

УДК 681.78

Р.С. Кочмарчик

Войсковая часть А2042

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ ЦЕЛЕЙ В МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ

*Изложен метод, иллюстрирующий возможность восстановления пространственных элементов изображений, утраченных в результате ограниченной разрешающей способности оптико-электронной системы. Разработана математическая модель цифровой обработки многоспектральных изображений в интересах пространственного сверхразрешения (повышения разрешающей способности) целей. Вычислен коэффициент корреляции исходного и восстановленного изображений в зависимости от масштаба сверхразрешения, позволяющий произвести сравнительный анализ процесса восстановления изображений.*

**Ключевые слова:** многоспектральные оптико-электронные системы; восстановление пространственных элементов изображений; цифровая обработка изображений.

### Введение

Многоспектральные оптико-электронные системы (ОЭС) воздушной разведки позволяют обнаруживать по спектральным признакам малоразмерные цели, которые занимают лишь часть пикселя в выходном изображении [1, 2]. При этом информация об их пространственных признаках частично или полностью теряется. В настоящей статье обсуждается возможность получения пространственного «сверхразрешения» целей путем цифровой обработки многоспектральных изображений в ОЭС.

Под «сверхразрешением» ОЭС здесь будем понимать такое линейное или угловое расстояние между двумя точками изображения, которое превышает их предельное разрешение, определяемое свойствами оптико-электронной системы, при котором их изображения сливаются.

В статье изложен метод цифровой обработки многоспектральных изображений, который позволяет улучшить пространственное разрешение целей. При использовании метода удается восстановить элементы изображения, утраченные в результате ограниченных возможностей оптико-электронной системы.

Основные положения метода изложены в работе [3] и состоят в использовании закономерностей распределения спектральных составляющих элементов цели в пространстве, а именно – в их «притяжении» к областям близкого спектрального состава с более высоким содержанием спектральных компонент, принадлежащих цели.

Однако, в работе отсутствует анализ факторов, влияющих на количественные характеристики повышения разрешающей способности в процессе восстановления элементов изображения.

**Целью** настоящей статьи является разработка математической модели цифровой обработки многоспектральных изображений и исследование факторов,

влияющие на количественные характеристики повышения пространственного разрешения изображений.

### Принцип повышения пространственного разрешения изображений в многоспектральных ОЭС

Обычно объекты (цели), подлежащие обнаружению, в зависимости от размера изображения на выходе оптико-электронной системы принято разделять на два класса – «полнопиксельные» и «субпиксельные». Полнопиксельной называют цель, занимающую полностью один или несколько пикселей изображения, при этом элементы фона в данных пикселях полностью отсутствуют (рис. 1, а).

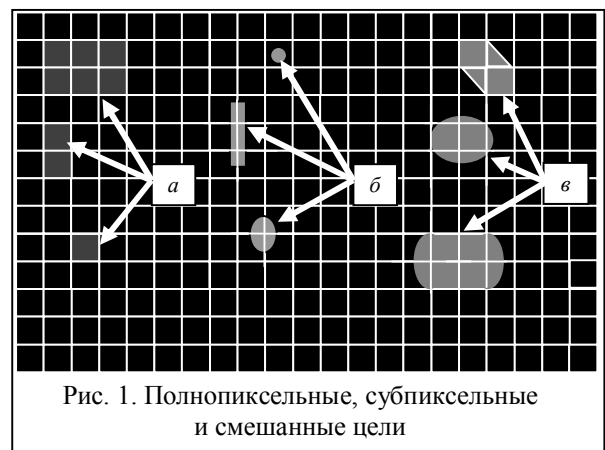


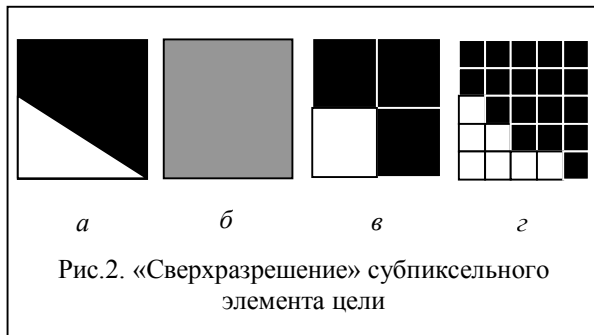
Рис. 1. Полнопиксельные, субпиксельные и смешанные цели

Субпиксельной называют цель, которая частично занимает пиксели изображения, при этом оставшаяся часть изображения занята фоном (рис. 1, б). Очевидно, что полнопиксельные цели являются идеализированным случаем, а в реальных системах, даже для многопиксельных целей, практически всегда будет иметь место смешивание цели и фона в отдельных пикселях на ее края (рис. 1, в). Такой класс целей будем называть «смешанными». В ре-

зультате смешивания спектрального состава цели и фона, информация об пространственных очертаниях цели в ОЭС будет искажена.

Рассмотрим принципы, положенные в основу метода повышения пространственного разрешения изображений многоспектральных оптико-электронных систем.

Пусть имеется некоторая область рассматриваемого пространства, часть из которой занята целью, а часть фоном (рис. 2, а). (Условно примем в качестве цели область белого цвета, а в качестве фона – область черного цвета). В связи с низким пространственным разрешением ОЭС, данная область займет один элемент светочувствительной матрицы, в результате чего спектральный состав цели и фона смешаются, смесь займет всю площадь пикселя и информация об пространственных очертаниях цели будет полностью потеряна (рис. 2, б).



Для решения задачи сверхразрешения осуществляется обработка исходного пикселя, в результате которой он будет разделен на определенное количество субпикселей, причем каждый из них будет занят либо целью, либо фоном (рис. 2, в, г). Естественный спектральный состав целей и фонов в многоспектральных ОЭС обладает свойством пространственной близости спектральных составляющих, которые также имеют свойство «притягиваться» к центрам однородных областей с близким спектральным составом [4]. Поскольку цели, в подавляющем большинстве случаев, являют собою локальные неоднородности на более однородном фоне, это свойство проявляется в выходном изображении многоспектральной ОЭС в том, что все полные и неполные пиксели цели будут группироваться вокруг некоторого пикселя и «притягиваться» к нему. Это притяжение можно рассматривать, как функцию расстояния данных пикселей до притягивающего и количественного содержания цели в притягивающем пикселе: чем оно выше, тем большим будет притяжение. Априорная информация о количественном содержании спектра цели в конкретном пикселе, а также его расстояние от притягивающего пикселя, позволяет рассчитать пространственное распределение цели в пределах пикселя и достичь пространственного разрешения, которое превышает

исходное пространственное разрешение в многоспектральной ОЭС.

Будем полагать, что объект обнаружен и количественное содержание спектральных составляющих цели в каждом интересующем нас пикселе известно. В этом случае мы получим изображение, состоящее из областей, содержащих либо цель, либо фон. Причем цели будут состоять из полных и неполных пикселей. Зная необходимое пространственное разрешение цели для ее распознавания и ее действительные размеры, зависящие от возможностей ОЭС, определим масштаб «сверхразрешения»:

$$Ms = \frac{Rn}{Rr}, \quad (1)$$

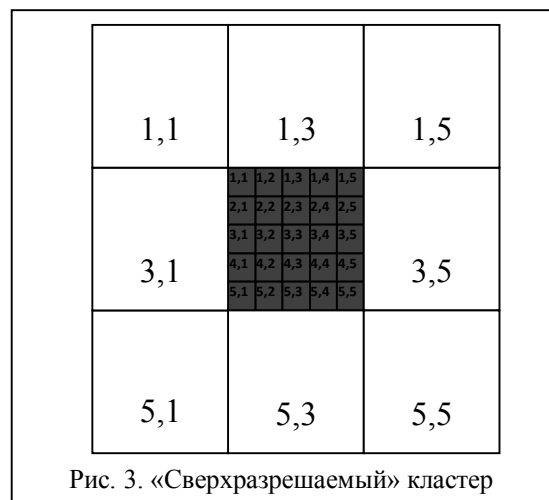
где  $Ms$  - необходимый масштаб «сверхразрешения»;  $Rn$  - необходимое пространственное разрешение;  $Rr$  - действительное пространственное разрешение.

Фактически, масштаб «сверхразрешения» означает, что после обработки каждый принадлежащий цели пиксель будет состоять из  $Ms^2$  субпикселей. (Например, при  $Ms=5$  сверхразрешаемый пиксель будет иметь размеры  $5 \times 5$  субпикселей и суммарно содержать 25 субпикселей (рис. 2, г). В связи со спецификой алгоритма обработки, полученное значение необходимо округлить до ближайшего большего нечетного значения. После определения масштаба «сверхразрешения», становится возможным рассчитать количественное содержание субпикселей цели в каждом «сверхразрешаемом» пикселе:

$$Nt = Ms^2 \times Pt, \quad (2)$$

где  $Nt$  - количество субпикселей цели в пикселе;  $Ms$  - масштаб «сверхразрешения»;  $Pt$  - количественное содержание цели в пикселе.

Рассмотрим схему размещения соседних пикселей вокруг «сверхразрешаемого», называемую кластером [3, 4] (рис. 3). Кластер имеет размеры  $3 \times 3$  пикселя, центральный пиксель является «сверхразрешаемым» и состоит из  $Ms^2$  субпикселей.



Каждый из окружающих пикселей притянет к себе определенное количество субпикселей, которое будет пропорционально количественному содержанию в нем цели [4]. Проведем расчет количества притянутых субпикселей к каждому пикселю кластера (кроме центрального, т.к. для него производится обработка). Общее содержание цели в окружающих пикселях равно:

$$Pt_R = \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 Pt_{i,j} \right) - Pt_{2,2}, \quad (3)$$

где  $Pt_R$  - содержание цели во всех окружающих пикселях;  $Pt_{i,j}$  - содержание цели в пикселе с координатами «i, j».

Поскольку «сверхразрешаемый» пиксель содержит  $Nt$  субпикселей, то каждый из окружающих его пикселей притянет к себе  $Nt_{i,j}$  его субпикселей:

$$Nt_{i,j} = \frac{Pt_{i,j}}{Pt_R} Nt. \quad (4)$$

Т.к. количество пикселей может быть только целым, результат расчета необходимо округлить до ближайшего большего целого:

$$\lfloor Nt_{i,j} \rfloor = \min \{ n \in Z \mid n \geq Nt_{i,j} \}. \quad (5)$$

Для определения конкретного пространственного положения каждого субпикселя, необходимо определить силу его притяжения к окружающим пикселям кластера, как функцию расстояния от него. В качестве данной функции предлагается использовать Евклидово расстояние:

$$D_{(i,j)(k,m)} = \sqrt{(i-k)^2 + (j-m)^2}, \quad (6)$$

где  $D_{(i,j)(k,m)}$  - Евклидово расстояние;  $i, j$  - координаты окружающего пикселя;  $k, m$  - координаты субпикселя.

Для получения корректных расстояний, окружающим пикселям кластера присвоим нумерацию, приведенную на рис.3. Расчет Евклидовых расстояний можно произвести единственный раз перед началом обработки для конкретного масштаба «сверхразрешения», поэтому на вычислительную ресурсоемкость алгоритма обработки он не влияет. Таким образом, становится возможным получить количественные характеристики «притяжения» пикселями кластера субпикселей «сверхразрешаемого» пикселя и сформулировать метод восстановления элементов изображения.

### Математическая модель восстановления элементов изображения

При математическом моделировании используют триаду модель – алгоритм – программа.

В связи с громоздкостью алгоритма восстановления изображения здесь ограничимся изложением программы.

Модель операции восстановления элементов изображения включает:

- обнаружение цели по спектральным признаками и выделение области изображения, содержащей цель;

- определение необходимого масштаба «сверхразрешения» и количественного содержания цели в каждом пикселе интересующей области;

- восстановление элементов цели, утраченных в результате низкого пространственного разрешения ОЭС.

Программу восстановления изображения, представим в следующем виде:

1) Предварительная обработка изображения включает:

1.1. Получить изображение и обнаружить на нем области, содержащие цель;

1.2. Определить масштаб «сверхразрешения» (формула 1);

1.3. Определить содержание компонентов «цель» и «фон» в каждом пикселе интересующей области;

1.4. Определить Евклидовы расстояния от каждого пикселя до каждого субпикселя (ф-ла 6) кластера;

1.5. Упорядочить Евклидовы расстояния пиксель – субпиксель для каждого пикселя кластера в порядке возрастания;

2) Отсортировать пиксели в обрабатываемой области в порядке убывания количественного содержания в них цели;

3) Определить в области пиксель с максимальным содержанием компонентов цели, который будет являться ее центром;

4) Выделить кластер, центральным пикселем которого является центр цели (рис. 3);

5) Разделить центральный пиксель кластера на субпиксели в соответствии с масштабом «сверхразрешения»;

6) Определить количество занятых целью субпикселей в центральном пикселе (ф-ла 2);

7) Определить общее содержание спектральных компонентов цели в каждом пикселе кластера (ф-ла 3);

8) Определить количество притягиваемых каждым пикселем субпикселей кластера (ф-ла 4);

9) Провести обработку для центрального пикселя данного кластера;

9.1. Определить пиксель кластера с максимальным содержанием компонентов цели;

9.2. Заполнить обрабатываемый пиксель определенным для данного пикселя количеством притягиваемых субпикселей. Заполнение производить в порядке увеличения Евклидова расстояния, полученного в (ф-ла 6);

9.3. Если субпиксель занят, необходимо заполнить следующий свободный;

9.4. Пункты (9.1)-(9.3) повторить для всех пикселей кластера, кроме центрального;

10) Пункты (3)-(9) повторить для всей области, содержащей цель.

## Оценка количественных характеристик процесса восстановления элементов изображения

Для проверки работоспособности разработанной математической модели обработки изображений, использовалось двухцветное изображение с разрешением 110×110 пикселей (рис. 4) на котором цель – самолет представлен на однородном темном фоне. Яркостные свойства цели и фона соответствовали следующим значениям: цель - 255 единиц; фон – 0 единиц.

Далее размер изображения был уменьшен в 11 раз. Для этого изображение разбивалось на кластеры размером 11×11 пикселей, а затем, в каждом кластере значения пикселей усреднялись, превращая его в единственный пиксель. В результате обработки получено изображение цели размером 10×10 пикселей (рис. 5). (Изображение увеличено в графическом редакторе в 10 раз, а исходное изображение представлено в левом верхнем углу).

В результате обработки уменьшенного изображения с масштабом сверхразрешения  $M_s = 11$  получено изображение самолета размером 110×110 пикселей с очертаниями, близкими к исходному изображению (рис. 4). Результат восстановления уменьшенного изображения представлен на рис. 6.

Для оценки количественных характеристик обобщаемого метода обработки многоспектральных изображений сравним сходство исходного изображения (рис.4) и уменьшенного изображения (рис. 5), а затем - исходного изображения (рис. 4) и восстановленного изображения (рис. 6). Обычно подобный класс задач решается путем представления изображения в виде вектора образа [1]. Для получения векторов образов представим сравниваемые изображения, как дискретные пространственные сигналы из  $m \times n$  элементов и сформируем из них вектор образа в многомерном пространстве, в котором число пространственных координат соответствует числу элементов в изображении. Теперь для сравнения сигналов используем коэффициент корреляции двух одномерных сигналов [6]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$

где  $N = m \cdot n$  – размерность векторов изображений;  $x_i, y_i$  –  $i$ -ые элементы сравниваемых векторов изображений;  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$  – средние значения сравниваемых векторов изображений.

Поскольку в рассматриваемом примере нами выбран масштаб «сверхразрешения», соответствующий коэффициенту масштабирования исходного изображения ( $M_s = 11$ ), то размерности исходного и обработанного изображения равны. Для приведения

размерности уменьшенного изображения к размерности исходного, создадим заполненное фоном изображение с размерами исходного, а в его центре разместим уменьшенное изображение (рис. 7).

С целью изучения влияния масштаба «сверхразрешения» на результаты обработки изображения, проведено математическое моделирование их обработки для уменьшенных в 3,5,7,9,11 раз изображений с последующей их обработкой с масштабами «сверхразрешения» ( $M_s = 3,5,7,9,11$ ) соответственно. Результаты расчетов коэффициентов корреляции «исходное изображение – уменьшенное изображение» и «исходное изображение – «сверхразрешенное» изображение» для всех ( $M_s$ ) приведены на рис. 8.

Из графика зависимости  $r(M_s)$  следует, что с уменьшением размеров анализируемого изображения коэффициент корреляции «исходное изображение – уменьшенное изображение» достаточно быстро уменьшается. Коэффициент корреляции «исходное изображение – восстановленное изображение» слабо зависит от масштаба «сверхразрешения» и флюктуирует в диапазоне  $(0,76 \leq r \leq 0,916)$ , что, по-видимому, можно объяснить возникновением дополнительных потерь при обработке изображений в случае некруглых размеров изображения масштабов  $M_s$ .



Рис. 4. Исходное изображение



Рис. 5. Уменьшенное изображение



Рис. 6. Восстановленное изображение

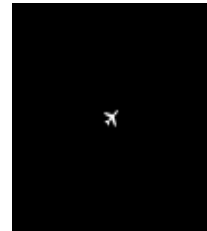


Рис. 7. Уменьшенное изображение, приведенное к размерам исходного

Для получения количественных оценок улучшения восстановленного изображения по сравнению с уменьшенным и рассчитаем коэффициент улучшения  $K_s$  для каждого масштаба «сверхразрешения»:

$$K_s = r_{SS} / r_{SR}, \quad (8)$$

где  $r_{SS}$  – коэффициент корреляции «исходное изображение – восстановленное изображение»;  $r_{SR}$  – коэффициент корреляции «исходное изображение –

уменьшенное изображение». На рис. 9 изображена зависимость коэффициента улучшения изображений от масштаба обработки. Показано, что с увеличением масштаба «сверхразрешения» качество изображения возрастает и достигает своего максимального значения при ( $M_s = 11$ ).

Однако, это не означает, что с увеличением масштаба «сверхразрешения» коэффициент улучшения  $K_s$  будет неограниченно возрастать. Очевидно существование некоторых предельных минимальных размеров цели, при которых вся информация об их пространственных характеристиках будет полностью потеряна и дальнейшая обработка не сможет их улучшить. Минимальные размеры цели, пригодной для обсуждаемого метода обработки, будут зависеть от многих факторов, основными из которых по-видимому связаны со сложностью контуров цели и наличием у цели мелких деталей, а

также искажением оптического сигнала при прохождении через атмосферу и отношением «сигнал/шум» на выходе ОЭС.

Для оценки минимальных размеров цели, пригодной для предлагаемой данной статье обработки изображений, проведено «сверхразрешение» изображений, полученных из исходного путем уменьшения в 15, 17, 25 раз. Результаты обработки приведены на рис. 10 – 12.

Анализ полученных результатов показал, что для используемой в примере конкретной цели возможно получить ее узнаваемые очертания, если она уменьшена не более, чем в 15 раз по сравнению с исходной (рис. 10). При этом ее размеры составляют  $7 \times 7$  пикселей. При дальнейшем уменьшении размеров обрабатываемого изображения данной цели «сверхразрешение» положительных результатов не дает и очертания цели не улучшаются (рис. 11, 12).

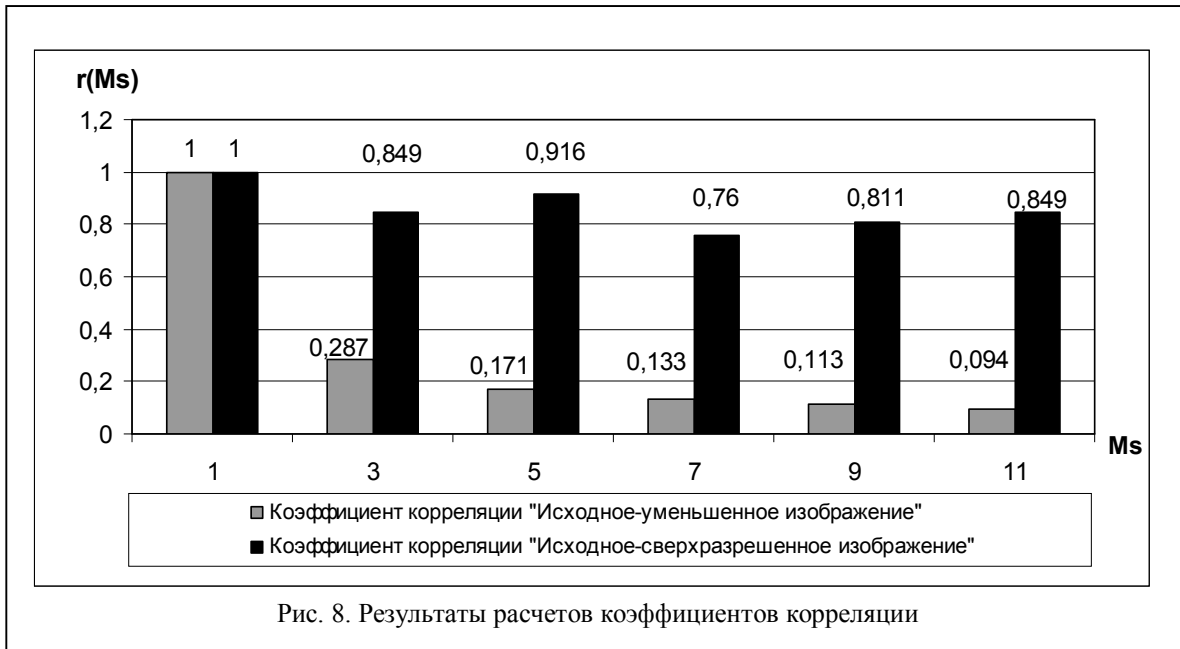


Рис. 8. Результаты расчетов коэффициентов корреляции

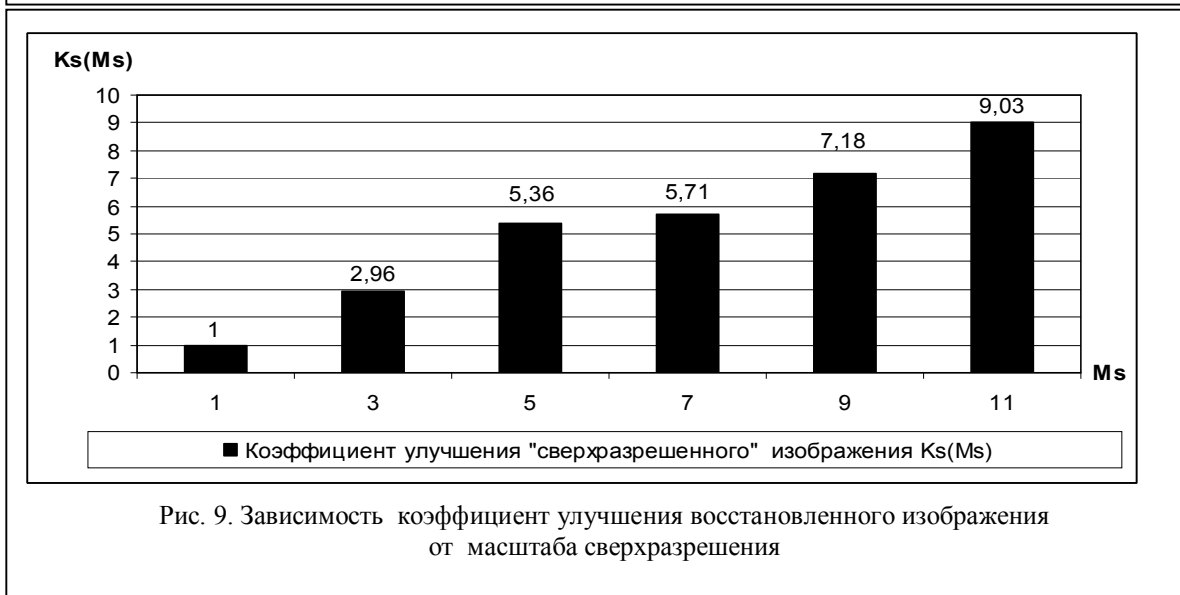


Рис. 9. Зависимость коэффициент улучшения восстановленного изображения от масштаба сверхразрешения



Рис. 10. Изображение, уменьшено в 15 раз при  $M_s=15$



Рис. 11 Изображение, уменьшено в 17 раз при  $M_s=17$



Рис. 12. Изображение, уменьшено в 25 раз при  $M_s=25$

## Выводы

Для многоспектральных оптоэлектронных систем разработана математическая модель цифровой обработки изображений и исследованы факторы, влияющие на качественные характеристики повышения пространственного разрешения изображений утраченных в результате ограниченности разрешающей способности оптической системы.

Сравнительный анализ показал, что в результате восстановленного уменьшенного изображения получено изображение с очертаниями, близкими к исходному.

Вычислены коэффициенты корреляции «исходное изображение – уменьшенное изображение», а также и коэффициенты корреляции «исходное изображение восстановленное изображение в зависимости от масштаба «сверхразрешения» и произведен их сравнительный анализ.

## Список литературы

1. Купченко Л.Ф. Динамическая спектральная фильтрация оптического излучения в оптоэлектронных системах / Л.Ф. Купченко, А.С. Рыбьяк // *Электромагнитные*

волны и электронные системы: Международный научно-технический журнал. – М.: Радиотехника. – 2011. – № 4. – С. 32-43.

2. Купченко Л.Ф. Обнаружение объектов по спектральным признакам в оптико-электронных системах с использованием принципов динамической фильтрации / Л.Ф. Купченко // *Прикладная радиоэлектроника*. – Х.: Изд-во ХНУРЭ, 2011. – Т. 10, № 1. – С. 22-26.

3. Kasetkasem T. Super resolution land cover mapping using a Markov Random field based approach / T. Kasetkasem, M.K. Arora, P.K. Varshney // *Remote Sensing Environment*. – 2005. – Vol. 96, No 3-4. – P. 302-314.

4. Tiwari K.C. Target Detection and Enhancement / K.C. Tiwari, M. Arora, D. Singh // *Hyperspectral Images/ Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVII*. – 2013. – Vol. 63, № 1. – P. 63-68.

5. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес – М. 1978. – 344 с.

6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ. – М.: Наука, 1986. – 626 с.

Поступила в редколлегию 1.08.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ПРОСТОРОВЕ ЗВЕРХ РОЗДІЛЕННЯ ЦІЛЕЙ В БАГАТО СПЕКТРАЛЬНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ ПОВІТРЯНОЇ РОЗВІДКИ

Р.С. Кочмарчук

Викладено метод, який ілюструє можливість відновлення просторових елементів зображень, втрачених в результаті обмеженої роздільної здатності оптико-електронної системи. Розроблена математична модель цифрової обробки багатоспектральних зображень в інтересах просторового зверх розділення (підвищення роздільної здатності) цілей. Обчислено коефіцієнт кореляції вихідного та відновленого зображень в залежності від масштабу зверх розділення, що дозволяє провести порівняльний аналіз процесу відновлення зображень.

**Ключові слова:** багатоспектральні оптико-електронні системи, відновлення просторових елементів зображень, цифрова обробка зображень.

## SPATIAL TARGET SUPER RESOLVING IN MULTISPECTRAL ELECTRO-OPTICAL SYSTEMS OF AERIAL RECONNAISSANCE

R.S. Kochmarchuk

The article deals with the method of showing the ability to recover lost spatial image elements as the result of the limited electro-optical system resolution. It develops the mathematical model of multispectral images of digital processing for the benefit of spatial super-resolution (increasing resolution) targets. There has been calculated the correlation coefficient of the original and the reconstructed images depending on the scope of super-resolution. It permits a comparative analysis of the image restoration.

**Keywords:** multispectral electro-optical systems, restoration of image spatial elements, image digital processing.