

## **Модель повышения информативности цифровых изображений на базе метода суперразрешения**

**77-48211/552065**

**# 03, март 2013**

**Маркелов К. С.**

**УДК 004.9**

Россия, ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики» (МГТУ МИРЭА)

[kosmar89@mail.ru](mailto:kosmar89@mail.ru)

### **Введение**

Сегодня темпы развития программного обеспечения опережают темпы развития аппаратных комплексов и систем. При традиционном аппаратном решении задачи повышения информативности цифрового изображения, полученного с системы авиационного видения, качество изображения имеет разрешение 1024x768. Повышение разрешения за счет улучшения видеофиксаторов требует большого вложения средств, а зачастую проектирования вне серийных моделей [13]. Исходя из этого, реализация повышения информативности кадров программным путем является актуальной задачей.

Под повышением информативности цифрового изображения понимается увеличение масштаба изображения, повышения разрешения изображения для того, чтобы на нём было возможным видеть то, что не видно на кадрах низкого разрешения.

Для пилота самолета очень важно видеть всё на большом расстоянии. С помощью программного средства по улучшению информативности кадров низкого разрешения в кадры высокого разрешения, пилот сможет видеть взлётно-посадочную полосу при посадке и другие объекты с достаточно большого расстояния. Что позволит дать ему больше времени на принятие решения в различных ситуациях. Пилоту важны каждые секунды при принятии решения, особенно если ситуация критическая и нужны какие-то оперативные действия от него.

Предлагается решение по повышению информативности кадров низкого разрешения в виде построения модели с использованием масштабирования изображением одним из методов линейной интерполяции и как основу всего – метод суперразрешения.

## 1. Методы повышения разрешения

Существующие методы увеличения разрешения можно классифицировать следующим образом (рис. 1):



Рис. 1 – Классификация методов увеличения изображения.

К однокадровым пространственным методам относятся:

1. *Линейные методы*
  - метод ближайшего соседа;
  - билинейная интерполяция;
  - бикубическая интерполяция;
2. *Адаптивные нелинейные методы* (мало распространены из-за специфичности применения) [1].

К многокадровым методам относятся:

1. *итерационные методы суперразрешения*;
2. *прямые быстрые методы суперразрешения* [2].

Все методы и алгоритмы масштабирования несут в себе ряд недостатков, таких как:

- Алиясинг (неровности, эффект «лесенки»).
- Размытие.
- Эффект Гиббса. На изображениях проявляется в виде ореолов возле резких перепадов интенсивности.

Но последующая обработка изображения позволяет получить изображение с высоким разрешением и с отличным качеством.

В *линейных методах*, прежде чем преобразовать исходное изображение в изображение с применением масштабирования, необходимо вычисление для соседних пикселей изображения в зависимости от выбранного алгоритма. Такое вычисление задаётся и решается математически.

Любой *линейный метод* представляет собой свёртку:

$$f(x) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} F(i)K(i-x) \quad , \quad (1)$$

где  $F(i)$  – интенсивность (яркость)  $i$ -ого пикселя на изображении;

$K$  – маска, накладываемая на изображение.

В двумерном случае:

$$f(x, y) = \sum_{i, j=-\infty}^{+\infty} F(i, j)K(i-x)K(j-y) \quad (2)$$

Результат зависит от выбора ядра  $K$  (маска) [1].

Примеры ядер  $K$  (рис. 2-6) [1, 3]:

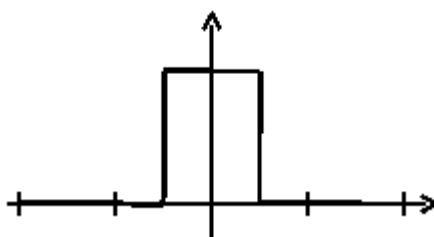


Рис. 2 - Метод «ближайшего соседа».

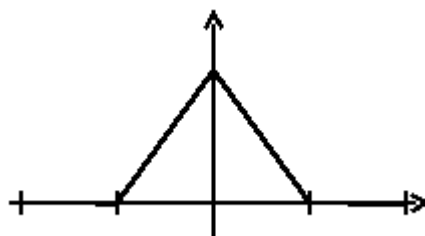


Рис. 3 - Линейная интерполяция.

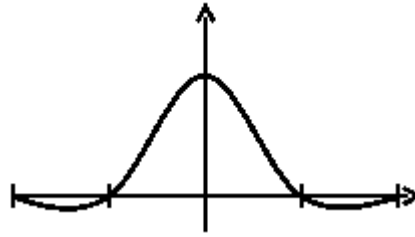


Рис. 4 - Кубическая интерполяция.

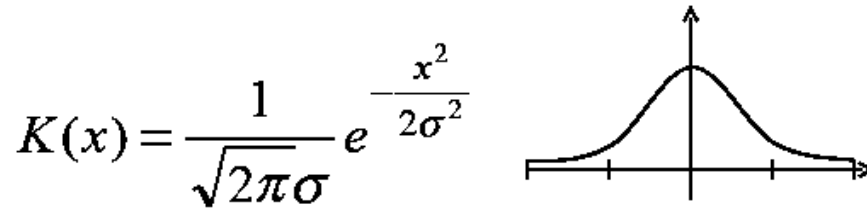


Рис. 5 - Гауссовская интерполяция.

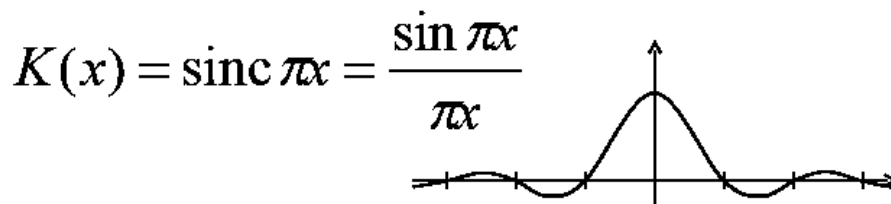


Рис. 6 - «Идеальная» интерполяция.

*Нелинейные методы* позволяют устранять эффекты артефактов, которые остаются после применения алгоритмов линейных методов. В нелинейных методах гораздо больше математических вычислений. Несколько примеров нелинейных методов.

Первый класс методов — *градиентные методы*. Основная идея использования таких методов заключается в том, что нужно использование разных ядер для интерполяции вдоль и поперёк границ, т.е. использование разных масок в проходе по оси  $x$  и по оси  $y$ . Соответственно, вдоль границы используют интерполяцию, а поперёк границы используют другие методы, иначе получается плохой результат при масштабировании [1].

В двумерном случае:

$$f(x, y) = \sum_{i, j=-\infty}^{+\infty} F(i, j) K_x(i - x) K_y(j - y). \quad (3)$$

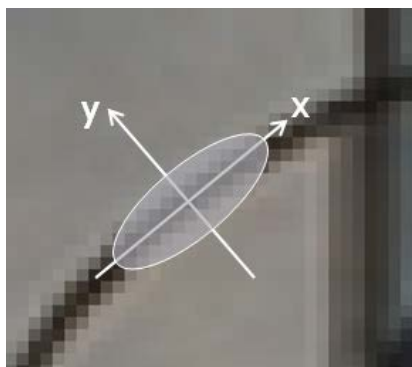


Рис. 7 – Градиентные методы.

*Метод NEDI* — увеличивает изображение в два раза, при этом используется самоподобие изображения при увеличении. Делается в два прохода.

Первый проход: коэффициенты выбираются из предположения, что эти же коэффициенты использовались при получении текущего изображения из его уменьшенной версии.

Второй проход аналогичен первому. В интерполяции участвуют пиксели, посчитанные в первом проходе [1].

## **2. Интерполяционные алгоритмы масштабирования цифровых изображений**

В компьютере изображение представлено конечным числом дискретных точек. Масштабирование цифровых изображений связано с приведением массива информации в соответствие с разрешением и размером иллюстрации. В зависимости от цели этот массив информации необходимо либо увеличить, либо сократить. Простое размножение или сокращение является не сложной задачей для компьютерных систем. Однако при этом возможны существенные искажения геометрии мелких деталей и появление ложных узоров на текстурах. Чтобы эти потери при трансформации были минимальны, необходимо использовать *интерполяционные алгоритмы*. Но такие методы требуют больше машинного времени, чем простые [1].

Для того чтобы сделать изображение больше при том же разрешении, в него нужно добавить новые пиксели. Задача состоит в том, чтобы рассчитать цвет новых пикселей, которые необходимо добавить между существующими.

Достаточно просто можно понять смысл интерполяции, если представить его определение. *Интерполяция или интерполирование* — в вычислительной математике способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений [4]. *Интерполяция* - это пространственный (или временной)

прогноз значений неизвестных значений пикселей между истинными значениями пикселей. Например, для изменения размеров изображений используется один из методов интерполяции [5].

Интерполяция изображений:

- Изображение представляется в виде функции.
- Пиксели изображений являются точками, в которых значение функции известно.
- Сутью повышения разрешения изображений является нахождение значений функции в промежуточных точках [1].

Размер изображения может быть изменён несколькими способами. Простейшим способом удвоения размера является метод копирования ближайшего пикселя, заменяющий каждый пиксель четырьмя пикселями того же цвета. В этом случае получаемое изображение больше оригинала, и сохраняет его детали, но приобретает нежелательный лестничный эффект.

Другие методы лучше подходят для сохранения гладких контуров изображения. Линейная (или билинейная) интерполяция обычно лучше чем метод копирования ближайшего пикселя для изменения размеров изображения, но иногда вызывает неожиданные дефекты при сглаживании деталей и всё же может порождать эффект лестницы. Более совершенные методы используют бикубическую интерполяцию.

Также существуют улучшенные увеличивающие алгоритмы, разработанные для компьютерной графики, которые называются *supersampling* (сглаживание). Лучшие результаты на таких алгоритмах достигаются при увеличении изображений с несколькими цветами в малом разрешении [6].

Общепринятые алгоритмы интерполяции можно поделить на две категории: адаптивные и неадаптивные. Адаптивные методы изменяются в зависимости от предмета интерполяции (резкие границы, гладкая текстура), тогда как неадаптивные методы обрабатывают все пиксели одинаково.

**Неадаптивные алгоритмы** включают: метод ближайшего соседа, билинейный, бикубический, сплайны, функция кардинального синуса (*sinc*), метод Ланцоша. В зависимости от сложности, они используют от 0 до 256 (или более) смежных пикселей для интерполяции. Чем больше смежных пикселей они включают, тем более точными могут оказаться, но это достигается за счёт значительного прироста времени обработки. Эти алгоритмы могут использоваться как для развёртки, так и для масштабирования изображения.

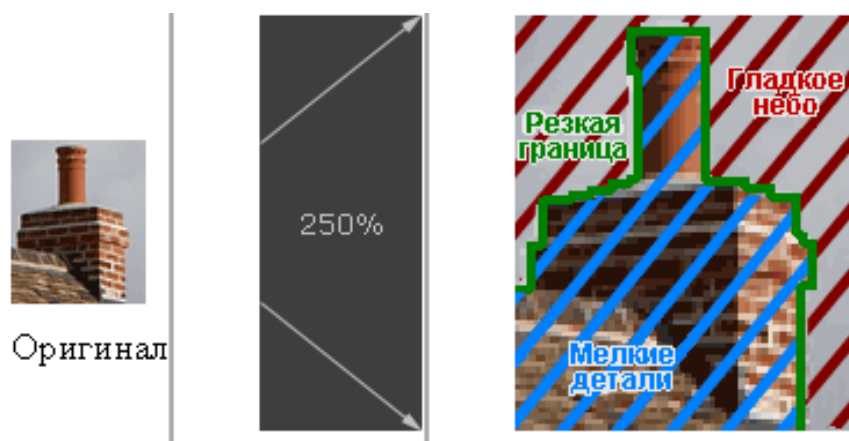


Рис. 8 – Масштабирование.

**Адаптивные алгоритмы** включают в себя многие коммерческие алгоритмы в лицензированных программах, таких как Qimage, PhotoZoom Pro, Genuine Fractals и другие. Многие из них применяют различные версии своих алгоритмов (на основе попиксельного анализа), когда обнаруживают наличие границы — с целью минимизировать неприглядные дефекты интерполяции в местах, где они наиболее видны. Эти алгоритмы в первую очередь разработаны для максимизации бездефектной детальности увеличенных изображений, так что некоторые из них для вращения или изменения перспективы изображения непригодны [7].

### 2.1 Метод ближайшего соседа

Это наиболее базовый из всех алгоритмов интерполяции, который требует наименьшего времени обработки, поскольку учитывает только один пиксель — ближайший к точке интерполяции. В результате каждый пиксель просто становится больше.



Рис. 9 - Увеличение методом ближайшего соседа.

Метод ближайшего соседа — точки принимают значения ближнего узла. Этот метод плохой, но достаточно часто используется. Изображение получается сильно пикселизованным., т е сильно видны пиксели, эффекты на краях, на границах изображения [1, 7].

## 2.2 Билинейная интерполяция

В вычислительной математике *билинейной интерполяцией* называют расширение линейной интерполяции для функций в двух переменных. Ключевая идея заключается в том, чтобы провести обычную линейную интерполяцию сначала в одном направлении, затем в другом [8].

Билинейная интерполяция рассматривает квадрат  $2 \times 2$  известных пикселя, окружающих неизвестный. В качестве интерполированного значения используется взвешенное усреднение этих четырёх пикселей. В результате изображения выглядят значительно более гладко, чем результат работы метода ближайшего соседа [7].

При увеличении цифровых изображений наблюдается сильная пикселизация изображения [8].



Рис. 10 - Пример увеличения части изображения - простым масштабированием (слева) и с применением билинейной интерполяции (справа).

Главным минусом билинейной интерполяции при масштабировании изображений является тот факт, что при увеличении в  $N$  раз изображения размером  $W$  (ширина) на  $H$  (высота) пикселей в результате будет получено изображение размером не  $NW$  на  $NH$  пикселей, а  $(N \cdot (W-1) + 1)$  на  $(N \cdot (H-1) + 1)$  пикселей.



### 2.3 Бикубическая интерполяция

**Бикубическая интерполяция** — в вычислительной математике расширение кубической интерполяции на случай функции двух переменных, значения которой заданы на двумерной регулярной сетке. Поверхность, полученная в результате бикубической интерполяции, является гладкой функцией, в отличие от поверхностей, полученных в результате билинейной интерполяции или интерполяции методом ближайшего соседа. Также бикубическая интерполяция часто используется в обработке изображений, давая более качественное изображение по сравнению с билинейной интерполяцией. В случае бикубической интерполяции значение функции в искомой точке вычисляется через её значения в 16-ти соседних точках.

Бикубическая интерполяция идёт на один шаг дальше билинейной, рассматривая массив из 4x4 окружающих пикселей — всего 16. Поскольку они находятся на разных расстояниях от неизвестного пикселя, ближайшие пиксели получают при расчёте больший вес. Бикубическая интерполяция производит значительно более резкие изображения, чем предыдущие два метода, и возможно, является оптимальной по соотношению времени обработки и качества на выходе. По этой причине она стала стандартной для многих программ редактирования изображений (включая Adobe Photoshop), драйверов принтеров и встроенной интерполяции камер [7, 12].

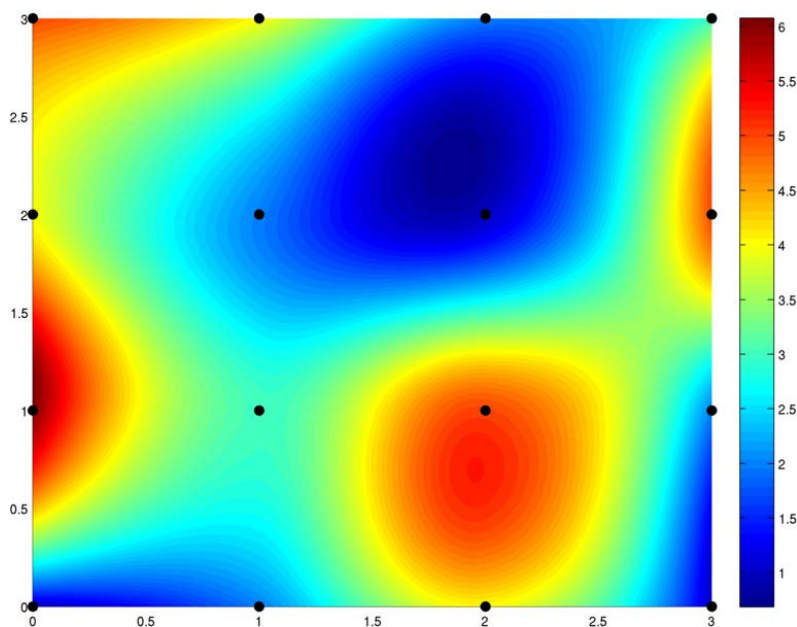


Рис. 11 - Результат бикубической интерполяции функции заданной на сетке  $[0,3] \times [0,3]$ . Данную сетку можно рассматривать как состоящую из 9 единичных квадратов. Черными точками обозначены известные значения функции до интерполяции. Цветом обозначены интерполированные значения в каждой точке полученного изображения.

### 3. Масштабирование цифровых изображений на базе метода суперразрешения

Задача повышения разрешения изображений является одной из важнейших задач цифровой обработки изображений. Несмотря на рост разрешения сенсоров камер, эта задача остаётся актуальной, например, для изображений, снятых на старые камеры низкого разрешения. Особенно важна задача повышения разрешения в видеонаблюдении.

При увеличении одного изображения может использоваться априорная информация об изображении, например, самоподобие изображения при разных разрешениях. Такой подход делает изображение визуально более качественным, однако результат может отличаться от реального изображения [9].

Использование нескольких изображений низкого разрешения может повысить качество изображений высокого разрешения. Процесс реконструкции изображения высокого разрешения по нескольким изображениям низкого разрешения называется *суперразрешением* [1, 10].

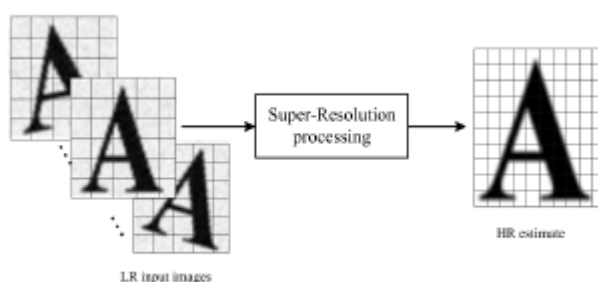


Рис. 12 – Процесс суперразрешения для изображения.

#### 3.1 Суперразрешение

В отличие от интерполяции и увеличения (re-sampling) изображений, повышающего разрешение, но не вносящего в изображение новой информации, суперразрешение использует информацию сразу с нескольких изображений, поэтому результирующее изображение высокого разрешения содержит в себе больше полезной информации. Это положительно влияет на качество методов идентификации.

Основной источник информации для суперразрешения — это изображения одного и того же объекта, незначительно движущегося на последовательных кадрах. Пиксели камеры, получающей изображение, имеют ненулевой размер, поэтому наблюдаемое значение пикселя соответствует не значению в конкретной точке на реальном изображении, а является усреднением по некоторой окрестности точки. Объект смещается, как правило, на нецелое число пикселей, поэтому на разных кадрах усреднение производится по разным окрестностям (см. рис. 13). Если движение объекта

известно, то можно использовать информацию со всех кадров для построения одного изображения высокого разрешения.

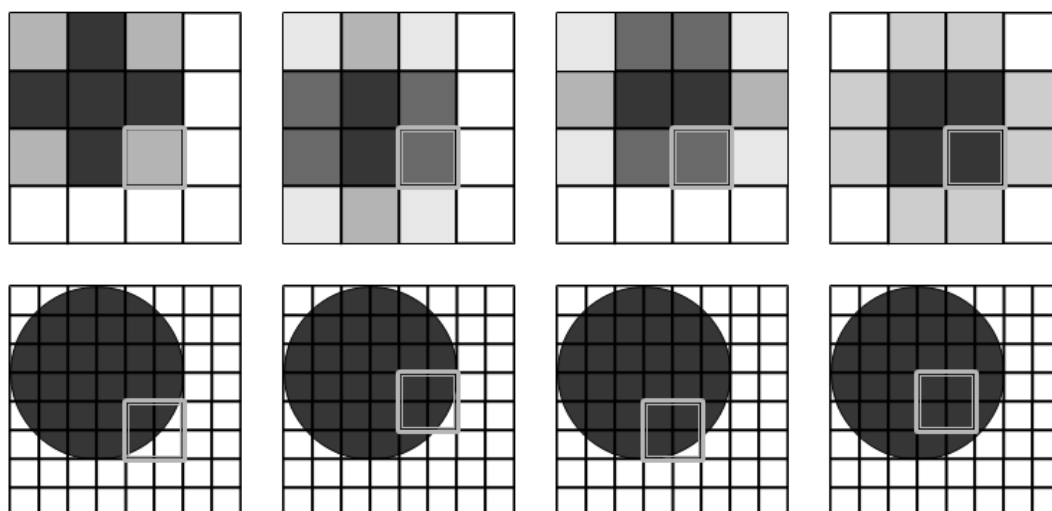


Рис. 13 - Соответствие между пикселями изображений низкого разрешения (вверху) и изображения высокого разрешения (внизу).

В реальных ситуациях движение объекта неизвестно, поэтому его необходимо сначала вычислить. Близкие друг к другу точки обычно движутся одинаково, поэтому обычно используется предположение о том, что движение в небольшой окрестности точки, в которой вычисляется движение, является плоскопараллельным. В этом случае повышается точность методов оценки движения и устойчивость к шуму, но в случае резкого изменения движения, например, в случае движущегося объекта на неподвижном фоне, метод будет давать неточные результаты.

Задача суперразрешения обычно ставится в виде задачи минимизации: найти такое изображение, которое, будучи уменьшенным с учётом движения, даст минимальное суммарное квадратичное отклонение от исходных изображений низкого разрешения. Эта задача является некорректно поставленной. Для её решения применяется регуляризирующий метод, основанный на методе регуляризации Тихонова. При этом, некорректно поставленная задача заменяется на близкую к ней корректно поставленную задачу путём добавления ограничений [11].

### 3.2 Математическая модель

Перед исследованием методов суперразрешения, рассмотрим обратную задачу построения кадров низкого разрешения при известном изображении высокого разрешения  $z$  (двумерная матрица интенсивности пикселей) и известных операторах движения  $F_k$

(отображение одного изображения на последующее) для каждого кадра. Эти операторы задают соответствия между точками первого и  $k$ -го кадров. При этом кадры низкого разрешения  $w_k$  можно представить в следующем виде:

$$w_k = A_k z = DHF_k z, \quad k = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где  $DH$  является оператором понижения разрешения. Этот оператор осуществляет последовательное применение фильтра высоких частот  $H$ , представляющего собой свертку с фильтром Гаусса и оператора прореживания  $D$ . Схематично это может быть проиллюстрировано на рис. 14.

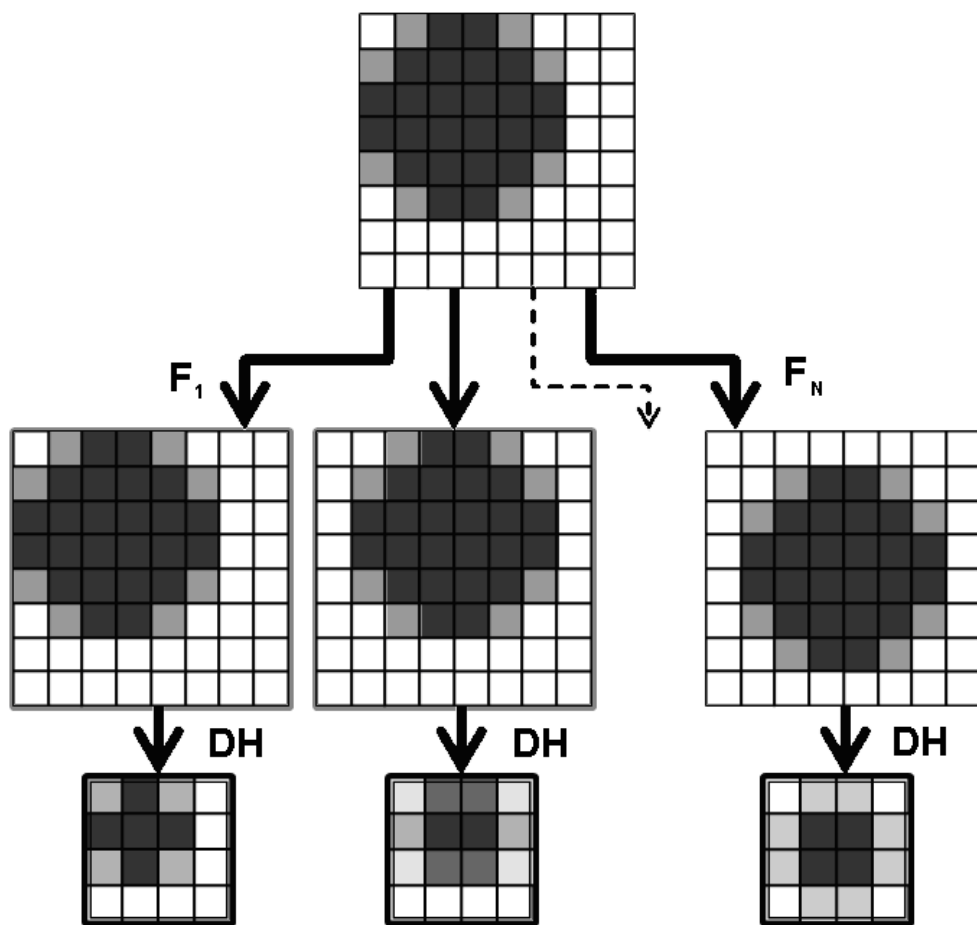


Рис. 14 - Схема построения кадров низкого разрешения (4).

Задача суперразрешения ставится в виде обратной задачи к задаче понижения разрешения (4). Таким образом, происходит поиск изображение высокого разрешения  $z$  при известных  $w_k$  и  $F_k$ . Задача качественного суперразрешения формулируется в виде задачи минимизации ошибки  $z_R$

$$z_R = \arg \min_z \sum_{k=1}^N \|A_k z - w_k\|_1,$$

$$\text{где } \|z\|_1 = \sum_{i,j} |z_{i,j}|.$$

(5)

Решением задачи является изображение высокого разрешения, которое наиболее близко ко всей последовательности  $w_k$  одновременно [11].

В качестве оценки (5) ошибки может быть использована стандартная евклидова норма:

$$z_R = \arg \min_z \left( \sum_{k=1}^N \|A_k z - w_k\|_1 + \alpha \Omega(z) \right).$$

(6)

#### 4. Модель повышения информативности изображений

В задачу повышения информативности цифровых изображений входит улучшение разрешения изображение и масштабирование изображения.

В силу анализа существующих методов повышения разрешения и масштабирования были выбраны в основе два метода – это метод билинейной интерполяции и быстрое суперразрешение.

Билинейная интерполяция была выбрана в силу ряда причин. Первое, преимуществом линейных методов является простота и их вычислительная эффективность. Второе, все неадаптивные интерполяторы пытаются подобрать оптимальный баланс между тремя нежелательными дефектами: граничными гало, размытием и ступенчатостью, а в билинейной интерполяции хоть и присутствуют дефекты размытости и ступенчатости, но их возможно устранить дальнейшим преобразованием при суперразрешении. Следовательно, важно, в нашем случае, при выборе метода масштабирования простота реализации и скорость работы.

Использование нескольких изображений низкого разрешения может повысить качество изображений высокого разрешения. Процесс реконструкции изображения высокого разрешения по нескольким изображениям низкого разрешения позволяет в итоге получить качественное изображение с увеличенным масштабом, что в итоге повышает информативность изображения. Например, для пилота самолета это важно. Пилот получает кадры низкого разрешения, так как они были получены с дальнего расстояния. На таких кадрах читаемость информации представляется трудным. А пилоту самолета необходимо видеть все объекты на своем дисплее. А с помощью программы по улучшению информативности кадров, созданной по соответствующей модели, пилот

сможет получать кадры высокого разрешения с хорошо читаемой информацией, при том, что изначально кадры были получены с того же дальнего расстояния.

Исходными данными для созданной модели будут являться последовательности кадров низкого разрешения одной и той же сцены, без больших смещений. Например, такие кадры получаются при съемке серии кадров при заходе самолета на посадку авиационными системами наблюдения (рис. 15), или при раскадровке серии видео низкого качества.



Рис. 15 – Пример исходных данных.

Построенная модель включает следующие этапы:

1. Этап предобработки исходных кадров.
2. Этап повышения информативности (улучшения разрешения)
3. Постобработки результирующего кадра.

Модель представлена на рис. 16. В модели используется билинейная интерполяция для масштабирования последовательности кадров, суперразрешение как основа. При суперразрешении на вход поступает последовательность кадров низкого разрешения с небольшими смещениями относительно друг друга и без изменения сцены. Из этой последовательности выбирается один кадр, который будет опорным. Опорным кадром является кадр, относительно которого будут находиться смещения остальных кадров. Смещения между кадрами необходимы для усреднения кадров. При усреднении с учётом межкадрового движения будут учитываться только те пиксели на изображениях, которых одинаковы по расположению во всех последовательностях кадров. Дальнейшая обработка результирующего кадра фильтром необходима для повышения резкости. В некоторых случаях использование фильтра не нужно, так как результирующий кадр и так получается в высоком разрешении, четким, без размытости и без появления различных артефактов. Применение суперразрешения как раз и позволяет убрать все артефакты присущее интерполяционным методам.

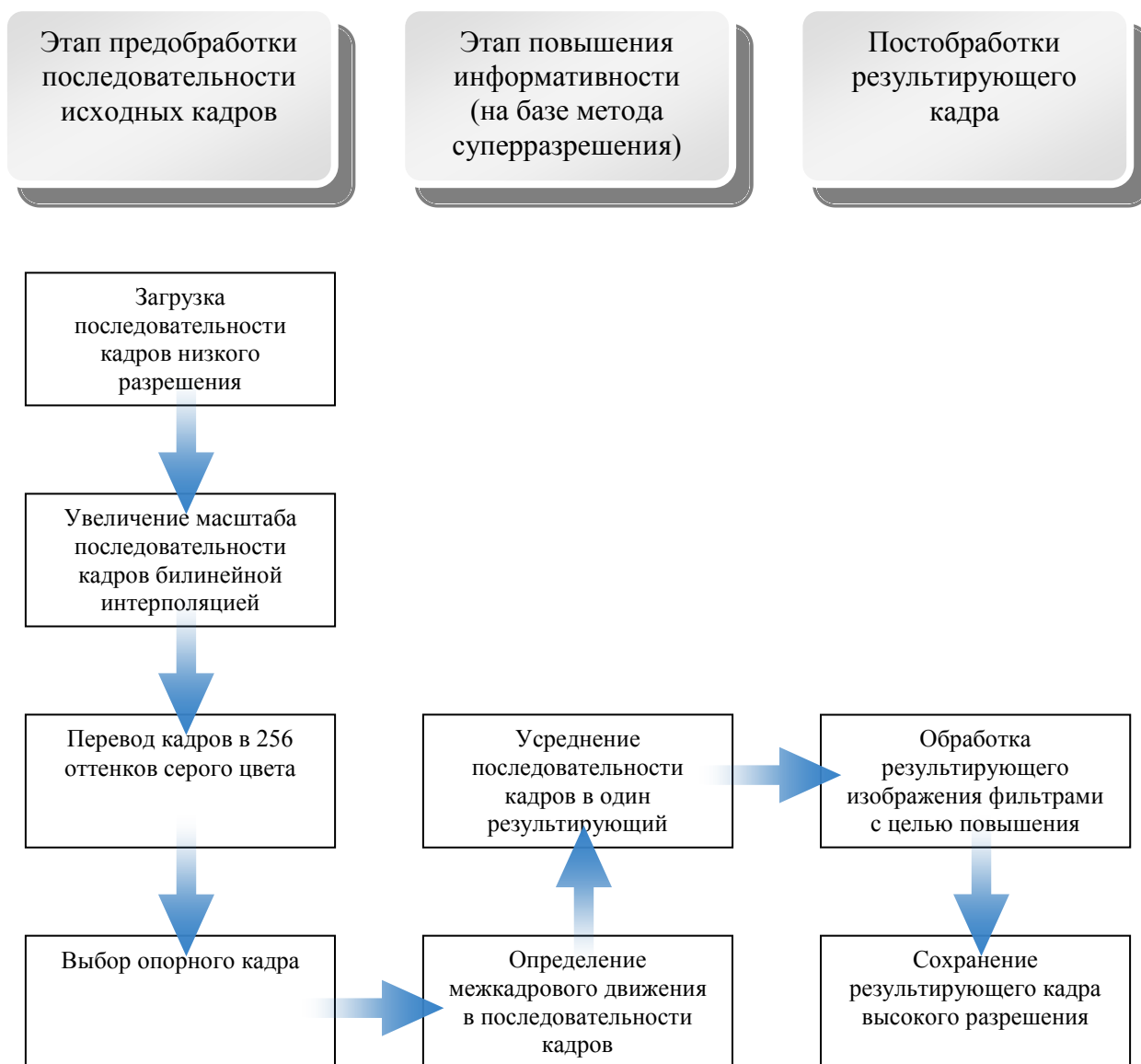


Рис. 16 – модель повышения информативности изображения.

### Заключение

В результате исследования в рамках статьи было сделано:

1. Проанализированы существующие методы интерполяции и суперразрешения.

Общепринятые алгоритмы интерполяции можно поделить на две категории: адаптивные и неадаптивные. Адаптивные методы изменяются в зависимости от предмета интерполяции (резкие границы, гладкая текстура), тогда как неадаптивные методы обрабатывают все пиксели одинаково. Были рассмотрены неадаптивные алгоритмы, такие как: метод ближайшего соседа, билинейный и бикубический метод интерполяции. Также все методы масштабирования можно разделить на линейные и нелинейные, или на однокадровые и многокадровые.

Изучение и разработка алгоритмов на базе метода суперразрешения является наиболее приоритетным, перспективным, так как программная реализация одного или нескольких таких методов помогает решать многие задачи в различных сферах жизни общества. Такие алгоритмы используются:

- В авиационных система по получению кадров взлётно-посадочной полосы;
- в фильмах и телевидении для восстановления качества видео, для получения информативности по каким-то деталям видео;
- при увеличении масштаба лица человека или номерного знака, чтобы привести изображение к более точно идентифицируемым объектам на сцене;
- при увеличении изображения деталей, чьи изображения были получены с камерами низкого разрешения;
- и т п

Например, НАСА использовало методы суперразрешения в течение многих лет, чтобы получить более подробные изображения из планет и других астрономических объектов.

Изучением, разработками алгоритмов суперразрешения занимаются многие лаборатории и институты такие, как ГосНИИАС, МГУ, МАИ. Существует большое количество работ и публикаций по данной тематике как зарубежных, так и отечественных.

2. Предложено использовать для улучшения информативности цифровых изображений принцип метода суперразрешения.

Использование нескольких изображений низкого разрешения может повысить качество изображений высокого разрешения. Процесс реконструкции изображения высокого разрешения по нескольким изображениям низкого разрешения называется суперразрешением.

3. Создана модель улучшения информативности изображений на базе метода суперразрешения.

С помощью построенной модели возможно дальнейшее построение алгоритмов и реализация в виде программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего улучшать качество изображений с целью повышения информативности.

### Список литературы

- [1]. *Крылов А.С.* // Лекция. Повышение разрешения изображений. - Лаборатория математических методов обработки изображений. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: <http://imaging.cs.msu.ru> ,



[http://esyr.org/wiki/%D0%A1%D0%9F%D0%9F%D0%9C/%D0%9C%D0%9C%D0%A0%D0%91%D0%97%2C\\_01\\_%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%28%D0%BE%D1%82\\_16\\_%D0%BC%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%29](http://esyr.org/wiki/%D0%A1%D0%9F%D0%9F%D0%9C/%D0%9C%D0%9C%D0%A0%D0%91%D0%97%2C_01_%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F_%28%D0%BE%D1%82_16_%D0%BC%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%29), свободный яз. – рус. - Дата доступа: 20.10.2012.

[2]. *Коссов П.В.* Улучшение качества тепловизионных изображений на основе суперразрешения и анализа ситуаций. // Автореферат диссертации, М., 2011 г.

[3]. *Прэнт У.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ.—М.: Мир, 1982.— Кн.1 — 312 с. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: [http://www.sernam.ru/book\\_prett1.php?id=47](http://www.sernam.ru/book_prett1.php?id=47), свободный яз. – рус. - Дата доступа: 20.10.2012.

[4]. Масштабирование цифровых изображений. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Интерполяция>, свободный яз. – рус. - Дата доступа: 18.10.2012.

[5]. Анализ изображений \ Image Processing Toolbox. // Статья сайта matlab.exponenta [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: [http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book5/8\\_1.php](http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book5/8_1.php), свободный яз. – рус. - Дата доступа: 20.10.2012.

[6]. *Thyssen A.* Resize and Scaling. // Examples of ImageMagick Usage (Version 6), 2009. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: <http://www.imagemagick.org/Usage/resize/>, свободный яз. – рус. - Дата доступа: 30.10.2012.

[7]. Интерполяция цифрового изображения // Учебник цифровой фотографии. Cambridge in colour [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: <http://www.cambridgeincolour.com/ru/tutorials/image-interpolation.htm>, свободный яз. – рус. - Дата доступа: 30.10.2012.

[8]. Билинейная интерполяция. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Билинейная\\_интерполяция](http://ru.wikipedia.org/wiki/Билинейная_интерполяция), свободный яз. – рус. - Дата доступа: 25.10.2012.

[9]. *Насонов А.В., Крылов А.С.* Быстрое суперразрешение изображений с использованием взвешенной медианной фильтрации. // Статья из Трудов Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск: XII – 2, М.: 2010 г., с. 101-105

[10]. *Насонов А.В., Крылов А.С.* Суперразрешение изображений и видео. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: <http://imaging.cs.msu.ru/ru/research/superresolution>, свободный яз. – рус. - Дата доступа: 18.10.2012.

- [11]. *Насонов А.В., Крылов А.С., Урмаев О.С.* Развитие методов повышения качества изображений лиц в видеопотоке // Статья МГУ.
- [12]. Бикубическая интерполяция. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Бикубическая\\_интерполяция](http://ru.wikipedia.org/wiki/Бикубическая_интерполяция) , свободный яз. – рус. - Дата доступа: 25.10.2012.
- [13]. *Выголов О.В., Визильтер Ю.В.* Разработка элементов авиационной системы улучшенного видения // Материалы из докладов конференции TVCS-2011 [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: <http://tvcs2011.technicalvision.ru/reports/15.03.11/14.15.ppt>, свободный яз. – рус. - Дата доступа: 15.11.2012.