

УДК 004.942:519.876.5

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТОЧЕЧНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.Л. Андреев, Т.П. Лбова

Дается описание структуры модели, используемой для синтеза, анализа и прогнозирования работы оптико-электронной системы (ОЭС) телевизионного типа, решающей задачи наблюдения за подвижными объектами в автоматическом режиме. В качестве исходных данных задаются параметры входных воздействий объектов и фоновых помех, параметры оптической системы, фотоприемника, дестабилизирующих факторов, алгоритмов и др.

Ключевые слова: компьютерное имитационное моделирование систем, телевизионные системы наблюдения, обнаружение и измерение координат точечных объектов.

Введение

Целью настоящей статьи является описание принципов построения комплексной математической модели, используемой для синтеза, анализа, прогнозирования работы телевизионной системы наблюдения за малоразмерными подвижными объектами и обоснования требований к отдельным звеньям системы с учетом необходимых эксплуатационных параметров в реальных условиях функционирования.

К числу важных промежуточных задач, которые нужно решить для достижения поставленной цели, относятся, в частности:

- исследование особенностей физических процессов, протекающих в многоэлементных структурах фотоприемных устройств с учетом физических свойств различных фоточувствительных материалов;
- исследование физической природы источников помех, действующих в различных звеньях оптико-электронной системы и др.;
- исследование различных алгоритмов обработки сигналов, используемых для автоматического обнаружения и измерения параметров объектов.

Универсальность модели предполагает возможность ее использования для различных условий функционирования подобных систем – с использованием наземного, космического или иного базирования, различных дистанций наблюдения, энергетических и динамических параметрах объектов и др.

Структура модели

Структура математической модели ОЭС представлена на рис. 1.

Задача моделирования ОЭС разбивается на следующие этапы: моделирование сигнально-фоновой ситуации; моделирование различных видов помех; моделирование процедур предварительной обработки сигнала (с учетом искажений, связанных с квантованием сигналов при аналого-цифровом преобразовании); моделирование различных алгоритмов целевой обработки сигналов (связанных, в общем случае, с решением задач обнаружения, распознавания и оценки параметров исследуемых объектов, а также оценки метрологических параметров проектируемой системы с учетом заданных доверительных интервалов).

Ввод исходных данных осуществляется в интерактивном режиме. При этом вводимые переменные можно подразделить на следующие группы:

- параметры оптической системы;
- параметры фотоприемного устройства;
- параметры алгоритма первичной обработки сигнала;

- условия наблюдения;
- параметры, определяющие режим статистической обработки полученных реализаций.

Предварительная обработка исходных данных предполагает преобразование вводимых величин и формирование на их основе переменных и констант, используемых при моделировании.

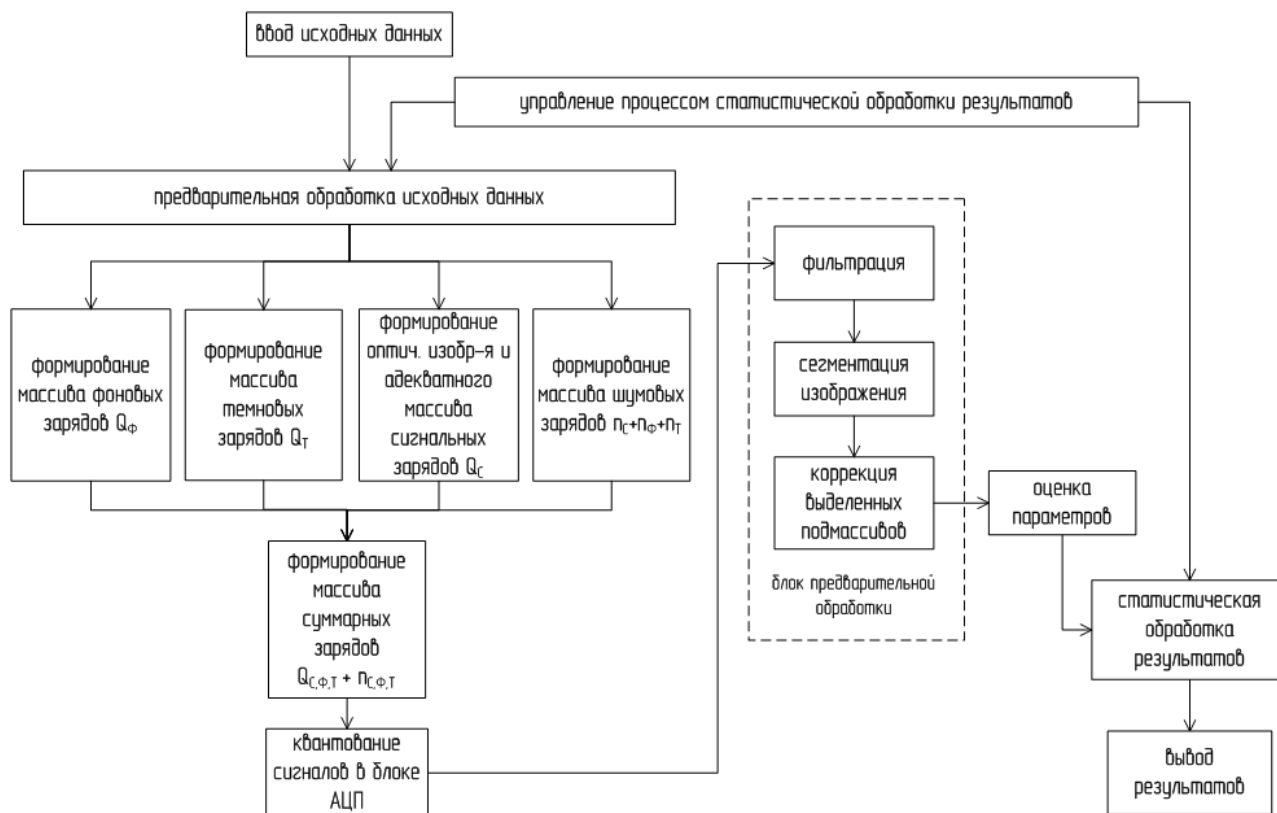


Рис. 1. Структурная схема модели

В общем случае фоновая составляющая сигнала представляет собой случайное поле яркости. Исходным материалом для компьютерного моделирования случайного поля яркости являются независимые числа, полученные генератором случайных чисел ЭВМ. Их совокупность можно рассматривать как случайное δ -поле – обобщение понятия дискретного белого шума на случай нескольких переменных. Моделирование δ -поля осуществляется следующим образом: пространственно-временной координате (x_i, y_j, t_k) ставятся в соответствие выборочные значения из датчика нормальных случайных чисел с параметрами $(0, 1)$.

Для моделирования дискретных реализаций однородного стационарного случайного поля, заданного в конечном пространстве и времени, предлагается использовать метод канонического разложения поля в пространственно-временной ряд Фурье. Неограниченные дискретные реализации однородного стационарного случайного поля можно получить с помощью алгоритма пространственно-временного скользящего суммирования δ -поля [1].

При формировании массива темновых зарядов учитывается аддитивная составляющая «геометрического» шума. Среднее значение темнового заряда, накапливаемого в ячейке, определяется выражением [2]

$$\bar{Q}_T = \bar{i}_T A_{\text{эл}} T_n,$$

где \bar{i}_T – средняя плотность темнового тока накопления заряда, характерная для данного полупроводникового материала при рабочей температуре кристалла; $A_{\text{эл}}$ – площадь электрода, под которым осуществляется накопление.

Формирование массива сигнальных зарядов осуществляется с учетом случайного распределения темновых токов и чувствительности по кристаллу ПЗС с заданным интервалом корреляции «геометрического» шума. Если, например, распределение освещенности от точечного объекта по фоточувствительной площадке аппроксимируется гауссоидой вращения, то распределение сигнальных зарядов определяется в соответствии с выражением

$$E(x_i, y_j) = \frac{\Phi}{2\pi R^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R^2}\right],$$

где Φ – поток оптического излучения, создающего изображение точечного объекта; R – радиус кружка рассеяния объектива, определяемый на уровне $0,606 E_{\text{max}}$; x_0, y_0 – координаты центра пятна рассеяния.

Динамику перемещения наблюдаемых объектов можно задать в параметрическом виде с помощью коэффициентов A, B, C (первой, второй и третьей степени) полинома, аппроксимирующего изменение во времени модуля угловых перемещений объектов

$$S(t) = A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3.$$

Направление перемещения задается посредством угла α между направлением оси X и проекцией вектора скорости в плоскости анализа изображения.

При моделировании массива шумовых составляющих в ячейках ПЗС учитывается совокупность сигнальной, фоновой и темновой составляющих зарядов в каждой ячейке. При этом шумовая составляющая заряда в каждой ячейке определяется путем многократного задания флуктуаций зарядов по случайному закону с заданным распределением с учетом влияния всех вышеперечисленных факторов.

Флуктуация числа зарядов подчиняется закону Пуассона. Однако, поскольку число накапливаемых зарядов достаточно велико ($n_q > 100$), распределение Пуассона можно аппроксимировать нормальным законом распределения с дисперсией, равной среднему значению. Тогда среднеквадратическое значение шума на выходе ФПУ равно

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\sigma_{\text{ш.т}}^2 + \sigma_{\text{ш.ф}}^2 + \sigma_{\text{ш.с}}^2 + \sigma_{\text{ш.г}}^2 + \sigma_{\text{ш.п}}^2 + \sigma_{\text{ш.в.у}}^2},$$

где $\sigma_{\text{ш.т}}$ – среднеквадратическое число зарядов в i -ой ячейке ФПУ, характеризующее флуктуацию числа темновых зарядов; $\sigma_{\text{ш.ф}}$ – среднеквадратическое значение флуктуации числа зарядов, обусловленных фоновым излучением; $\sigma_{\text{ш.с}}$ – среднеквадратическое значение флуктуации числа сигнальных зарядов, накапливаемых в ячейках ФПЗС, характеризующее фотонный шум; $\sigma_{\text{ш.г}}$ – среднеквадратическое отклонение среднего числа темновых зарядов в различных ячейках ФПУ, характеризующее геометрический шум; $\sigma_{\text{ш.п}}$ – среднеквадратическое значение флуктуаций заряда при переносе (для ФПЗС); $\sigma_{\text{ш.в.у}}$ – среднеквадратическое значение шума выходного устройства, пересчитанное к числу зарядов.

В результате выполнения описанных выше процедур формируется массив суммарных зарядов, представляющий собой реализацию двумерного нестационарного случайного процесса, результат моделирования которого иллюстрирует рис. 2.

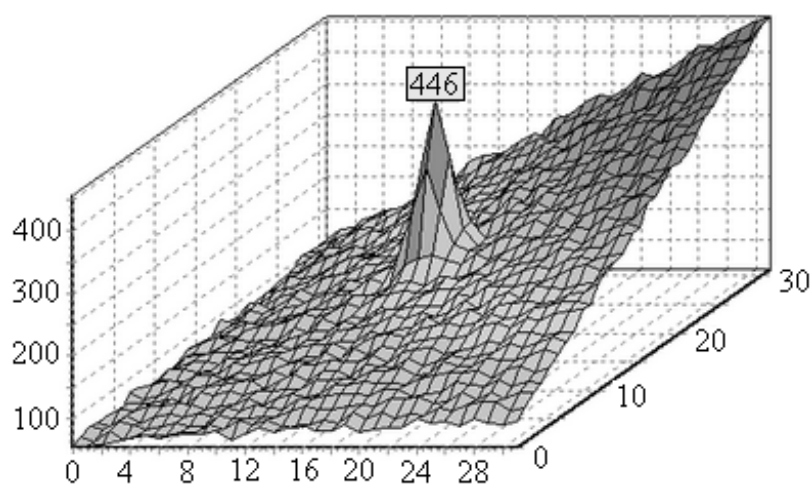


Рис. 2. Распределение освещенности на фоточувствительной площадке ФПУ (по осям X, Y отложены номера пикселей по горизонтали и вертикали)

Квантование сигнала в блоке АЦП осуществляется с учетом заданной разрядности и необходимости согласования динамического диапазона входных уровней АЦП с реальным динамическим диапазоном изменения сигнала на выходе ПЗС. При этом принимается во внимание возможность «привязки» нижнего уровня динамического диапазона АЦП к уровню сигнала, соответствующего минимальному темновому заряду. Максимальный сигнал Q_{\max} , поступающий на АЦП, должен соответствовать $(2^N - 1)$ уровням квантования, где N – разрядность АЦП. Тогда произвольному сигналу Q соответствует k уровней квантования:

$$k = INT\left(\frac{Q \cdot (2^N - 1)}{Q_{\max}}\right).$$

На этапе предварительной обработки сигнала из исходной последовательности чисел, поступающих с выхода АЦП, выделяются и запоминаются подмассивы чисел, соответствующие областям полезного сигнала. В выделенных подмассивах осуществляется компенсация сигнала от фона, который в общем случае может быть неоднородным. Возможные алгоритмы, используемые на стадии предварительной обработки сигнала, подробно описаны в [3].

Оценка координат объектов заключается в вычислении координат характерных точек, связанных с наблюдаемыми объектами, например, энергетических центров их изображений или координат точек, соответствующих максимумам освещенности в изображениях объектов [3]. Если стоит задача нахождения угловых координат объекта ψ и χ (выраженных в радианах), то пересчет координат изображения точечного объекта x и y (выраженных в числе пространственных периодов матричной структуры) осуществляется с учетом следующих соотношений:

$$\operatorname{tg}\psi = x \cdot d / f ; \operatorname{tg}\chi = y \cdot d' / f ,$$

где d и d' – пространственный шаг элементов матричной структуры по горизонтали и вертикали соответственно, f – расстояние от объектива до плоскости фокусировки изображения. Очевидно, что подобное соотношение устанавливает связь между среднеквадратическими погрешностями измерения координат σ_x и σ_y .

Статистическая обработка результатов моделирования включает в себя подсчет числа ложных выбросов, числа пропусков объектов, оценку вероятности пропусков и среднеквадратических погрешностей измерения их координат.

Определение вероятности выделения ложного выброса $P_{\text{лв.}}$ осуществляется методом статистических испытаний.

В режиме «поиск» расчетно-прогнозируемая вероятность выделения ложного выброса в кадре может быть определена по формуле

$$P_{\text{лв.к.}} = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P_{\text{лв.}}(i)], \quad (1)$$

где $P_{\text{лв.}}(i)$ – вероятность ложного выброса в i -м элементе кадра. Поскольку (как указывалось ранее) число зарядов, накапливаемых в ячейках значительно больше 10, то флуктуации зарядов в ячейках можно приблизительно описывать нормальным законом распределения с дисперсией, равной среднему значению накопленных зарядов. При этом вычитание постоянной составляющей, соответствующей среднему числу зарядов, обеспечивается в результате выполнения процедуры «селекция» на этапе предварительной обработки сигнала. Таким образом,

$$P_{\text{лв.}}(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi'}^{\infty} \exp[-x^2/2] dx,$$

где ξ' – относительный порог в разностном сигнале. Учитывая также, что величина относительного порога ξ' для каждого элемента устанавливается одинаковой (благодаря учету «карты» распределения темновых токов и чувствительности по кристаллу на этапе калибровки), можно считать, что $P_{\text{лв.}}(i)$ не зависит от i . Тогда

$$P_{\text{лв.к.}} = 1 - [1 - P_{\text{лв.}}(i)]^N. \quad (2)$$

В режиме «слежение» при вычислении $P_{\text{лв.к.}}$ в выражения (1) или (2) следует вместо числа элементов в кадре N подставлять число элементов N' в стробируемых окнах.

Обработка результатов серии косвенных измерений угловой координаты наблюдаемого объекта ψ сводится первоначально к нахождению результатов измерения \tilde{x} , оценки среднего квадратического отклонения (СКО) результата измерения $S(\tilde{x})$, доверительной границы случайной погрешности результата измерения ϵ_x и доверительной границы неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения θ_x , полученных при обработке прямых измерений [4]. Далее определяется оценка результата косвенного измерения $\psi(x)$ и рассчитывается доверительная граница погрешности результата прямого измерения Δ_x при доверительной вероятности 0,95:

$$\tilde{\psi} = \arctg(x \cdot d / f), \Delta_x = \begin{cases} \epsilon_x & \text{при } \frac{\theta_x}{S(\tilde{x})} < 0,8; \\ \theta_x & \text{при } \frac{\theta_x}{S(\tilde{x})} < 8; \\ KS_{\Sigma} & \text{при } 0,8 < \frac{\theta_x}{S(\tilde{x})} < 8; \end{cases}$$

вычисляются значения частной производной $\frac{\partial \psi}{\partial x}$ при найденной величине \tilde{x} и определяется доверительная граница погрешности результата измерения угловых координат при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$:

$$\Delta_{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \Delta_x.$$

Итог измерения угловой координаты записывается в виде $\psi = \tilde{\psi} \pm \Delta_{\psi}$; $\alpha = 0,95$. Аналогичные расчеты производятся для угловой координаты χ .

Заключение

На базе предложенной методики комплексного моделирования возможно на ранней стадии проектирования проводить анализ степени влияния каждого из физических факторов на обнаружительные, метрологические или иные характеристики ОЭС в целом. Модульная структура позволит проводить дальнейшее совершенствование модели путем дополнения ее необходимыми модулями (с учетом реальных потребностей и условий функционирования ОЭС) или путем замены отдельных модулей на альтернативные варианты без изменения остальных частей и структуры в целом.

Литература

1. Андреев А.Л. Автоматизированные телевизионные системы наблюдения. Часть I. Аппаратные средства и элементная база: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – СПб: СПбГУИТМО, 2005.
2. Андреев А.Л. Автоматизированные телевизионные системы наблюдения. Часть II. Арифметико–логические основы и алгоритмы: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – СПб: СПбГУИТМО, 2005.
3. Андреев А.Л., Ярышев С.Н. Методы моделирования ОЭС с многоэлементными анализаторами изображения: Методические указания к лабораторным работам. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
4. Бегункова А.Ф., Парфенов В.Г. Обработка результатов наблюдений при выполнении лабораторных работ физического практикума: Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1980.
5. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. – СПб: Папирус, 2003.
6. Феррапонтов М.М., Крицына Н.А., Деев Д.Л. Моделирование случайных воздействий на ЭВМ: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 1995.

Андреев Андрей Леонидович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, and-andr@yandex.ru

Лбова Татьяна Павловна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, tlbova@gmail.com