
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 536.8:621.384

А. Л. АНДРЕЕВ, В. В. КОРОТАЕВ

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГОТОВЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ МОДУЛЕЙ

Рассматриваются вопросы, связанные со спецификой использования готовых телевизионных модулей в составе оптико-электронных видеоинформационных систем. Даны рекомендации по габаритно-энергетическому расчету в условиях ограниченности исходных данных о параметрах фотоприемных устройств, входящих в состав бескорпусных одноплатных камер.

Ключевые слова: видеоинформационные системы, габаритно-энергетический расчет, комплексное моделирование.

При проектировании оптико-электронных видеоинформационных систем (ОЭВС) обработки изображений возможно использовать готовые телевизионные модули, в частности бескорпусные одноплатные камеры на основе твердотельных матричных фотоприемных устройств. Это значительно упрощает процесс создания аппаратных средств и конструкции разрабатываемых систем.

В общем случае при проектировании ОЭВС с телевизионными анализаторами изображения требуется учитывать большое число факторов, связанных с физическими процессами, протекающими в различных звеньях, в частности входные оптические воздействия наблюдаемых объектов и фоновых помех; формирование изображения оптической системой; процессы, связанные с формированием зарядового рельефа в фотоприемном устройстве, учитывающие внутренние нестационарные шумы; искажения, возникающие в результате преобразования и квантования сигналов в блоке АЦП при ограниченной разрядности, а также алгоритмы цифровой обработки, включающие предварительную фильтрацию исходных массивов цифрового изображения, процедуры обнаружения, распознавания и оценки параметров объектов наблюдения. Таким образом, речь идет о необходимости учета множества взаимосвязанных детерминированных и случайных процессов, описываемых различными законами распределения. Заметим, что чисто аналитические методы расчета этих процессов, в той или иной степени предопределяющих метрологические и иные параметры и характеристики ОЭВС, порой становятся весьма затруднительными и малорезультативными.

Современные компьютерные технологии позволяют путем моделирования достаточно эффективно решать задачу оптимизации параметров отдельных звеньев и прогнозировать уже на ранней стадии проектирования поведение системы в реальных условиях функционирования. В работе [1] представлена структура модели, используемой для

синтеза, анализа и прогнозирования работы оптико-электронной системы наблюдения за малоразмерными подвижными объектами. Высокоточное измерение координат изображений малоразмерных (точечных) объектов на фоточувствительной поверхности телевизионного анализатора является довольно распространенной задачей при создании целого ряда ОЭВС для определения пространственного положения и пространственной ориентации контролируемых объектов. К подобным системам относятся, например, астродатчики, оптико-электронные датчики деформаций, датчики линейных смещений, угловой ориентации и др.

В общем случае при моделировании требуется большое количество исходных данных. Однако при проектировании ОЭВС на готовых телевизионных модулях разработчикам часто приходится довольствоваться ограниченной информацией о параметрах используемых бескорпусных одноплатных камер. Фирмы-производители готовых телевизионных модулей обычно не указывают величину и характер неравномерности распределения темновых токов накопления зарядов, степень и характер распределения неравномерности чувствительности по кристаллу. Эти параметры предопределяют аддитивную и мультипликативную составляющие „геометрического“ шума телевизионного датчика. Как правило, отсутствуют сведения об уровне отдельных видов шумов (шумы переноса, детектирования зарядов и усиления видеосигнала). Для выполнения габаритно-энергетического расчета ОЭВС имеются лишь косвенные сведения о пороговой чувствительности, которая может быть оценена следующим образом:

$$E_{v\text{пор}} = E_v / \mu_0 \text{ лк}, \quad (1)$$

где $E_{v\text{ пор}}$ — пороговое значение освещенности в световых величинах, определяемое по паспортному источнику; E_v — значение освещенности по паспортному источнику при стандартном времени экспозиции (накопления сигнала), для телевизионных систем $T_{\text{п}} = 20$ мс при номинальном значении отношения сигнал/шум μ_0 .

Основным рассчитываемым параметром является эффективный диаметр входного зрачка, который обычно обеспечивает требуемый уровень освещенности в изображении объекта. Рассмотрим вариант расчета диаметра входного зрачка оптико-электронного датчика угловых координат точечного объекта, наблюдаемого на значительном расстоянии S (рис. 1, Ω — часть телесного угла излучения источника, попадающего на входной зрачок, $\Omega_{\text{и}}$ — телесный угол излучения источника, $D_{\text{вх}}$ — диаметр входного зрачка объектива, Ψ_{max} и χ_{max} — максимальные значения угловых координат объекта, a — размер фоточувствительной площадки ФПУ, f — расстояние от объектива до плоскости фокусировки изображения).

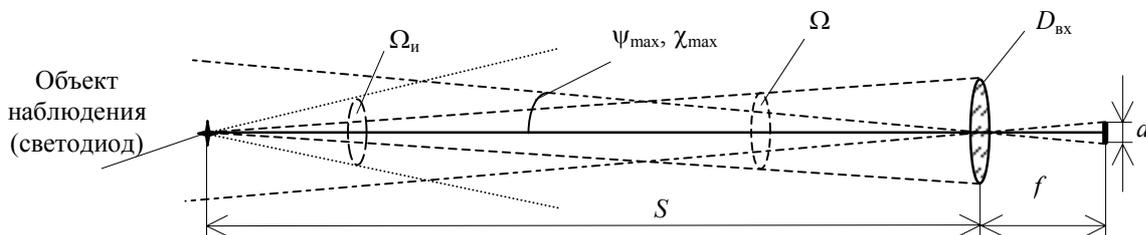


Рис. 1

Величину оптического сигнала (выраженного через экспозицию), который будет создавать объект наблюдения на фоточувствительной площадке матричной фоточувствительной структуры (ФПЗС), можно найти из известного выражения для энергии экспозиции $H_{e\text{из}}$:

$$H_{e\text{из}} = E_{e\text{из}} T, \quad (2)$$

где $E_{e\text{из}}$ — энергетическая освещенность в изображении объекта, которая определяется как

$$E_{e \text{ из}} = \Phi_{e \text{ из}} / A_{\text{из}} = \Phi_{e \text{ вх}} \tau / (\pi D_{\text{из}}^2 / 4), \quad (3)$$

где $\Phi_{e \text{ из}}$ — поток излучения, создающий изображение объекта; $\Phi_{e \text{ вх}}$ — поток излучения, попадающий от объекта на входной зрачок объектива; τ — коэффициент пропускания излучения оптической системой; $A_{\text{из}}$ — площадь изображения объекта; $D_{\text{из}}$ — диаметр изображения объекта; T — фактическое время накопления.

В свою очередь поток излучения, попадающий на входной зрачок, будет

$$\Phi_{e \text{ вх}} = E_{e \text{ вх}} A_{\text{вх}} = E_{e \text{ вх}} \pi D_{\text{вх}}^2 / 4, \quad (4)$$

где $E_{e \text{ вх}}$ — облученность, создаваемая объектом на входном зрачке; $A_{\text{вх}}$ — эффективная площадь входного зрачка.

Облученность, создаваемую удаленным точечным объектом на входном зрачке объектива на расстоянии S , можно определить через энергетическую силу излучения объекта I_e

$$E_{e \text{ вх}} = \frac{I_e \cos \alpha}{S^2} = \frac{\Phi_{e \text{ и}} \cos \alpha}{\Omega_{\text{и}} S^2}, \quad (5)$$

где $\Phi_{e \text{ и}}$ — поток излучения объекта; α — максимальный угол падения лучей от объекта на плоскость входного зрачка на краю поля зрения (в нашем случае $\alpha \approx \psi$ или $\alpha \approx \chi$).

Подставив выражения (3)—(5) в соотношение (2), получим

$$H_{e \text{ из}} = \frac{\Phi_{e \text{ и}} D_{\text{вх}}^2 \tau T \cos \alpha}{\Omega_{\text{и}} S^2 D_{\text{из}}^2}. \quad (6)$$

С другой стороны, величина экспозиции излучения объекта, которая должна быть создана на фоточувствительной площадке ФПУ, для достижения требуемой точности измерения координат должна быть

$$H_{e \text{ из}} = H_{e \text{ пор}} \mu = E_{e \text{ пор}} T \mu, \quad (7)$$

где $H_{e \text{ пор}}$ и $E_{e \text{ пор}}$ — соответственно пороговые экспозиция и облученность на фоточувствительной площадке ФПУ, при которых величина полезного сигнала численно равна уровню шумов; μ — требуемое отношение сигнал/шум, при котором значение погрешности измерения любого параметра не превышает допустимого.

Поскольку в справочниках для выбранного фотоприемника значение пороговой освещенности дается не в оптической [Вт/м²], а в световой [лк] системе единиц, причем с „привязкой“ к паспортному источнику излучения типа „А“ при стандартном времени экспозиции $T_{\text{п}}=20$ мс, то в окончательном виде выражение (7) примет вид

$$H_{e \text{ из}} = E_{\text{в}} T_{\text{п}} \mu \chi_{\text{п}} / (\chi_{\text{р}} K_{\lambda \text{ max}}), \quad (7a)$$

где $\chi_{\text{п}}$ и $\chi_{\text{р}}$ — соответственно коэффициенты использования фотоприемником паспортного и реального источников; $K_{\lambda \text{ max}} = 683$ лм/Вт — коэффициент максимальной спектральной эффективности глаза.

Приравняв правые части выражений (6) и (7a) с учетом (1) и решив полученное уравнение, получим следующее соотношение для расчета диаметра входного зрачка объектива:

$$D_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{E_{\text{в}} T_{\text{п}} \mu \chi_{\text{п}} \Omega_{\text{и}} S^2 D_{\text{из}}^2}{\mu_0 \Phi_{e \text{ и}} \tau T \cos \alpha \chi_{\text{р}} K_{\lambda}}}. \quad (8)$$

Коэффициенты $\chi_{\text{п}}$ и $\chi_{\text{р}}$ могут быть рассчитаны по известной методике [2].

В формуле (8) остаются не определенными параметры μ и $D_{\text{из}}$, их оптимальные значения могут быть найдены путем моделирования. В работе [3], например, описана методика, позволяющая определять значение μ , при котором случайная „шумовая“ составляющая погрешности измерения координат энергетического центра изображения точечного объекта не превышает допустимой величины. С помощью той же методики могут быть обоснованы оптимальные значения радиуса кружка рассеяния при аппроксимации весовой функции объектива гауссоидой вращения

$$E(x, y) = (\Phi_{e_{\text{из}}} / 2\pi R^2) \exp\left\{-\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\right] / 2\pi R^2\right\}, \quad (9)$$

где R — радиус кружка рассеяния, определяемый на уровне $E_{\text{max}} / \sqrt{e}$; x_0 и y_0 — координаты энергетического центра изображения. При выбранной аппроксимации $D_{\text{из}}$ в выражении (8) и R в выражении (9) связаны следующим соотношением: $D_{\text{из}} = 2,83R$.

На рис. 2 приведена зависимость средней квадратической погрешности σ измерения координат изображения точечного объекта от отношения сигнал/шум (d — пространственный период элементов ФПУ; N — число разрядов АЦП). В табл. 1 приведены значения $\sigma/d = f(\mu)$ при $R/d = 1$. Зависимости на рис. 2 показывают, что при больших значениях μ на погрешность измерения в гораздо большей степени оказывают влияние другие факторы, например, „шумы квантования“ видеосигнала в АЦП или „шумы дискретизации“ изображения вследствие конечности размеров фоточувствительных элементов телевизионного анализатора изображения.

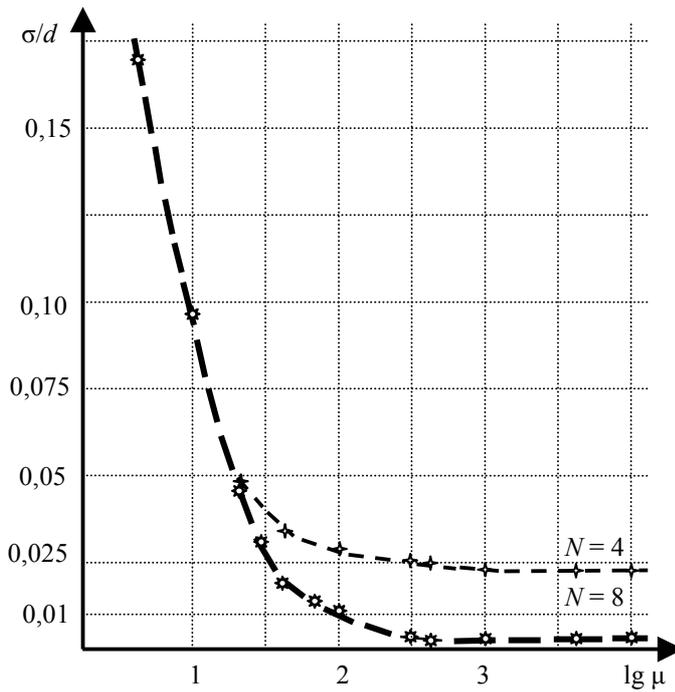


Рис. 2

Таблица 1

μ	$\sigma/d = f(\mu)$	
	$N = 4$	$N = 8$
5	0,179	0,178
10	0,094	0,094
20	0,047	0,047
30	0,039	0,034
50	0,031	0,020
100	0,030	0,011
300	0,026	0,005
500	0,0235	0,0037
1000	0,0233	0,0031
5000	0,0233	0,0031
10 000	0,0233	0,0032

На рис. 3 представлена зависимость средней квадратической погрешности измерения координат изображения точечного объекта от размеров пятна рассеяния. В табл. 2 даны значения $\sigma/d = f(R/d)$ при $N = 8$. Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 3, оптимальный размер радиуса кружка рассеяния (в соответствии с принятой аппроксимацией весовой функции объектива) находится в пределах $R/d = 0,5—0,7$. Резкое увеличение погрешности при малых значениях R обусловлено появлением зон координатной нечувствительности системы, когда размеры изображения меньше размеров фоточувствительных элементов. Очевидно, что в случае наблюдения за точечным объектом размеры и

вид изображения на фоточувствительной поверхности определяются исключительно весовой функцией оптической системы.

На рис. 4 представлена зависимость средней квадратической погрешности измерения координат изображения точечного объекта от числа разрядов двоичного кода. В табл. 3 даны значения $\sigma/d = f(N)$ при $R/d = 1$. Зависимости, приведенные на рис. 4, позволяют выбрать разрядность аналого-цифрового преобразователя, при которой влияние «шумов квантования» становится пренебрежимо малым по сравнению с влиянием других источников помех.

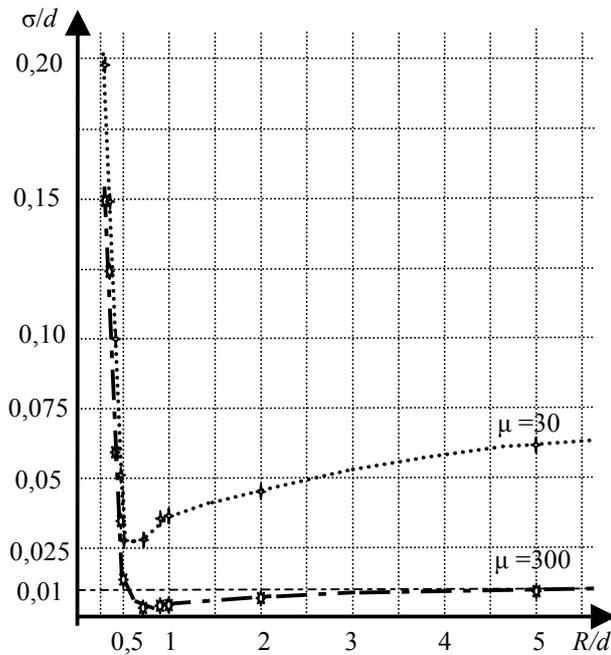


Рис. 3

Таблица 2

R/d	$\sigma/d = f(R/d)$	
	$\mu = 30$	$\mu = 300$
0,3	0,15	0,189
0,35	0,1	0,152
0,4	0,06	0,107
0,45	0,03	0,542
0,5	0,027	0,015
0,7	0,0275	0,0044
0,8	0,0358	0,0051
1,0	0,0377	0,0053
2,0	0,0436	0,0068
5,0	0,0717	0,0092
10,0	0,089	0,0153

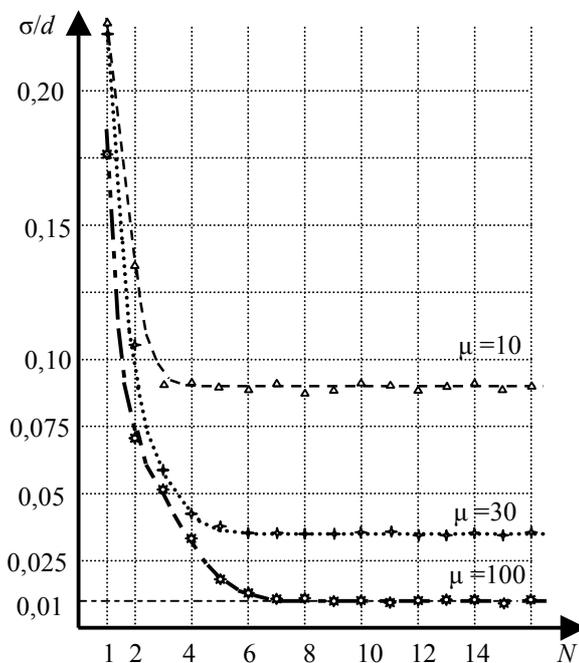


Рис. 4

Таблица 3

N	$\sigma/d = f(N)$		
	$\mu = 10$	$\mu = 30$	$\mu = 100$
1	0,312	0,233	0,177
2	0,135	0,114	0,065
3	0,094	0,057	0,055
4	0,092	0,042	0,029
5	0,089	0,038	0,017
6	0,086	0,035	0,0135
8	0,091	0,036	0,0120
10	0,093	0,038	0,0112
12	0,088	0,034	0,0123
16	0,090	0,035	0,0132

Заметим, что в случае наблюдения за объектами в условиях сильно меняющейся в поле зрения фоновой составляющей, которую необходимо сохранить в цифровом изображении для последующей обработки, разрядность АЦП должна быть увеличена в соответствии с выражением

$$N_{G+F} = N + \lceil \log_2 \{ (G_{\max} + F_{\max}) / G_{\max} \} \rceil, \quad (10)$$

где N_{G+F} — число разрядов АЦП, определяемое с учетом необходимости сохранения в цифровом изображении фоновой составляющей; N — число разрядов, достаточное для кодирования сигнальной составляющей; G_{\max} и F_{\max} — максимальные значения сигнальной и фоновой составляющих в видеосигнале; знак $\lceil Z \rceil$ означает округление числа Z до ближайшего целого в большую сторону.

Представленные результаты получены путем компьютерного моделирования при использовании алгоритма измерения координат энергетического центра изображения точечного объекта. Сравнительные результаты моделирования в случае использования других, более сложных, алгоритмов цифровой обработки сигнала приведены, например, в работе [4].

При выбранном фокусном расстоянии оптической системы связь между численными значениями измеряемых угловых координат объекта Ψ и χ (выраженными в радианах) и координатами изображения x и y (выраженными в числе пространственных периодов чувствительных элементов ФПУ), устанавливается соотношениями

$$\operatorname{tg} \psi = xd/f; \quad \operatorname{tg} \chi = xd'/f, \quad (11)$$

где d и d' — пространственный период матрицы элементов ФПЗС по горизонтали и вертикали соответственно. Очевидно, что подобное соотношение устанавливает связь между средними квадратическими погрешностями измерения угловых координат объекта $\sigma\Psi$, $\sigma\chi$, с одной стороны, и σx и σy — с другой.

Оптимальное значение f определяется исходя из размеров фоточувствительной площадки ФПУ и поля зрения системы, определяемого заданным диапазоном измерения угловых координат объекта

$$f = a/2\operatorname{tg} \psi_{\max} \quad \text{или} \quad f = a'/2\operatorname{tg} \chi_{\max}, \quad (12)$$

где a и a' — размеры фоточувствительной площадки ФПУ по горизонтали и вертикали соответственно.

Проанализировав результаты исследований моделей, можно сделать следующие выводы.

1. При реализации квазиинвариантных схем контроля позиционирования точечных объектов при условии использования алгоритма энергетического взвешивания приведенная средняя квадратическая погрешность измерения координат изображения точечного объекта σ/d , обусловленная действием случайного шума, изменяется приблизительно обратно пропорционально отношению сигнал/шум (см. рис. 2). При больших отношениях сигнал/шум на погрешность измерения в значительно большей степени оказывают влияние другие факторы, например, искажения в АЦП или „шумы дискретизации“ изображения вследствие конечности размеров элементов фотоприемного устройства.

2. Оптимальный диаметр изображения, определяемый на уровне $E_{\max}/\sqrt{e} \approx 0,6E_{\max}$ при аппроксимации весовой функции объектива гауссоидой вращения, находится в пределах $(1,5—2)d$. Дальнейшее увеличение диаметра изображения объекта на фотоприемной матричной структуре не дает уменьшения средней квадратической погрешности измерения координат изображения точечного объекта (рис 3).

3. Достаточная разрядность двоичного кода АЦП, при которой уровень „шумов квантования“ видеосигнала становится пренебрежимо малым, зависит от степени влияния других видов помех (шумы ФПУ, „шумы дискретизации“ изображения и др.). Так, например, при отношении сигнал/шум на входе АЦП $\mu = 10$ увеличение числа разрядов более 5 уже не приводит к снижению погрешности измерения координат обнаруженного объекта, при $\mu = 100$ достаточным числом является $N = 8$ (см. рис 4). Однако в случае наблюдения за объектами в условиях сильно меняющейся в поле зрения фоновой составляющей разрядность АЦП должна быть увеличена в соответствии с выражением (10).

Работа выполнялась в рамках НИР программы „Развитие научного потенциала высшей школы“ и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев А. Л., Тоткайло С. В.* Комплексная модель оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Сб. тр. VII Междунар. конф. „Прикладная оптика-2006“. Т. 1. Оптическое приборостроение. СПб, 2006. С. 48—52.
2. Источники и приемники излучения / *Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Польщиков.* СПб: Политехника, 1991. 240 с.
3. *Андреев А. Л., Ярышев С. Н.* Методы моделирования ОЭС с многоэлементными анализаторами изображения. СПб: ИТМО, 2006. 52 с.
4. *Андреев А. Л.* Сравнение алгоритмов интерполяции сигнала при измерении координат объектов с помощью многоэлементного фотоприемника // Сб. тр. VII Междунар. конф. „Прикладная оптика-2006“. Т. 3. Компьютерные технологии в оптике. СПб, 2006.

Сведения об авторах

- Андрей Леонидович Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: and-andr@yandex.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
19.10.09 г.