

Компенсация сдвига изображения при съемке с использованием ПЗС в режиме задержки и интегрирования

Б. М. Миллер*, Е. Я. Рубинович**

* Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия

** Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова,
Российская академия наук, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 28.12.06

Аннотация—В работе рассматривается задача компенсации сдвига изображения, вызванного движением камеры, относительно снимаемой поверхности. Камера установлена на подвижном носителе и регистрация изображения осуществляется с помощью матричного фотоприемника на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) в режиме задержки и интегрирования. Показано, что наряду с традиционной электронной компенсацией продольного сдвига изображения возможна компенсация и поперечной скорости сдвига изображения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) широко используются в современных системах аэрокосмической съемки. Известно, что для получения максимального отношения сигнал/шум, и соответственно, высокого уровня разрешения, необходима синхронизация движения носителей заряда со смещением изображения, что обеспечивается в так называемом режиме задержки и интегрирования (*delay-integration-mode*) [1]. Этот режим работы матричного ПЗС характеризуется тем, что скорость движения в изображении в фокальной плоскости объектива должна быть синхронизирована со скоростью переноса зарядовых пакетов вдоль столбцов матрицы ПЗС. Практически эта синхронизация обеспечивается двумя возможными способами, которые могут применяться независимо:

1. движением оптических элементов, или с помощью так называемой *оптико-механической компенсации движения*, или
2. выбором частоты переноса зарядовых пакетов в матрице ПЗС, т.е. с помощью *электронной компенсации*.

Каждый из этих путей имеет свои преимущества и недостатки, например: первый, обеспечивает широкий динамический диапазон компенсируемых скоростей, но относительно низкую точность и быстродействие, в силу большой инерционности движущихся элементов типа зеркал, призм и самого объектива; второй способ обладает высокой точностью и быстродействием, но имеет ограниченный динамический диапазон. Поэтому реальные системы используют оба способ одновременно, что позволяет минимизировать ошибки синхронизации если использовать оба метода оптимальным образом. В данной статье мы рассматриваем задачу оптимальной электронной компенсации, как задачу оптимального управления дискретно-непрерывной системой. В следующем разделе мы рассматриваем общую математическую модель сдвига изображения, затем мы рассматриваем математическую модель обычного и обобщенного режимов задержки и интегрирования и их характеризацию с помощью его функции передачи модуляции. Затем мы выводим закон оптимального управления процессом синхронизации сдвига изображения и в заключении рассматриваем возможные подходы к построению оптимальных систем компенсации сдвига изображения.

2. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СДВИГА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Мы рассматриваем систему регистрации изображения, установленную на подвижном носителе и используемую для фотографирования наблюдаемой, например, земной поверхности с помощью аппаратуры дистанционного зондирования, установленной на авиационном или космическом носителе. При съемке с использованием матричных ПЗС, когда камера движется относительно снимаемого объекта, для повышения отношения сигнал/шум матрица ПЗС работает, обычно как линейка фоточувствительных элементов, а сам аппарат осуществляет сканирование снимаемого участка за счет своего движения. При таком методе съемки осуществляется последовательное суммирование сигналов, регистрируемых каждым элементом в столбце матрицы. Изображение “бежит” по матрице, создавая на выходе весьма значительный поток данных, которые запоминаются в устройствах памяти или передаются в реальном масштабе времени. При проектировании подобных систем, как правило, возникает проблема согласования скорости съемки с движением аппарата, так как слишком высокая скорость относительного движения требует уменьшения времени экспозиции и соответственно сильно сокращает динамический диапазон аппаратуры по условиям освещенности. В тоже время, многие современные аппараты имеют возможность динамического отслеживания снимаемого участка путем изменения направления линии визирования для замедления скорости сдвига изображения вдоль столбцов матрицы ПЗС, как показано на Рис. 1. При такой организации процесса съемки скорость сдвига изображения образует в фокальной плоскости переменное поле скоростей, которое зависит от текущей ориентации оптической оси, определяемой углами $\theta(t)$, $\phi(t)$ и расстояния до объекта съемки $H(t)$. Общий метод расчета поля скоростей при произвольном взаимном расположении камеры и объекта съемки основан на использовании функциональных соотношений, связывающих координаты точки в фокальной плоскости объектива (ξ, η) и оптически сопряженной ей точки (x, y) в плоскости наблюдаемого объекта в текущий момент времени t . Предполагается, что координата ξ соответствует смещению вдоль направления собственного движения камеры, (например, направления полета при аэрофото-съемке), а координата η поперечному направлению, соответственно. Если прямые соотношения заданы в форме

$$x = x(\xi, \eta, t), \quad y = y(\xi, \eta, t), \quad (1)$$

то для любого t существует обратное преобразование

$$\xi = \xi(x, y, t), \quad \eta = \eta(x, y, t), \quad (2)$$

а компоненты скорости сдвига изображения (V_ξ, V_η) в фокальной плоскости объектива вычисляются следующим образом [3]-[5]

$$\begin{pmatrix} V_\xi(\xi, \eta, t) \\ V_\eta(\xi, \eta, t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial t} \\ \frac{\partial y}{\partial t} \end{pmatrix} \Bigg|_{x=x(\xi, \eta, t), \quad y=y(\xi, \eta, t)}. \quad (3)$$

Для конкретных зависимостей функций (x, y) от t и элементов ориентации объектива, соотношение (3) может быть преобразовано к виду

$$\begin{pmatrix} V_\xi(\xi, \eta, t) \\ V_\eta(\xi, \eta, t) \end{pmatrix} = D_1(\xi, \eta, t) \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \end{pmatrix} + D_2(\xi, \eta, t)\dot{\theta}(t) + D_3(\xi, \eta, t)\dot{\phi}(t), \quad (4)$$

где $D_i, i = 1..3$ некоторые функции, допускающие явные аналитические выражения, W_x, W_y – мгновенные скорости относительного движения камеры и снимаемой точки поверхности при

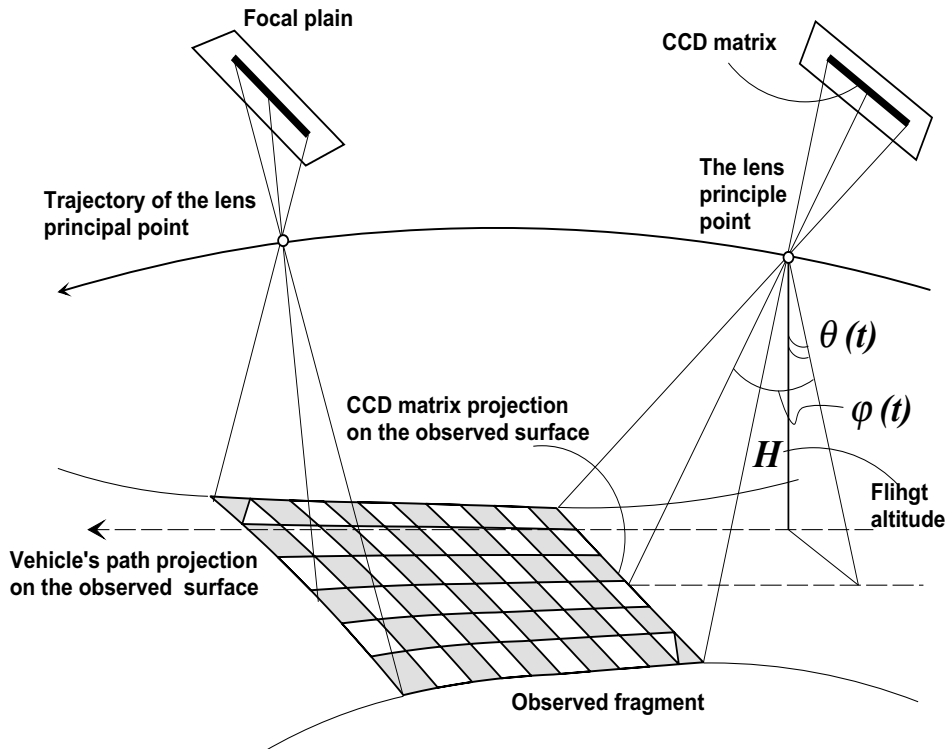


Рис. 1. Взаимное положение камеры и фотографируемого фрагмента в процессе съемки с подвижного носителя. ПЗС матрица (CCD) расположена в фокальной плоскости объектива, а положение линии визирования изменяется за время съемки фрагмента за счет движения самой камеры и изменения ориентации. Движение камеры моделируется заданием траектории главной точки объектива, предполагается, что заданы: расстояние до снимаемой поверхности H , фокусное расстояние объектива, и функции времени $(\theta(t), \phi(t))$, определяющие ориентацию линии визирования (например, направление оптической оси объектива) в пространстве.

$x = x(\xi, \eta, t)$, $y = y(\xi, \eta, t)$, а $\dot{\theta}(t), \dot{\phi}(t)$ – мгновенные угловые скорости вращения оптической оси.

Таким образом, скорости сдвига изображения образуют переменное во времени и пространстве поле, причем вариации этого поля будут весьма малы за время съемки одного элемента изображения (накопления светового потока, приходящего от области снимаемого объекта, которая соответствует размеру одного элемента фотоприемника), но изменяются весьма значительно в течение периода съемки всего фрагмента. Таким образом в задаче компенсации сдвига изображения можно выделить два различных пространственно-временных масштаба, которым соответствуют два различных механизма управления:

- *микроскопический*, который имеет место в пределах времени накопления светового потока (до десятков миллисекунд) от области порядка элемента разложения в поперечном направлении и соответственно от нескольких элементов разложения (до сотни микрон) до всего столбца матрицы ПЗС в продольном направлении (единицы миллиметров),
- и *макроскопический*, соответствующий времени съемки всего фрагмента, который занимает до нескольких секунд и в пространственной области простирается до нескольких тысяч

элементов матрицы ПЗС в поперечном направлении, то есть до нескольких десятков сантиметров.

В микроскопическом пространственно-временном масштабе действует управление параметрами регистрации потока (частота переноса зарядовых пакетов и количество самих переносов), а в макроскопическом масштабе - это управление ориентацией линии визирования. Вторым механизмом является традиционным для оптико-механических систем, поэтому в данной работе мы уделяем основное внимание первому.

3. ОПИСАНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖИМА ЗАДЕРЖКИ И ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Функционирование ПЗС в обычном режиме задержки и интегрирования схематически показано на Рис. 3. Световой поток, приходящий от элемента фотографируемого объекта собирается объективом и генерирует за время фазы накопления зарядовый пакет, пропорциональный общему световому потоку за время накопления, затем за время фазы переноса этот зарядовый пакет перемещается в следующую строку матрицы ПЗС, где суммируется с зарядовым пакетом, который генерируется в этом элементе матрицы ПЗС в следующем акте накопления. Если скорость продольного сдвига изображения равна скорости смещения зарядовых пакетов, то в результате последовательности переносов и накоплений, зарядовый пакет, соответствующий регистрируемому элементу будет увеличиваться, так что при прохождении всего столбца матрицы ПЗС полезный сигнал вырастет пропорционально числу фаз накопления. Этот режим особенно эффективен при съемке с подвижного носителя, когда с одной стороны происходит "сканирование" фотографируемого объекта за счет движения носителя, с другой стороны, при очень высокой скорости движения, оптико-механические элементы позволяют уменьшить скорость сдвига изображения, "останавливая" изображение, или уменьшая скорость его смещения в фокальной плоскости до такого значения, при котором поток выходной информации уже достаточно снижен и может быть зафиксирован в запоминающих устройствах. Кроме того, увеличение полезного сигнала необходимо для достижения максимального отношения сигнал/шум, так как в задачах аэро/космической съемки контраст изображения, как правило, очень низок, а важность получения снимка очень высока. Читатель, знакомый с практикой аэрофотосъемки, может найти в этом режиме определенные аналогии со съемкой целевым аэрофотоаппаратом, где аналогом щели является матрица ПЗС, вытянутая в линейку, однако функциональные возможности, открывающиеся при использовании оптико-электронных средств регистрации изображений несравненно более широки.

Математическая модель данного процесса, это пространственно-временное интегрирование переменного поля изображения, которое описывается уравнением

$$u(\xi, \eta, t) = U(\xi - V_\xi t, \eta - V_\eta t),$$

где в микроскопическом масштабе можно считать скорости V_ξ, V_η постоянными. Таким образом, сигнал, регистрируемый некоторым элементом ПЗС матрицы (линейки) с номером k в момент времени t_0 равен

$$C(t_0, k) = C_0 \sum_{n=1}^N \int_{t_0+n\Delta T-\frac{\Delta T}{2}}^{t_0+n\Delta T+\frac{\Delta T}{2}} \int_{nP_\xi-\frac{P_\xi}{2}}^{nP_\xi+\frac{P_\xi}{2}} \int_{kP_\eta-\frac{P_\eta}{2}}^{kP_\eta+\frac{P_\eta}{2}} U(\xi - V_\xi t, \eta - V_\eta t) d\eta d\xi dt, \quad (5)$$

где

- N - число переносов в продольном направлении,

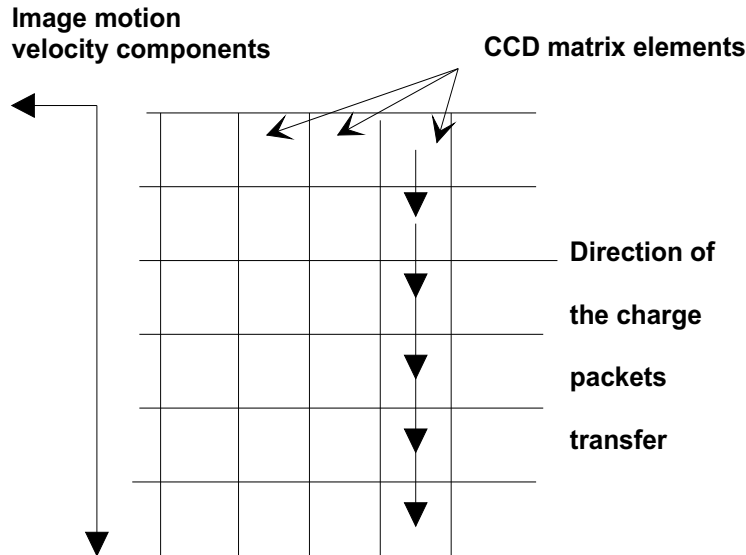


Рис. 2. Перемещение зарядовых пакетов вдоль столбцов матрицы ПЗС в обычном режиме задержки и интегрирования. Слева показаны компоненты скорости движения изображения, а справа последовательность смещения зарядового пакета вдоль столбцов ПЗС матрицы.

- ΔT – период единичного акта накопления–переноса,
- (P_ξ, P_η) – размеры элемента ПЗС матрицы в продольном и поперечном направлениях, соответственно,
- (V_ξ, V_η) – компоненты скорости сдвига изображения,
- C_0 – нормализующая константа, зависящая от яркости изображения, свето-энергетических характеристик ПЗС и оптической системы.

Функция передачи модуляции (Modulation Transfer Function (MTF)), описывающая преобразование (5) в пространственно-частотной области (ν_ξ, ν_η) равна

$$MTF(\nu_\xi, \nu_\eta) = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \frac{N(\nu_\xi(V_\xi \Delta T - P_\xi) + \nu_\eta V_\eta \Delta T)}{2}}{\sin \frac{\nu_\xi(V_\xi \Delta T - P_\xi) + \nu_\eta V_\eta \Delta T}{2}} \operatorname{sinc} \frac{\nu_\xi P_\xi}{2} \operatorname{sinc} \frac{\nu_\eta P_\eta}{2} \right|, \quad (6)$$

где $\operatorname{sinc}(x) = \sin x/x$. Из уравнения (6) следует, что выбрав

$$\Delta T_{opt} = \frac{P_\xi}{V_\xi}, \quad (7)$$

можно добиться устранения зависимости MTF от скорости в продольном направлении, однако, зависимость от поперечной компоненты скорости V_η остается и приводит к значительному снижению MTF при больших значениях N .

4. КОМПЕНСАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБОБЩЕННОГО РЕЖИМА ЗАДЕРЖКИ И ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Идея *обобщенного* режима задержки и интегрирования предполагает организацию физического или виртуального переноса зарядовых пакетов также и в поперечном направлении. При

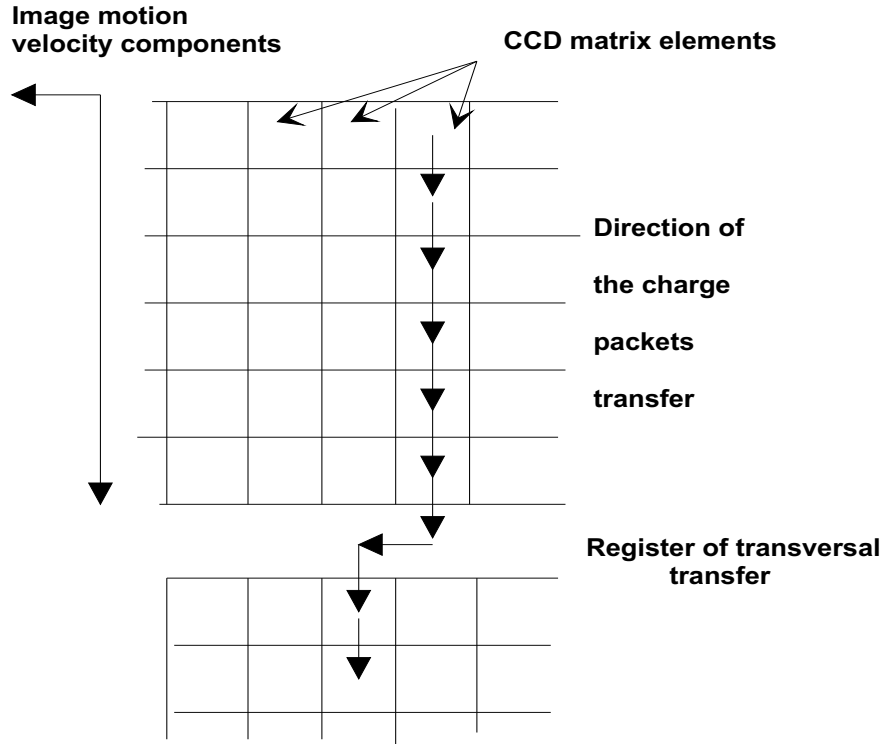


Рис. 3. Перемещение зарядовых пакетов вдоль столбцов матрицы ПЗС при *обобщенном* режиме задержки и интегрирования. Показано основное движение в продольном направлении и физическое или виртуальное смещение зарядовых пакетов в поперечном направлении.

физическом методе переноса матрица ПЗС должна быть разделена регистрами поперечного переноса, как показано на Рис. 4, которые функционируют аналогично регистрам поперечного переноса, используемым для съема сигнала. При виртуальном переносе, матрица разбивается несколько матриц разделенных регистрами поперечного переноса, но сигнал от каждого столбца суммируются с поперечным сдвигом.

Оба эти механизма эквивалентны с точки зрения влияния на качество снимаемого сигнала и описываются следующим аналогом уравнения (5)

$$C(t_0, k) = C_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=N_1(m-1)+1}^{N_1 m} \int_{t_0+n\Delta T-\frac{\Delta T}{2}}^{t_0+n\Delta T+\frac{\Delta T}{2}} \int_{nP_\xi-\frac{P_\xi}{2}}^{nP_\xi+\frac{P_\xi}{2}} \int_{(k+\eta_m)P_\eta-\frac{P_\eta}{2}}^{(k+\eta_m)P_\eta+\frac{P_\eta}{2}} U(\xi - V_\xi t, \eta - V_\eta t) d\eta d\xi dt, \quad (8)$$

где

- M – число возможных переносов в поперечном направлении,
- η_m – величина поперечного переноса на m – ом периоде, $m = 1 \dots M$ то есть $\Delta\eta_m \in \{-1, 0, 1\}$,
- $MN_1 = N$.

Выражение для функции передачи модуляции имеет вид

$$MTF(\nu_\xi, \nu_\eta) = \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e^{i\nu_\eta [P_\eta \eta_m - V_\eta \Delta T (N_1(m-1)+1)]} \right| \times \left| \frac{1}{N_1} \frac{\sin \frac{N_1(\nu_\xi(V_\xi \Delta T - P_\xi) + \nu_\eta V_\eta \Delta T)}{2}}{\sin \frac{\nu_\xi(V_\xi \Delta T - P_\xi) + \nu_\eta V_\eta \Delta T}{2}} \operatorname{sinc} \frac{\nu_\xi P_\xi}{2} \operatorname{sinc} \frac{\nu_\eta P_\eta}{2} \right|, \quad (9)$$

5. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА

Заметим, что как и в случае обычного режима задержки и интегрирования выбор соотношения (7) обеспечивает полную компенсацию сдвига изображения в продольном направлении, а для компенсации поперечного сдвига следует максимизировать первый сомножитель в уравнении (9) путем выбора кусочно-постоянной функции η_m . Заметим, что при небольших значениях показателей, модуль суммы экспонент допускает разложение вида “единица минус половина от сумма квадратов показателей”, поэтому задача максимизации соответствующего сомножителя МТФ, сводится к задаче минимизации суммы квадратов показателей или к задаче нахождения наилучшей в среднеквадратическом смысле аппроксимации линейной функции. Это позволяет осуществить и выбор оптимального (суб-оптимального) управления η_m , которое зависит от скорости V_η . Оптимальная функция η_m , минимизирующая среднеквадратическое отклонение от линейной функции $V_\eta \Delta T (N_1(m-1)+1)$ равна (мы полагаем, что $V_\eta > 0$)

$$\eta_1 = 0, \quad \eta_m = \begin{cases} \eta_{m-1}, & \text{при } |P_\eta \eta_{m-1} - V_\eta \Delta T (N_1(m-1)+1)| \leq \frac{P_\eta}{2}, \\ \eta_m = \eta_{m-1} + 1, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (10)$$

Результаты численного анализа показаны на Рис.4, где приведена зависимость MTF от нормированных значений переменных

$$\begin{aligned} \frac{\nu_\eta P_\eta}{\pi} &\in [0, 2] & \frac{\nu_\xi P_\xi}{\pi} &= 1, \\ \frac{V_\xi}{V_\eta} &= N_1 = 8, & \frac{P_\xi}{P_\eta} &= 1, \\ \Delta T &= \frac{P_\xi}{V_\xi} (1+k), & k &= 0, 0.001, 0.003, 0.005, 0.01. \end{aligned}$$

Выбранные значения параметров являются в некотором смысле критическими, так как нормированное значение пространственной частоты, равное 1, соответствует частоте Найквиста, отношение скоростей, равное N_1 соответствует максимальному значению поперечной скорости, которое еще может быть компенсировано, различные кривые соответствуют возможным ошибкам синхронизации, выраженных в терминах параметра $k = \frac{\Delta T - \Delta T_{opt}}{\Delta T_{opt}}$.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из результатов численного анализа правильный выбор управляющих параметров $\Delta T, \eta_m, m = 1 \dots M$ позволяет в определенных пределах компенсировать сдвиг изображения

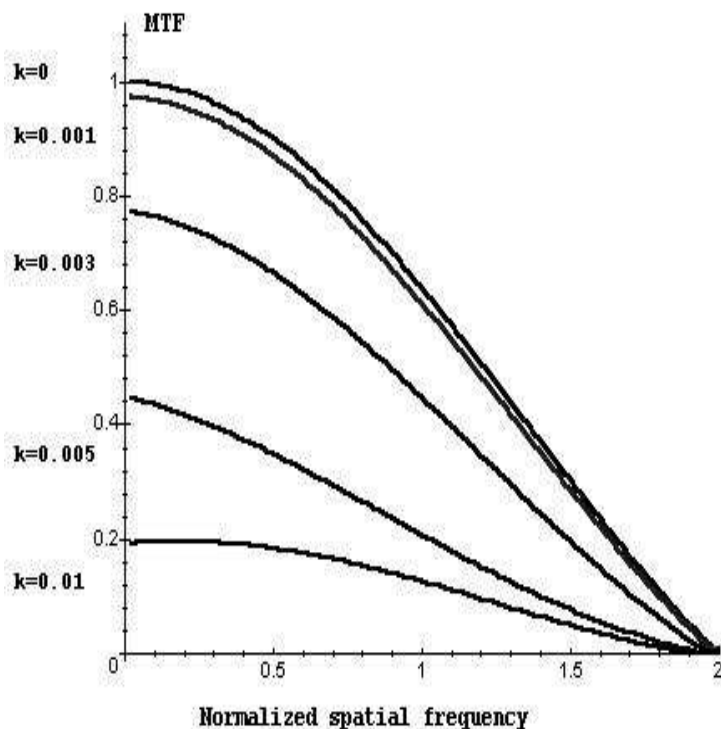


Рис. 4. Значение функции передачи модуляции (MTF) соответствующей оптимальной компенсации продольной и поперечной составляющей. Члены с *sinc* функциями, обусловленные пространственным интегрированием светового потока по площади элемента ПЗС матрицы отброшены для того, чтобы выделить только компенсационную составляющую.

методами электронной компенсации. В тоже время необходимо отметить, что при изменении точности синхронизации от 0.1% до 1% снижение значения MTF очень значительно, а вместе с ним и снижение разрешающей способности системы в целом. Кроме того, даже в пределах одного снимаемого фрагмента параметры, обеспечивающие высокий уровень разрешения могут изменяться весьма значительно. Это обуславливает необходимость построения системы управления компенсацией сдвига изображения, которая вполне может быть отнесена к классу задач оптимального стохастического управления дискретно-непрерывными системами по неполным данным. Общий подход к решению подобных задач включает два этапа:

- оценивание текущей скорости сдвига изображения с учетом динамики носителя и положения линии визирования;
- вычисление оптимальных параметров управления и применение их при съемке фрагмента.

Задачи первого этапа решаются на основе стандартных методов оценивания параметров движения динамических систем и последующего прямого расчета скоростей сдвига изображения. Однако, точности подобных оценок могут оказаться недостаточными для достижения высокого уровня отношения сигнал/шум, и тогда возникает необходимость определения скоростей непосредственно по регистрируемому изображению. Системы такого рода относятся к классу корреляционно-экстремальных следящих систем [2] и основаны на динамическом совмещении последовательности регистрируемых изображений. Использование методов нелинейного оценивания позволяет достичь весьма высокой точности совмещения, что позволяет

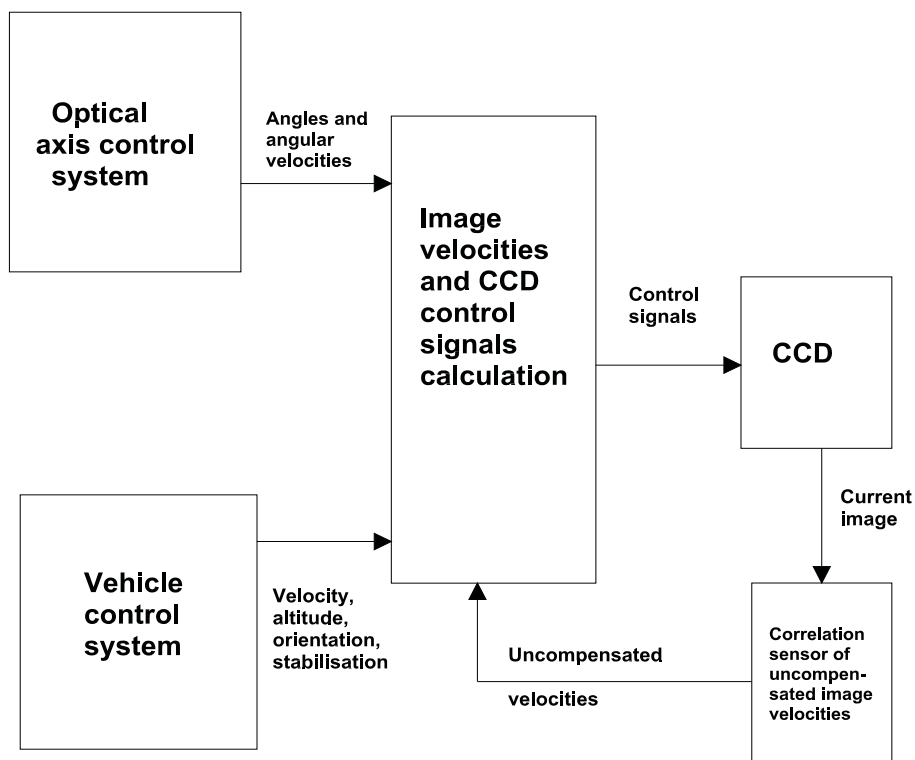


Рис. 5. Структура системы управления компенсацией сдвига изображения.

надеяться и на высокую точность определения нескомпенсированных остаточных скоростей. Общая структурная схема системы управления показана на Рис. 5.

Исследование точностных характеристик подобных систем управления является весьма актуальной задачей, решение которой необходимо для построения систем высокого разрешения. Специалистам в области проектирования систем съемки с подвижных объектов, хорошо известна проблема стабилизации, когда отличные оптические системы с большим фокусным расстоянием и соответственно высоким уровнем разрешения не могут достичь своих потенциальных возможностей из-за снижения разрешения в виду смаза изображения. Методы электронной компенсации предлагаемые в данной работе предлагают одни из возможных подходов к решению данной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. F. Barbe, Delay/integration mode in image detectors, in: P. Jespers et al. eds., *Solid State Imaging*, Noordhoff, Leiden, 1976.
2. В. К. Баклицкий, А. Н. Юрьев, *Корреляционно-экстремальные системы навигации*, Москва, Радио и связь, 1982.
3. Б. М. Миллер, Г. И. Федченко, М. Н. Морскова, Расчет сдвига изображения при панорамном фотографировании, *Известия ВУЗов, Геодезия и Аэрофотосъемка*, N 4, стр. 81-89, 1984.
4. Б. М. Миллер, Г. И. Федченко, Влияние ошибок ориентации носителя на сдвиг изображения при фотографировании с движущегося объекта, *Известия ВУЗов, Геодезия и Аэрофотосъемка*, N 5, стр. 75-80, 1984.

5. V.L. Kistlerov, P.I. Kitsul and B.M. Miller, Computer-aided design of the optical devices control systems based on the language of algebraic computation FLAC. *Mathematics and Computers in Simulation*, V. 33, pp. 303-307, 1991.