шагу строк ТВ раstra). Данная ошибка имеет случайный характер и зависит от положения текущего изображения относительно структуры раstra. Таким образом, первыми источниками флуктуационной составляющей выходного сигнала координатора являются строчная структура ТВ раstra по вертикали и шаг дискретизации по другой оси. Следующим источником флуктуационной составляющей является чересстрочная структура ТВ развертки, широко используемая в вещательном стандарте телевидения. В этом случае координатная ошибка может возрасти до  $\pm 2$  т.э. (особенно при низких контрастах изображения).

В мгновенном поле зрения ОЭС одновременно могут находиться несколько подвижных объектов (человек,

*Описывается один из подходов к оценке характеристик телевизионных (тепловизионных) систем автоматического слежения за объектами, обеспечивающий наблюдение пространства, заключенного в пределах угла зрения мобильной оптико-электронной системы. Приводятся результаты математического моделирования, в котором учтены внешние влияющие факторы, и различные режимы внутренних параметров контура слежения.*

автомобиль и др.), из которых следует выделить только один и обеспечить за ним автосопровождение. Специфика ТВ принципа локализации объекта состоит в поиске его в ближайшей окрестности текущей координаты. Поиск объекта в более широкой области наблюдаемого изображения может привести к ложным идентификациям. Поэтому в каждом цикле  $\Delta t$  работы координатора вычисляются приращения координат  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , а сами координаты формируются методом накопления дифференциальной ошибки следующим образом:

$$X(t) = X(t - \Delta t) + \Delta x;$$

$$Y(t) = Y(t - \Delta t) + \Delta y. \quad (1)$$

Обеспечение минимально допустимой динамической ошибки необходимо для предотвращения выхода изображения объекта за пределы мгновенного угла зрения при использовании длиннофокусного оптического средства. В контуре с астатизмом 1-го порядка ошибка определяется допустимой угловой скоростью оптической оси.

Для обеспечения быстрого поиска в окрестности текущей координаты объекта, целесообразно строить систему по двухконтурной схеме. При этом внутренний, т.е. электронный контур, осуществляет слежение в пределах мгновенного поля зрения оптического средства. Он вырабатывает сигналы координат относительно центра и в пределах ТВ раstra. Во внешнем контуре эти сигналы используются в качестве управляющих пространственным положением оптической оси ТВ камеры.

На рис. 1 приведен вариант структурной схемы для одного канала двухконтурной следящей системы ТВ координатора.

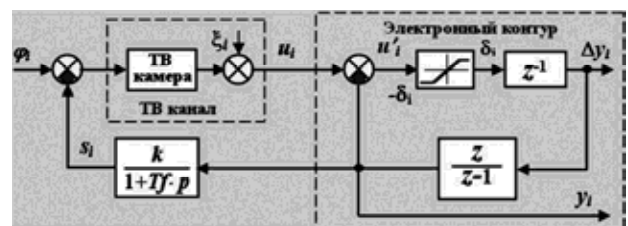


Рис. 1. Структурная схема ТВ координатора (ось y)

Входное значение  $\varphi_i$  мобильной ОЭС характеризует угловое положение линии визирования ТВ камеры. Сигнал изображения  $u_i$  подвергается входным возмущениям (изменениям  $\varphi_i$ ) и поступает на вход электронного контура слежения. Далее выполняются следующие процедуры обработки (рис. 1):

– ограничение зоны поиска  $\pm\delta$  в ближайшей окрестности объекта слежения, необходимое для достоверной идентификации отслеживаемого объекта;

– идентификация объекта с вычислением приращений координат  $\Delta y_i$  вследствие перемещения изображения;

– формирование координат объекта в пределах мгновенного поля зрения ТВ камеры.

Совокупность процедур обработки должна занимать минимальное время, поскольку от быстродействия внутреннего (электронного) контура полностью зависит быстродействие внешнего (электромеханического) контура.

Это минимальное время не может быть меньше времени формирования изображения  $u_i$  – основного источника информации. При использовании вещательного стандарта эта величина для полного ТВ кадра составляет  $\Delta t = 0,04$  с, что соответствует 25 кадрам в секунду. В некоторых разработках в качестве исходного изображения используется не полный кадр, а каждое из двух полей, получаемых при чересстрочной развертке ТВ раstra. В этом случае время цикла обработки уменьшается до  $\Delta t = 0,02$  с, а быстродействие электронного контура увеличивается вдвое, но вдвое ухудшается вертикальное разрешение изображения, поступающего на вход селектора объекта.

Для достоверной оценки качества работы ТВ координатора в модели вводится обобщенный аргумент  $\xi_i$ , характеризующий состав от двух источников ошибки координат – дискретности и чересстрочности раstra.

Зона поиска  $\pm\delta$  ограничивает значения приращений координат, которые, в свою очередь, ограничивают допустимые динамические возмущения мобильной ОЭС. Поэтому для выявления пределов возможностей работы системы в модели используется гармонический сигнал возмущения с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [1].

$$\varphi_i = A \sin \left[ 2\pi f_0 i \Delta t + \pi m \frac{(i \Delta t)^2}{T^2} \right], \quad (2)$$

где  $T$  – длительность реализации;  $A$  – амплитуда сигнала;  $f_0$  – начальная частота ЛЧМ сигнала;  $i$  – переменная времени:  $i = 1, \dots, \frac{T}{\Delta t} - 1$ ;  $m$  – база ЛЧМ сигнала;  $\Delta t$  – шаг дискретности цикла обработки.

На рис. 2 приведён график временной зависимости сигнала с ЛЧМ, подаваемого на вход модели.

Параметры ограничителя задаются следующим образом:

$$\delta = n \cdot \frac{\theta}{z}, \quad (3)$$

где  $n$  – число, задаваемое на основе алгоритма селекции объекта;  $\theta$  – угол зрения оптического средства (в граду-

сах);  $Z$  – число ТВ элементов, заключённых в угле  $\theta$ .

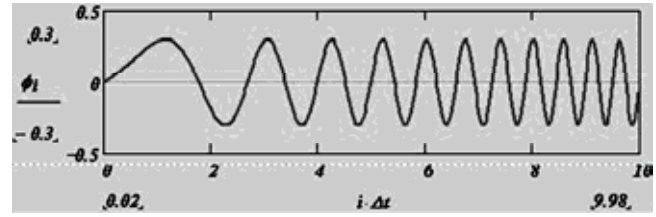


Рис. 2. Входной сигнал с линейно-частотной модуляцией

В электронном контуре осуществляется идентификация объекта и формирование координат. Минимальное время обработки изображения соответствует  $\Delta t$  – времени одного цикла работы системы, поэтому в структурную схему вводится компонент задержки  $Z-1$  общий для всего электронного контура.

Окончательное формирование координаты  $y$  по (1)

осуществляется на накопителе  $\frac{z}{z-1}$ . При этом прохождение сигнала  $u_i$  от входа до выхода селектора можно рассматривать как

$$y_i = u_{i-1}. \quad (4)$$

Внешний контур координатора обладает инерционностью, поэтому его передаточная функция представляется аperiодическим звеном вида

$$w(p) = \frac{k}{T_f p + 1}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент усиления в тракте привода;  $T_f$  – постоянная времени звена;  $p$  – оператор Лапласа.

Известны другие подходы к моделированию передаточной функции внешнего контура, например [2, 3]. Любая модель стремится приблизиться к свойствам реального электромеханического привода системы. Тем не менее, в каждом варианте главными исходными данными являются: постоянная времени звена обратной связи; коэффициент усиления тракта и период дискретизации сигнала управления.

Применяя явный метод Эйлера представления производной [4] для сигнала  $s_i$  (см. рис. 1) на выходе передаточного звена  $w(p)$ , получаем следующее уравнение в дискретной форме:

$$s_{i+1} = s_i + \left[ \frac{(y_i \cdot k) - s_i}{T_f} \right] \cdot \Delta t. \quad (6)$$

В выражении (6) значение  $y_i$  не определено, но, как следует из структурной схемы,

$$u_i = \varphi_i - s_i. \quad (7)$$

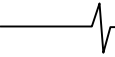
Поэтому, подставляя (7) в (6), с учётом (4), получаем окончательное разностное уравнение

$$s_{i+1} = s_i + \left[ \frac{(\varphi_{i-1} - s_{i-1})k - s_i}{T_f} \right] \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Сигнал, поступающий на вход ограничителя, можно определить, используя значение  $u_i$  из (7) и  $y_i$  из (4),

$$u'_i = u_i - y_i. \quad (9)$$

Условия прохождения сигнала  $u'_i$  через ограничитель и осуществление останова по критерию достижения



пределов  $\pm\delta$  выполняются оператором «until», который в системе MathCAD представляется следующим образом:

$$lu'_i = \text{until} \left[ - \left[ (u'_i < -\delta) \vee (u'_i > \delta) \right], u'_i \right] \quad (10)$$

Диаграмма сигнала  $lu'_i$  (рис. 3) иллюстрирует пределы области динамических возмущений, допустимых для траектории мобильной ОЭС.

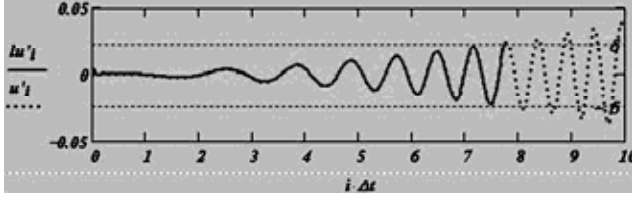


Рис. 3. Иллюстрация срыва автосопровождения (граница с пунктирной линией) при достижении границ ограничителя  $\pm\delta$

Дальнейшая процедура заключается в определении граничной частоты  $f_m$ , выше которой слежение срываетеся. Частоту  $f_m$  найдем, используя полную фазу входного сигнала (2), которая для ЛЧМ сигнала выражается как

$$\psi(t) = 2\pi f_0 t + \pi m \frac{t^2}{T^2}, \quad (11)$$

а ее производная записывается в виде [5]:

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = 2\pi f_0 + \frac{\pi \cdot m}{T^2} \cdot 2t. \quad (12)$$

В дискретной форме выражение (12) запишется как

$$\omega_i = 2\pi f_0 + \frac{\pi m}{T^2} \cdot 2i\Delta t. \quad (13)$$

Искомая частота  $f_m$  определяется следующим образом:

$$fm = \frac{\omega_i}{2\pi} = f_0 + \frac{m}{T^2} \cdot i\Delta t. \quad (14)$$

Рассматриваемая математическая модель выполнена в системе MathCAD. Ниже приводятся результаты моделирования, полученные для разных внешних влияющих факторов и режимов внутренних параметров контура слежения.

Для задания параметров модели следящей системы необходимо установить критерий устойчивости, в соответствии с которым добротность внешнего контура должна быть меньше добротности внутреннего. Добротность электронного контура соответствует частоте циклов  $f_c$  или

$$f_c = \frac{1}{\Delta t} \quad [1/c]. \quad (15)$$

Аналогичный параметр для внешнего контура определяется его передаточной функцией (5). Для этого производится обратное преобразование Лапласа:

$$L^{-1} \left\{ \frac{k}{Tf \cdot p + 1} \right\} = \frac{k}{Tf} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{Tf}} = Q \quad [1/c], \quad (16)$$

где  $\frac{k}{Tf}$  – добротность по [6], а множитель  $e^{-\frac{\Delta t}{Tf}}$  – учёт периода дискретизации управляющего сигнала в замкнутом контуре.

Критерием устойчивости контура является выполнение неравенства

$$Q < f_c \quad \text{или} \quad C = \frac{f_c}{Q} > 1. \quad (17)$$

Как было показано, квантование и дискретизация видеосигнала приводят к возникновению координатной ошибки  $\xi_{1i} = \pm 1$  т.э. С учётом чересстрочной структуры раstra координатная ошибка может возрасти до  $\xi_{2i} = \pm 2$  т.э. (особенно при низких контрастах изображения). На каждом интервале  $\Delta t$  возникает одна из этих ошибок так, что помеха в целом  $\xi_i$  выражается суммой  $\xi_i = \xi_{1i} + \xi_{2i}$  (рис. 4).

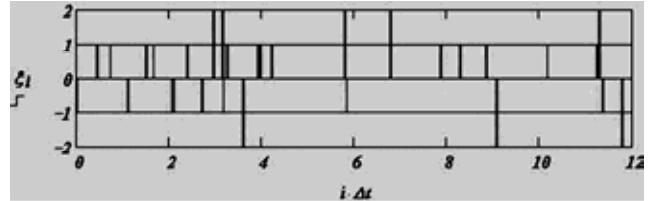


Рис. 4. Временная диаграмма обобщённой помехи

В модели задавались вероятностные характеристики помех, сопоставимые с существующими в реальных системах. В данной реализации длительностью  $Tr = 12$  с, вероятность возникновения одиночной помехи за время  $\Delta t$  составляет

$$P_1 = \frac{1}{Tr} \cdot \sum_i |B_{1i}| \cdot \Delta t \quad (P_1 = 0,035), \quad (18)$$

где  $B_{1i}$  – вектор помехи в  $\pm 1$  т.э., а вероятность возникновения двойной помехи за тот же период времени составляет

$$P_2 = \frac{1}{Tr} \cdot \sum_i |B_{2i}| \cdot \Delta t \quad (P_2 = 0,013), \quad (19)$$

где  $B_{2i}$  – вектор помехи в  $\pm 2$  т.э.

Более достоверные результаты вероятностей  $P_1$  и  $P_2$  получены при выборе длительностей реализаций, равных 200 секундам, но и в этом случае отношение  $P_1/P_2$  сохраняется в ранее полученных пределах.

Данная помеха является составной частью сигнала  $u'_i$ , поэтому сигнал  $lu'_i$  в (10) следует переписать как  $lu'_i = lu'_i + \xi_i$ .

Влияние помех при определении максимально допустимой частоты  $f_m$  возмущения мобильной ОЭС по (14) видно из диаграмм, приведённых на рис. 5 и 6, реализованных при равных прочих условиях:

$$Tf = 0,4 \text{ с}; \quad k = 7; \quad \Delta t = 0,02 \text{ с}; \quad A = 0,2^\circ; \quad f_0 = 0,1 \text{ Гц}.$$

В зависимости от момента воздействия одинарной или двойной помехи величина  $f_m$  будет определять допустимую угловую скорость

$$\Omega m = A 2\pi f_m. \quad (21)$$

На рис. 6 помеха от чересстрочности вывела сигнал  $u'_i$  за пределы границы  $-\delta$  раньше, чем на рис. 5, сократив тем самым допустимую угловую скорость линии визирования. Следует учитывать ещё один важный фактор. Значение  $f_m = 1,434$  Гц достигнуто благодаря монотонному нарастанию входной частоты  $f$ , начиная от значения  $f_0 = 0,1$  Гц. При повышении параметра  $f_0$ , например, до значения 0,4 Гц с большой вероятностью происходит срыв слежения в момент включения системы из-за

наличия больших угловых ускорений в переходных процессах. Этот факт устанавливает связь между величинами уровней  $\pm \delta$  и допустимым угловым ускорением линии визирования.

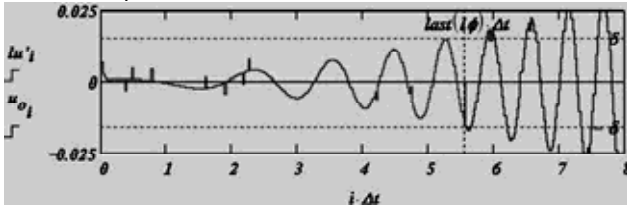


Рис. 5 Сигнал  $u'$  с аддитивной помехой и параметры-1 в момент срыва слежения ( $f_m = 1,434$  Гц,  $\Omega_m = 1,803^\circ/\text{с}$ )

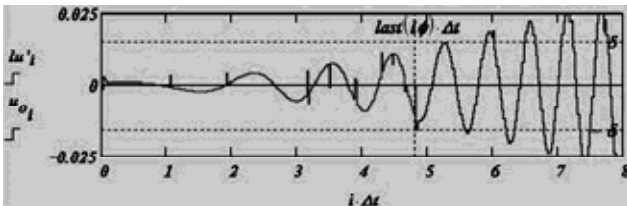


Рис. 6 Сигнал  $u'$  с аддитивной помехой и параметры-2 в момент срыва слежения ( $f_m = 1,257$  Гц,  $\Omega_m = 1,579^\circ/\text{с}$ )

Подставив в (15) и (16) значения параметров, установленных при получении  $f_m$  и  $\Omega_m$  на рис. 5 и 6, можно определить запас устойчивости контура по (17):  $C = \frac{f_c}{Q} = 3,0$ .

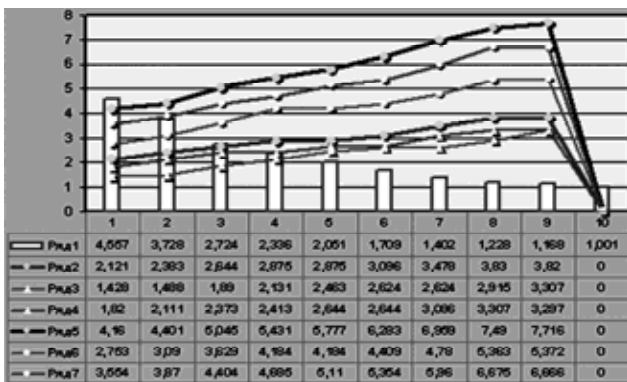


Рис. 7. Диаграммы допустимых угловых скоростей

Далее приводятся результаты, полученные при разных сочетаниях параметров системы и неизменной вероятности возникновения помех. При проведении эксперимента (рис. 7) установлены следующие параметры:  $A = 0,4$ ;  $\Delta t = 0,02$  с;  $f_0 = 0,1$  Гц. Для получения достоверных результатов при определении минимальных и максимальных угловых скоростей в зависимости от величины  $\xi$ , реализации модели воспроизводились 20 раз для каждого отсчёта каждой диаграммы и двух режимов параметра  $\Delta t$ . Параметры  $T_f$  и  $k$  подбирали таким образом, чтобы было можно построить ряд по параметру  $C$  из (17), убывающий до уровня неустойчивости системы (на рис. 7 – гистограмма – «Ряд 1»). При этом ряды 2 и 5 иллюстрируют допустимые угловые скорости линии визирования в зависимости от запаса устойчивости  $C$  и в отсутствии импульса помехи в моменты определения  $f_m$  для  $\Delta t = 0,02$  с и  $\Delta t = 0,01$  с соответственно:

– ряды 3 и 6 – вероятностные угловые скорости в моменты воздействия импульсной помехи от чересстрочной развёртки;

– ряды 4 и 7 – вероятностные угловые скорости в моменты воздействия импульсной помехи от прогрессивной развёртки.

**Заключение**

Анализ результатов проведённых исследований показывает, что использование чересстрочной развёртки телевизионного изображения препятствует достижению максимальной угловой скорости из-за помех, обуславливаемых не только дискретностью раstra, но и смещением ТВ полей, удваивающих величину координатной ошибки. В то же время, двукратное увеличение частоты ТВ кадров (до  $\Delta t = 0,01$  с) позволяет вдвое увеличить достижимую угловую скорость линии визирования. Таким образом, применение телевизионного вещательного стандарта не позволяет в ТВ координаторе обеспечить достижения лучших параметров. ТВ развёртка должна быть прогрессивного типа, а с повышением частоты кадров повышаются динамические характеристики системы автосопровождения объектов.

В режиме автосопровождения при заданных малых значениях ограничителя зоны поиска  $\delta$  в контуре слежения можно обеспечить лишь невысокие значения угловых ускорений. Это следует учитывать при определении возможностей траекторного пути мобильной ОЭС. Значение  $\delta$  может быть увеличено в зависимости от типа объектов, а также путем создания новых эффективных алгоритмов идентификации объектов.

**Литература**

- Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризованный курс: Учебное пособие. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 432 с. (Высшее образование).
- Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е, Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
- Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов / Учебно-методический комплекс. Версия 1.0. – Челябинск, 1995–2011. – файлов 489, ил. См. [http://epla.susu.ac.ru/vsg\\_udk.htm](http://epla.susu.ac.ru/vsg_udk.htm).
- Бабенко К.И. Основы численного анализа. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 848 с.
- Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988 – 448 с.
- Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. – изд. «Наука», Москва, 1970 г.

**QUALITY ASSESSMENT OF TV (IR) COORDINATOR OPERATION IN OBSERVING AND SECURITY SYSTEMS**

*Arzoumanian E.P., Mikolaychuk D.V., Zubarev Y.B.*

This article describes one of methods for estimating parameters of television (or infrared) autotracking systems and which provides area observation within visual angle of mobile optoelectronic system. Results of mathematic modeling with considered external influencing factors and different modes of tracking circuit are presented.