

КОРРЕКЦИЯ СМАЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

Егошкин Н.А., к.т.н., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, foton@rsreu.ru

Еремеев В.В., д.т.н., директор НИИ «Фотон» РГРТУ

Ключевые слова: фильтрация изображений, устранение смаза, приборы с зарядовой связью.

Постановка задачи

В современных космических системах высокодетального наблюдения Земли используются съемочные устройства на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), работающие в режиме временной задержки и накопления видеосигнала (ВЗН). В них развертка изображения в строчном направлении осуществляется за счет полета космического аппарата (КА), а в кадровом направлении – за счет опроса элементов ПЗС-матрицы, установленной перпендикулярно траектории полета (рис. 1). При съемке Земли в поле зрения строк с номерами $N, \dots, 2, 1$ последовательно попадают одни и те же объекты подстилающей поверхности. При каждом опросе ПЗС матрицы в течение времени τ осуществляется интегрирование лучистой энергии, после чего информация с $(i+1)$ -й строки переписывается в i -ю строку, а с первой ПЗС-строки снимается выходная информация.

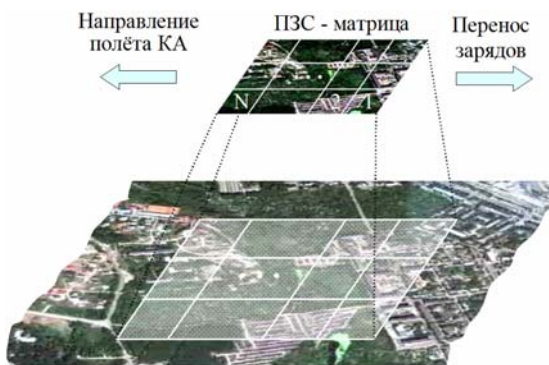


Рис. 1. Схема работы ПЗС-матрицы с ВЗН

Если за время периода T между опросами ПЗС-матрицы спутник смещается на расстояние Δ , и расстояние L между проекциями пикселей на Землю совпадает с этим смещением ($\Delta = L$), то каждая строка матрицы «видит» одни и те же объекты, и на выходе матрицы формируется сумма соответствующих сигналов. За счет этого достигается многократное увеличение отношения сигнал/шум [1].

Для правильной работы в режиме ВЗН необходимо, чтобы скорость движения КА была точно согласована с периодом опроса матрицы, т.е. $\Delta = L$. На практике равенство может нарушаться из-за ошибки вычисления

Рассматриваются модели смаза изображений при съемке поверхности Земли устройствами высокого разрешения, работающими на принципе временной задержки и накопления. Исследованы алгоритмы коррекции смаза, основанные на спектральном и алгебраическом подходах, выполнена их практическая апробация на снимках от космического аппарата «Ресурс-ДК».

скорости спутника и неточности задания частоты опроса ПЗС-матрицы. В результате возникают искажения типа «смаз» и, как следствие, стоит задача их коррекции. При этом необходимо выделить два вопроса. Во-первых, должны быть оценены с высокой точностью параметры смаза. Эта задача решается с использованием различных подходов, например [2], и в настоящей работе не рассматривается. Во-вторых, необходимо с использованием найденных параметров выполнить наиболее качественное устранение смаза, чему и посвящена настоящая статья.

Непрерывная модель смаза

Рассмотрим формирование сигнала одним произвольным столбцом ПЗС-матрицы. Пусть $s(x)$ – изображение подстилающей поверхности под этим столбцом, $\tau \ll T$, чувствительные элементы ПЗС-матрицы являются точками. Тогда на i -м периоде опроса в строке n накапливается заряд $q_n(i) = s(i\Delta + nL)$, $n = 1, N$, и на выходе рассматриваемого столбца матрицы формируется сигнал:

$$r(i) = \sum_{n=1}^N q_n(i-n) = \sum_{n=1}^N s((i-n)\Delta + nL) = \sum_{n=1}^N s(i\Delta + n(L-\Delta)). \quad (1)$$

Следовательно, процесс формирования сигнала может быть описан как свертка $s(x)$ с одномерной функцией рассеяния точки (ФРТ) вида

$$f(x) = \sum_{n=1}^N \delta(x - n(L-\Delta)), \quad (2)$$

с последующей дискретизацией непрерывного сигнала с шагом Δ , где $\delta(x)$ – дельта-функция. Выражение (1) можно представить в операторной форме как

$$r = D(f(s)) = Dfs, \quad (3)$$

где D – оператор дискретизации, f – оператор линейной системы (2).

В случае, когда время накопления τ и размеры чувствительного элемента конечны, (3) принимает вид

$r = D f g h s$, где h – оператор интегрирования сигнала по площади ПЗС-элемента, g – оператор смаза за время τ движущегося изображения. Оператор g действует как свертка с П-образной функцией рассеивания точки (ФРТ) шириной τ/T . Искажения, описываемые g и h , не связаны с процессом ВЗН, они возникают и при съемке Земли одной ПЗС-линейкой. В дальнейшем, не снижая общности, будем рассматривать модель искажений в виде (3), имея ввиду, что в (3) под f можно понимать композицию операторов f, g, h .

Дискретная модель смаза

На практике, как правило, работают с дискретными изображениями. Поэтому задачу устранения смаза можно сформулировать следующим образом: требуется перейти от дискретного изображения r к дискретному изображению r' , формируемому идеальной съемочной системой без смаза, для которой

$$r' = D s. \quad (4)$$

Изображение r' может содержать масштабные искажения с коэффициентом Δ/L , которые могут быть легко устранены при геометрической трансформации снимков.

Пусть изображение s таково, что может быть однозначно восстановлено по своим дискретным отчетам линейным оператором D^{-1} . Тогда $s = D^{-1} r'$, и после подстановки в (3), получим:

$$r = F r', \quad F = D f D^{-1}. \quad (5)$$

Оператор F связывает два дискретных изображения r и r' . Можно показать, что F линеен и инвариантен к целочисленным сдвигам входного дискретного сигнала r' . Следовательно, F действует как свертка с дискретной ФРТ, определяемой формулой (5). Далее без нарушения общности принимаем шаг дискретизации единичным.

На практике условия существования обратного оператора D^{-1} выполняются не точно. Поэтому в качестве D^{-1} следует использовать компактные интерполяционные операторы, например, линейные и кубические. Соответственно, возникает неопределенность в знаении F .

Определение N, Δ и L может быть выполнено различными методами, например, сопоставлением фактической частоты опроса ПЗС-матрицы со скоростью полета КА, или путем сопоставления изображений, синхронно формируемых в различных спектральных каналах [2]. В дальнейшем параметры N, Δ, L и ФРТ F будем считать известными.

Таким образом, задача устранения смаза сводится к решению уравнения (5) относительно r' , что может быть выполнено с использованием двух подходов: спектрального и алгебраического.

Спектральный подход по устранению смаза

В спектральной области связь искаженного и идеального изображений имеет вид $r = F r'$, где под r', r, F понимается преобразования Фурье соответствующих операторов из (5), а закон композиции есть поточечное умножение. Поэтому формально восстановление сигнала в спектральной области можно определить как $r' = r/F$.

Количественно смаз характеризует относительная ширина носителя функции (2), равная $\lambda = N |L - \Delta| / \Delta$. Приближенно под F можно понимать П-образную функцию с шириной λ , спектр которой $F_{\Pi}(\omega) = [\sin(0.5 \omega \lambda)] / (0.5 \omega \lambda)$. На рабочий участок спектра $\omega \in [0, \pi]$ приходится около 0.5λ нулей функции $F_{\Pi}(\omega)$.

Возможность восстановления изображения определяется видом функции $F_{\Pi}(\omega)$, в частности, числом нулей в рабочей полосе частот $\omega \in [0, \pi]$. При организации коррекции смаза следует различать три случая.

Незначительный смаз ($0 \leq \lambda < 2$). В данном случае нули $F(\omega)$ отсутствуют в рабочей полосе частот. Коррекция выполняется по формуле $r' = r/F$ и главная задача состоит в точном оценивании функций f и F , которые чаще всего не постоянны по полю снимка.

Средний смаз. Этому случаю соответствуют наличие несколько нулей $F(\omega)$. Здесь необходимо принимать меры по регуляризации функции $1/F$ вблизи нулей F .

Сильный смаз. Имеет место значительное число нулей $F(\omega)$ в рабочей полосе частот. В данном случае наблюдается сильное ослабление полезного сигнала, пропорциональное $1/(\omega \lambda)$, по мере роста частоты. Здесь необходимо управлять коэффициентом усиления $1/F$ на высоких частотах, иначе сигнал может быть полностью замаскирован шумом.

Оптимальное решение в смысле среднеквадратической близости исходного и восстановленного сигналов при некоррелированном шуме дает фильтр Винера [3]:

$$r'(\omega) = V(\omega) r(\omega), \quad (6)$$

$$V(\omega) = \frac{\tilde{F}(\omega)}{|F(\omega)|^2 + E(\omega)}, \quad (7)$$

где $E(\omega)$ – отношение спектральной плотности мощности шума и изображения. На практике точно оценить $E(\omega)$ трудно, поэтому в качестве $E(\omega)$ выбирается константа, которая подбирается оператором, исходя из наилучшего качества скорректированного изображения.

Недостатком фильтра Винера при коррекции смаза является искажение исходного изображения в виде теней от объектов на расстояниях, кратных величине смаза λ . Действительно, фильтрация по (6) и (7) равносильна прохождению эталонного сигнала $r(\omega)/F(\omega)$ через фильтр

$$K(\omega) = \frac{|F(\omega)|^2}{|F(\omega)|^2 + E(\omega)}. \quad (8)$$

Функция $K(\omega)$ действительная, а соответствующая ей импульсная характеристика $K(i)$ симметрична. На рис. 2 показан фрагмент $K(i)$ при $F(\omega) = F_{\Pi}(\omega)$, $\lambda = 100$ и $E(\omega) = 0.0001, 0.001, 0.01$. Как видим, амплитуда первой тени составляет около 1/3 от яркости объекта. Такие искажения хорошо заметны глазом.

Для уменьшения визуального восприятия искажений изображения тенями выполним модификацию оптимального фильтра (хотя при этом среднеквадратическая ошибка, конечно же, возрастет). Для этого составим целевую функцию

$$\varepsilon(K(\omega)) = \varepsilon_e(K(\omega)) + \sum_i \eta(i) K^2(i), \quad (9)$$

$$\varepsilon_s(K(\omega)) = (K(\omega) - 1)^2 + \frac{K(\omega)^2 E(\omega)}{|F(\omega)|^2}. \quad (10)$$

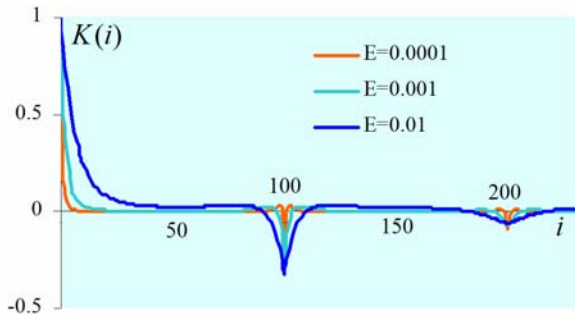


Рис. 2. Отклик фильтра $K(i)$ для П-образной ФРТ $F(\omega)$ при $\lambda = 100$.

Выражение (10) определяет среднеквадратическую ошибку, минимуму которой соответствует фильтр (7). В функции (9) второе слагаемое есть взвешенные с весами $\eta(i)$ отчеты импульсной характеристики. Задавая различные функции $\eta(i)$, например, отличные от нуля в районе выбросов, можно путем минимизации (9) синтезировать фильтры $K(\omega)$ с меньшей амплитудой выбросов.

На практике для минимизации (9) необходимо рассматривать конечные $K(i)$. При периодическом продолжении $K(i)$ спектр $K(\omega)$ становится дискретным и содержит конечное число отчетов. При этом, поскольку $K(i)$ линейно связана с отчетами $K(\omega)$, то минимум (9) легко находится по методу наименьших квадратов.

Минимизация (9) достаточно трудоемкий процесс. Более просто можно бороться с выбросами $K(i)$, регулируя поведение $V(\omega)$ вблизи нулей $F(\omega)$ при условии сохранения огибающей $V(\omega)$ такой же, как и у функции (7). Для этого представим восстанавливающий фильтр как

$$V(\omega) = \frac{\tilde{F}(\omega)}{|F(\omega)|^2 + \theta E(\omega)}, \quad (11)$$

где $O(\omega)$ – огибающая функции $F(\omega)$, θ – параметр. При $\theta = 1$ выражение (11) переходит в (7). При $\theta < 1$ добротность фильтра вблизи нулей $F(\omega)$ увеличивается и тени уменьшаются. При этом огибающая функции (11) сохраняется

такой же, как и у фильтра (7). Для функции $F(\omega) = [\sin(0.5\omega\lambda)] / (0.5\omega\lambda)$, можно принять $O(\omega) = 1 / (0.5\omega\lambda)$.

Следует отметить, что любые алгоритмы уменьшения теней приводят к увеличению ошибки (10), повышению шумов и увеличению длины ФРТ фильтра $F(\omega)$.

Практическую реализацию фильтрации в спектральной области удобно выполнять с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для этого выбирается длина окна БПФ M из условия $M \gg \lambda$. По (7) или (11) рассчитывается дискретный спектр $V(\omega) = V(\omega)$

при $\omega = \frac{2\pi}{M} w$, $w = 0, M-1$. К спектру $V(\omega)$

применяется обратное БПФ и находится импульсная характеристика $V(i)$, $i = -M/2, M/2-1$. Далее анализируются «хвосты» $F(i)$ и, если они малы, то выполняется их усечение и соответствующее уменьшение размеров окна M . В противном случае M увеличивается для того, чтобы нивелировать эффекты циклической свертки, и процесс повторяется. В результате формируется длина окна M и характеристика восстанавливающего фильтра $V(i)$, $i = -M/2, M/2-1$. На рис. 3 показан фрагмент синтезированной $V(i)$ для П-образной F при $\lambda = 100$.

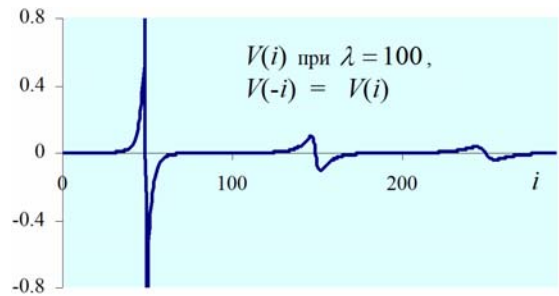


Рис. 3. Фрагмент ФРТ компенсирующего фильтра

Собственно восстановление изображения осуществляется его сверткой (не циклической) с фильтром $V(i)$, опять же с использованием БПФ. Для восстановления сигнала длиной в Z отчетов требуется $(Z + M)$ соседних отчетов входного сигнала.



Рис. 4. Коррекция смаза изображения на основе спектрального подхода

Рассмотренные выше модели, алгоритмы и технологии экспериментально исследовались с привлечением изображений от КА «Ресурс-ДК», в которых наблюдались сильные смазы из-за неправильного задания частоты опроса ПЗС-матриц. На рис. 4 слева представлены исходное смазанное изображение, справа – обработанное с использованием спектрального подхода. Оценки параметров смаза выполнялись в соответствии с технологиями, описанными в работе [2].

Алгебраический подход

Основан на составлении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), связывающих сигналы $r'(i)$ и $r(i)$, и её решении методами псевдообращения [3]. Методы эти трудоемки, т.е. практически применимы только к небольшим изображениям. Использование аппарата псевдообращения также не позволяет выявить физический смысл ограничений, за счет которых устраняется неоднозначность в решении СЛАУ. Для устранения этих недостатков предлагается следующее конструктивное решение.

Пренебрегая постоянным сдвигом по i , запишем связь идеального $r'(i)$ и искаженного $r(i)$ сигналов в виде свертки с причинным фильтром F :

$$r(i) = \sum_{j=0}^{\lambda} F(j) r'(i-j) \tag{12}$$

Тогда восстановление сигнала может быть выполнено рекурсивным фильтром:

$$r'(i) = \frac{r(i)}{F(0)} - \frac{1}{F(0)} \sum_{j=1}^{\lambda} F(j) r'(i-j) \tag{13}$$

Этот фильтр позволяет однозначно определить отчеты $r'(i)$, $i \geq 0$, по известным $r(i)$, $i \geq 0$, и начальным условиям $v(j) = r'(-j)$, $j = 1, \lambda$. Однако фильтр (13) не устойчив, поскольку влияние начальных условий не затухает со временем. Поэтому для применения (13) необходимо определять начальные условия, исходя, например, из минимума пульсаций выходного сигнала [4]:

$$\varepsilon(v) = \sum_{i=0}^M r'^2(i), \text{ где } M - \text{длина обрабатываемого фрагмента.}$$

Практическое решение уравнения $\varepsilon(v) = \min$ основано на линейности (13). Вначале находятся реакции $\zeta_j(i)$, $j = 1, \lambda$, фильтра (13) на λ линейно независимых начальных условий при входном сигнале $r(i) = 0$, а также реакция $\rho(i)$ фильтра (13) для $r(i) \neq 0$ и произвольных начальных условий. Далее составляется линейная комбинация

$$r'(i) = \rho(i) - \sum_{j=1}^{\lambda} a_j \zeta_j(i),$$

коэффициенты a_j которой находятся из условия

$$\sum_{i=0}^M r'^2(i) = \min$$

стандартным для евклидова пространства образом.

Особенно эффективно вычисление (13) осуществляется для П-образных ФРТ $F(j)$. В этом случае минимизация $\varepsilon(v)$ также упрощается, поскольку, как легко

показать, реакции $\zeta_j(i)$, $j = 1, \lambda$, есть всевозможные функции с периодом $\lambda + 1$.

На практике изображение обрабатывается пофрагментно, причем для каждого фрагмента начальные условия определяются отдельно. Важное значение имеет соотношение $k = M / \lambda$. Оно определяет остроту пиков фильтра, регуляризующего $1/F$ вблизи нулей F . Действительно, решение $\varepsilon(v) = \min$ равносильно прохождению точно восстановленного сигнала через линейный фильтр с ФРТ $K(i)$, срезающий некоторые сигналы. Форма $K(i)$ показывает, как искажается полезный сигнал.

На рис. 5 представлен график $K(i)$ для П-образной $F(j)$ при $\lambda = 99$, $k = 5$.

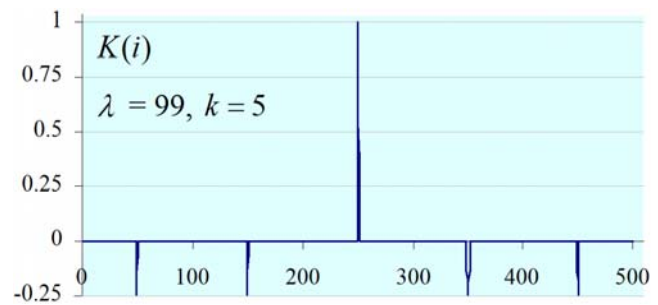


Рис. 5. Функция $K(i)$ при алгебраической фильтрации

Таким образом, и при алгебраической фильтрации возникают тени от объектов на расстояниях, кратных λ . Амплитуда теней составляет примерно $1/(k-1)$ от яркости объектов, тени имеют одинаковую амплитуду, число теней равно $(k-1)$. Увеличивая M и k , можно снижать уровень теней (но за счет роста их числа).

Рассмотренный подход позволяет устранить неустойчивость фильтра (13) и регулировать добротность множителя $K(i)$ путем изменения величины M . Однако для фильтрации сильного смаза этого не достаточно, поскольку сигнал маскируется шумом из-за подъема высоких частот фильтром (13). Для решения этой проблемы выходной сигнал (13) следует пропустить через фильтр низких частот (ФНЧ), например $K(\omega) = |O(\omega)|^2 / (|O(\omega)|^2 + E(\omega))$, уже встречавшийся в выражении (11). Точная реализация такого ФНЧ на практике едва ли оправдана, достаточно реализовать какую-либо аппроксимацию этого фильтра. Хорошие результаты дает, например, простейшая аппроксимация вида

$$K'(\omega) = \frac{1+2a}{1+ae^{i\omega} + ae^{-i\omega}}, \tag{14}$$

где $a = 0.5(K(\pi) - 1) / (K(\pi) + 1)$. Выражению (14) соответствует СЛАУ следующего вида:

$$r''(i) = (1+2a)r'(i) - ar''(i-1) - ar''(i+1), \tag{15}$$

где $r''(i)$ - искомый сигнал. СЛАУ (15) является трехдиагональной и легко решается с помощью алгоритма прогонки.

На рис. 6 представлены смазанное изображение КА «Ресурс-ДК» и результаты его обработки с использованием алгебраического подхода.

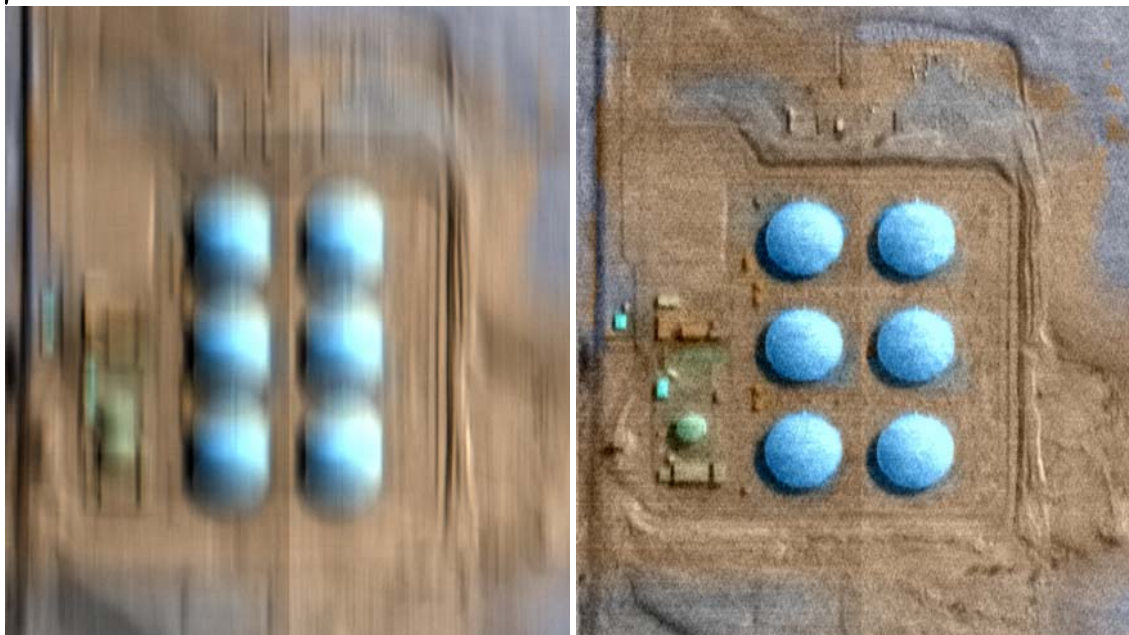


Рис. 6. Коррекция смаза изображения на основе алгебраического подхода

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Исследован спектральный подход к коррекции смаза. Его использование в виде классического фильтра Винера позволило достаточно качественно выполнить коррекцию смаза. Однако при таком решении рассматриваемой задачи появляются визуально заметные тени от объектов.

2. Выполнена модификация классического фильтра, основанная на регулировании его добротности. Это позволило ценой некоторого увеличения среднеквадратической ошибки восстановления добиться заметного уменьшения наблюдаемости теней.

3. Исследован алгебраический подход к коррекции смаза. На реальных космических изображениях установлено, что этот подход дает несколько худшие результаты при коррекции смаза. В тоже время предложены вычислительные процедуры, которые позволяют многократно повысить скорость решения рассматриваемой задачи.

Работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (госконтракт № П2422).

Литература

1. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
2. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Сам. ГТУ, 2005. №37. С. 150-157.
3. Грузман И.С., Киричук В.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
4. Еремеев В.В., Злобин В.К., Обработка аэрокосмических изображений. М.: Физматлит, 2006. 406 с.

CORRECTION SMEAR IMAGES IN THE SPACE SURVEILLANCE SYSTEM EARTH

Egoshkin N.A., Ereemeev V.V.

The models of image blurring when photographing the Earth's surface field device, high-resolution operating on the principle of time-delay and accumulation leniya. Studied algorithms for correcting blurring, based on spectral and algebraic-ray approaches, performed their practical testing on images from space vehicles is the "Resurs-DK".