

Н.В. Белоус, к.т.н., проф.

А.И. Красов, аспирант.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ ПЕРЕСЧЕТА ЦИФРОВЫХ ТЕКСТОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Предложен вычислительный метод определения постоянных пересчета цифровых текстовых изображений на базовое изображение. Имеет место противоречие между необходимостью использовать кубической модели постоянных пересчета и малым количеством реперных пар «символ текущего кадра – символ базового кадра» на первых этапах отождествления символов текущего и базового кадров. Для выхода из сложившегося противоречия в статье предложено многоэтапное увеличение порядка постоянных пересчета с уточнением их параметров с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар реперных символов. Для обеспечения практически равной точности оценок координат символов на всем кадре реперные символы распределяются равномерно на кадре, а из множества кандидатов исключаются оценки положений близких символов. В реперные символы отбираются только пары «символ текущего кадра – символ базового кадра», модуль суммарного отклонения между оценками координат, которых меньше соответствующего среднего значения в выбранной совокупности отождествленных пар.

Так же в статье введены показатели точности определения координат символов на базовом кадре как реперных символов так и всех остальных символов, расположенных на цифровом изображении.

Ключевые слова: обработка изображений; текстовое изображение; реперные символы; постоянные пересчета; показатели точности определения координат символов на кадре.

Введение. В ряде случаев изображение текстовой информации не достаточно хорошего качества, чтобы проводить на нем распознавание данной текстовой информации. Даже любые операции по фильтрации данных изображений мало что могут изменить [1, 2]. Можно складывать целую серию изображений с одной и той же текстовой информацией. Однако, зачастую изображения одной и той же текстовой информации получены под разными ракурсами. Для обеспечения качественного сложения и получения суперкадра с текстовой информацией необходимо сложение кадров проводить в так называемом базовом кадре, а для этого необходимо иметь методы пересчета изображения текущего кадра в изображение базового.

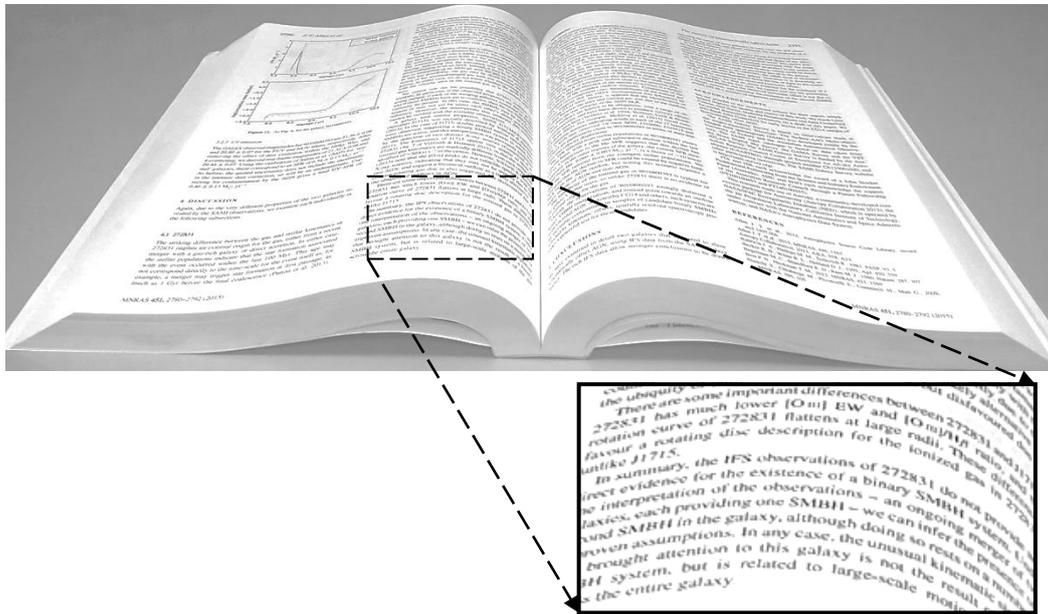
Анализ литературы. В работе [3] решена задача пересчета изображения с текстовой информацией в линейном приближении. Однако при наличии нелинейных искажений изображений этого не достаточно.

Аналогичная проблема нелинейных искажений, вносимых оптической системой имеет место в других предметных областях [2, 4, 5]. Данная проблема может быть решена введением уравнения редукции и определения его постоянных путем их оценки на множестве реперных знаков.

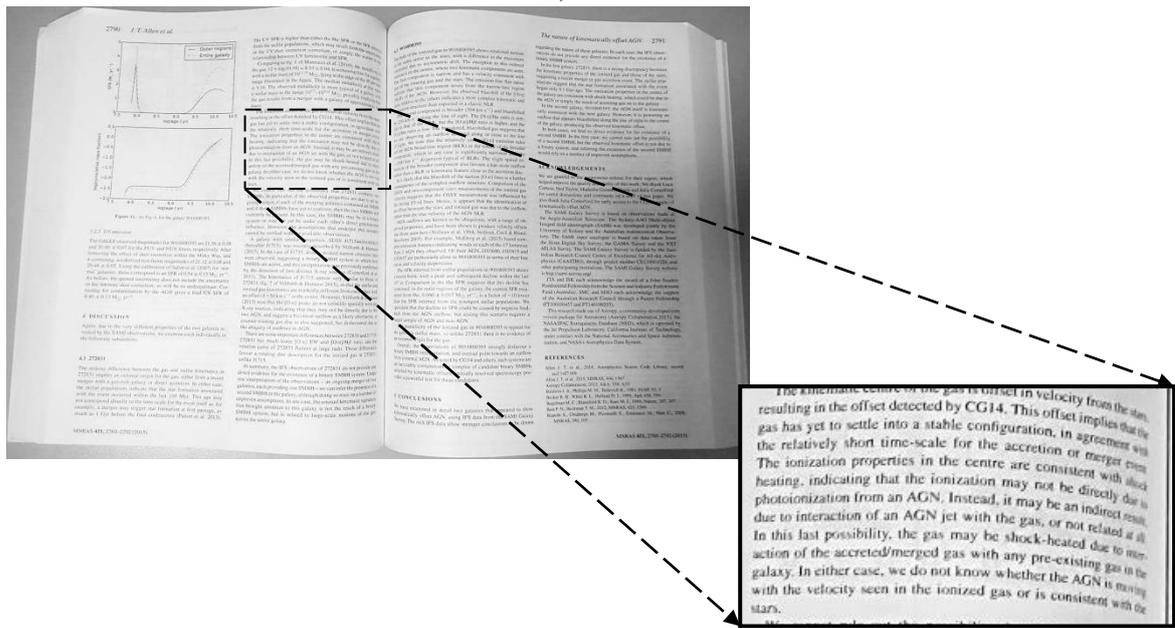
Постановка задачи. Имеют место цифровые кадры, содержащие текстовые изображения. Для произвольно выбранного символа можно найти координаты центра множества 4-связных пикселей ее изображения для любого кадра, в том числе базового. Могут быть определены положения отдельных символов на цифровом кадре как среднее значение координат пикселей, им соответствующих.

Можно себе представить идеальный лист, содержащий номерной знак или любую другую текстовую информацию. Соответствующую этому листу систему координат можно назвать идеальной, а соответствующий ей кадр – базовым. На самом деле лист с текстовой информацией каким-то образом изогнут (рис. 1). Поэтому, в общем случае система координат цифрового кадра отличается от идеальной [6]. Иными словами, координаты символа в системе координат цифрового кадра не совпадают с идеальными координатами, которые, можно считать, соответствуют системе координат базового кадра. При этом предполагается, что

ошибки в отображении положения символа на цифровом кадре используемой оптической системы возможно учесть в форме редуccionного уравнения [7], уравнения пересчета координат пикселей текущего кадра в их координаты базового кадра, уравнения, зависящего только от расположения символа на кадре.



a)



b)

Рис. 1. Искажения изображения, которые необходимо убрать перед операцией сложения текстовых изображений

Нахождение параметров линейного редуccionного уравнения (параметров линейного пересчета координат любого кадра в системе координат базового кадра) известно [3]. Однако различные искривления листа, на котором находится текст, приводят к тому, что линейные пересчеты не обеспечивают качества обработки изображений с текстовой информацией, например, сложения нескольких таких кадров.

На основании рассмотренных исходных данных, необходимо определить координаты символов в системе координат (СК) базового кадра.

Для этого предлагается выбрать реперные символы на каждом кадре и на их основе найти параметры нелинейных редуцированных уравнений.

Целью статьи является разработка вычислительного метода определения постоянных пересчета цифровых текстовых кадров на базовый кадр, предназначенного для качественной обработки изображений с текстовой информацией с учетом основных особенностей процесса их формирования.

Изложение основного материала. Оценки координат центра символа на цифровом изображении можно получить согласно выражений:

$$X_{0i} = \frac{1}{N_{0i}} \sum_{k,i}^{O_i} x_i ; Y_{0i} = \frac{1}{N_{0i}} \sum_{k,i}^{O_i} y_k , \quad (1)$$

где X_{0i} , Y_{0i} – оценки положений координат центр i -го символа исследуемого кадра;

x_i , y_k – координаты пикселей кадра;

O_i – множество пикселей, составляющих изображение i -го символа;

N_{0i} – количество пикселей, составляющих изображение i -го символа.

Множество оценок положений центра символов n -го кадра обозначается Ω_n и состоит из $\Omega_n = \{Y_{1r}, \dots, Y_{ir}, \dots, Y_{Qr}\}$ оценок координат положения $Y_i = \{x_{in}; y_{in}\}$. Множество оценок положений центров символов исследуемой серии кадров Ω состоит из множеств оценок положений центров символов кадров рассматриваемой серии.

Ошибки координат i -ой оценки положения центра символов на n -ом кадре можно считать независимыми как от символа к символу, так и от координате к координате.

Идея выбора реперных символов на цифровых изображениях. Наличие оценок координат углов номерных знаков [3] позволяет получить линейные постоянные пересчета (2). Линейных постоянных пересчета достаточно для отождествления всех изображений одних и тех же символов на разных кадрах, однако их недостаточно для совмещения/сложения нескольких текстовых цифровых кадров в одно изображение. Чаще всего при итоговом пересчете координат СК цифрового кадра используется кубическая модель постоянных пересчета, обеспечивающая надежное совмещение изображений на всем базовом кадре.

В свою очередь для надежного получения кубических постоянных пересчета необходимо больше реперных символов, иными словами, больше надежных пар символ текущего кадра – символ базового кадра. Таким образом, имеет место противоречие между необходимостью использовать кубической (не менее) модели постоянных пересчета и малым количеством реперных пар «символ текущего кадра – символ базового кадра» на первых этапах отождествления символов текущего и базового кадров.

Выходом из сложившегося противоречия является многоэтапное усложнение параметров постоянных пересчета (увеличение порядка постоянных пересчета [4] с уточнением их параметров) с одновременным увеличением количества используемых для их расчета пар (реперных символов).

Отождествление на каждом этапе производится в СК цифрового кадра. Для этого с использованием постоянных пересчета координаты символов на базовом кадре пересчитываются в данную СК.

Равномерное распределение кандидатов в реперные символы на цифровом изображении. Для обеспечения практически равной точности оценок положений координат символов на всем кадре целесообразно реперные символы распределить равномерно на кадре. Равномерное распределение отождествленных пар текстовых символов на всем кадре обеспечит практически равную точность совмещения изображений на всем кадре. Очевидно, что концентрация реперных символов в каком-то участке кадра (например, в центре) повышает точность совмещения изображения этого участка кадра за счет ее снижения в других областях кадра. Кроме того, равномерное распределение отождествленных пар на кадре помогает избежать случаев, соответствующих наличию в одной области кадра большого количества артефактов и помех.

В работе для равномерного распределения отождествленных пар на кадре, при выборе символов для формирования постоянных пересчета (при выборе кандидатов в реперные символы) проводится фрагментация кадра. В каждом фрагменте кадра, в качестве кандидатов в реперные символы, отбирается одинаковое количество символов. Иными словами, кадр делится

на $S_{fr} \times S_{fr}$ (S_{fr}^2) частей. Заданное количество оценок положений центра символов кадра N_{sym} делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются N_{sym}/S_{fr}^2 , символы с наибольшим количеством пикселей.

В свою очередь, на втором и третьем этапе метода в каждом фрагменте кадра дополнительно отбираются очередные $\Delta N_{sym}/S_{fr}^2$ символы с наибольшим количеством пикселей.

Отбраковка кандидатов в реперные символы. На каждом этапе отбора реперных символов из множества кандидатов исключаются оценки положений близких символов (расстояние между которыми не превышает наперед заданную величину r_{sym}). Иными словами i -е и m -е оценки положений символов кадра исключаются из кандидатов в реперные символы, если выполняется условие:

$$\sqrt{(x_{symj} - x_{symk})^2 + (y_{symj} - y_{symk})^2} \leq r_{sym}, \quad (2)$$

где x_{symk} , y_{symk} – координаты символов, содержащиеся в оценках положений центра символа близких символов в СК ПЗС-кадра

Затем производится решение задачи отождествления как задачи о назначениях, решаемой венгерским [8, 9].

Для улучшения показателей точности оценок постоянных пересчета, после решения задачи отождествления производится отбраковка значительного количества отождествленных пар. Решающей статистикой для отбраковки пар служит суммарное отклонение $\Delta_{xy(l)}$ между оценками в СК координат базового кадра в отождествленной паре «символ текущего кадра – символ базового кадра»:

$$\Delta_{xy(l)} = \sqrt{(x_{\hat{oi}(l)} - x_{jn(l)})^2 + (y_{\hat{oi}(l)} - y_{jn(l)})^2}, \quad (3)$$

$x_{\hat{oi}(l)}$, $y_{\hat{oi}(l)}$ – оценки прямого восхождения и склонения символа из i -го базового кадра;

$x_{jn(l)}$, $y_{jn(l)}$ – оценки прямого восхождения и склонения i -го символа n -го кадра;

l – номер отождествленной пары «символ текущего кадра – символ базового кадра»;

Пара отбраковывается, если значение Δ_{xy} превышает критическое значение:

$$\Delta_{xy(l)} > P_{cull} \hat{\Delta}_{xy}, \quad (4)$$

$$\text{где } \hat{\Delta}_{xy} = \sqrt{\frac{1}{N_l} \left(\left(\sum_{l=1}^{N_l} x_{\hat{oi}(l)} - x_{jn(l)} \right)^2 + \left(\sum_{l=1}^{N_l} y_{\hat{oi}(l)} - y_{jn(l)} \right)^2 \right)} \quad (5)$$

– средний, на множестве выбранных отождествленных пар, модуль отклонения отождествленной пары в координатах центра символа;

N_l – количество отождествленных пар «символ текущего кадра – символ базового кадра», используемых для расчета постоянных пересчета;

P_{cull} – коэффициент правила отбраковки пар «символ текущего кадра – символ базового кадра» из множества реперных символов.

При $P_{cull} = 1$, для расчета постоянных пересчета (для отбора в реперные символы) отбираются только пары, модуль отклонения которых меньше среднего значения модуля отклонения отождествленной пары в координатах центра символа в выбранной совокупности отождествленных пар.

В результате использования указанного выше цензурирования претендентов в реперные символы на исследуемом кадре не всегда реперными символами становятся символы с наибольшим количеством пикселей не смотря на изначально кажущуюся очевидность такого утверждения.

Оценка координат символов в СК базового кадра по их известным координатам в системе координат текущего кадра. Согласно постановке задачи необходимо преобразовать полученные координаты символа в СК текущего кадра в систему координат цифрового кадра, с учетом ее отличия от идеальной. В целом имеет место задача оценки зависимости между координатами символов в двух системах координат (СК): СК кадра (x, y) и идеальной СК $(x_{\hat{oi}}, y_{\hat{oi}})$.

Первоначально, из априорных соображений, задается вид этой модели. В простейшем случае, рассматриваемая модель сводится к линейному преобразованию [10]:

$$\begin{cases} x_{\bar{a}i} = a_0 + a_1x_i + a_2y_i; \\ y_{\bar{a}i} = b_0 + b_1x_i + b_2y_i. \end{cases} \quad (6)$$

Коефіцієнти системи уравнений (6) задають залежність между ідеальною системою координат і системою координат цифрового кадра. Поєтому (6) можна назвати уравнением зв'язи, а його коефіцієнти можна назвати «постійними пересчета». Вперше термін з'явився во времена применения фотографических пластинок.

Ізвестними величинами в системі уравнений (6) являються координати центра символа базового кадра (ідеальні координати) $(x_{\bar{a}i}, y_{\bar{a}i})$ і прямокутні (x_i, y_i) координати i -ї реперного символа в СК іследуемого кадра. Требуется найти вектор коефіцієнтів постійних пересчета

$$\Psi = \{\Psi_x, \Psi_y\}, \quad (7)$$

в котором:

$$\Psi_x = \{a_0, a_1, \dots, a_p\}; \quad (8)$$

$$\Psi_y = \{b_0, b_1, \dots, b_p\}, \quad (9)$$

где p – количество используемых коэффициентов.

Однако модель (6) имеет ряд недостатков. Прежде всего, она применима только к оптическим системам с небольшим полем зрения или с использованием небольших участков поля зрения оптической системы. Или лист, на котором нанесена текстовая информация не сильно искажен (рис 1). Наличие только линейных членов делают её чувствительной к любым искажениям изображения. По этим причинам применение приведенной модели целесообразно только в случае определения координат символа, находящегося в центре цифрового кадра.

Для определения координат на всей плоскости кадра можно использовать квадратичную модель [11]:

$$x_{\bar{a}i} = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2; \quad (10)$$

$$y_{\bar{a}i} = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2. \quad (11)$$

Или модели более высоких порядков, например, кубическую [11]:

$$x_{\bar{a}i} = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + a_6x_i^3 + a_7x_i^2y_i + a_8x_iy_i^2 + a_9y_i^3; \quad (12)$$

$$y_{\bar{a}i} = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2 + b_6x_i^3 + b_7x_i^2y_i + b_8x_iy_i^2 + b_9y_i^3. \quad (13)$$

Или модель с полиномом пятой степени:

$$\begin{aligned} x_{\bar{a}i} = & a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + a_6x_i^3 + a_7x_i^2y_i + \\ & + a_8x_iy_i^2 + a_9y_i^3 + a_{10}x_i^4 + a_{11}x_i^3y_i + a_{12}x_i^2y_i^2 + a_{13}x_iy_i^3 + a_{14}y_i^4 + \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & + a_{15}x_i^5 + a_{16}x_i^4y_i + a_{17}x_i^3y_i^2 + a_{18}x_i^2y_i^3 + a_{19}x_iy_i^4 + a_{20}y_i^5; \\ y_{\bar{a}i} = & b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2 + b_6x_i^3 + b_7x_i^2y_i + \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & + b_8x_iy_i^2 + b_9y_i^3 + b_{10}x_i^4 + b_{11}x_i^3y_i + b_{12}x_i^2y_i^2 + b_{13}x_iy_i^3 + b_{14}y_i^4 + \\ & + b_{15}x_i^5 + b_{16}x_i^4y_i + b_{17}x_i^3y_i^2 + b_{18}x_i^2y_i^3 + b_{19}x_iy_i^4 + b_{20}y_i^5 \end{aligned}$$

Для определения коэффициентов постоянных пересчета достаточно наличия шести (квадратичная), десяти (кубическая) или двадцати одной (модель пятой с полиномом степени) реперных символов (количество уравнений определяется количеством неизвестных). Однако наличие ошибок снижает точность полученных коэффициентов. Поэтому для их вычисления выбирают существенно избыточную совокупность реперных символов [12] и для каждого символа записывают такую пару уравнений, а затем решают полученную избыточную систему уравнений методом наименьших квадратов (МНК) [11]:

$$\begin{cases} x_{\bar{a}1} = a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 + a_3x_1^2 + a_4x_1y_1 + a_5y_1^2 + a_6x_1^3 + a_7x_1^2y_1 + a_8x_1y_1^2 + a_9y_1^3; \\ \vdots \\ x_{\bar{a}i} = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + a_6x_i^3 + a_7x_i^2y_i + a_8x_iy_i^2 + a_9y_i^3; \\ \vdots \\ x_{\bar{a}n} = a_0 + a_1x_n + a_2y_n + a_3x_n^2 + a_4x_ny_n + a_5y_n^2 + a_6x_n^3 + a_7x_n^2y_n + a_8x_ny_n^2 + a_9y_n^3. \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} y_{\delta 1} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 y_1 + b_3 x_1^2 + b_4 x_1 y_1 + b_5 y_1^2 + b_6 x_1^3 + b_7 x_1^2 y_1 + b_8 x_1 y_1^2 + b_9 y_1^3; \\ \vdots \\ y_{\delta i} = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2 + b_6 x_i^3 + b_7 x_i^2 y_i + b_8 x_i y_i^2 + b_9 y_i^3; \\ \vdots \\ y_{\delta n} = b_0 + b_1 x_n + b_2 y_n + b_3 x_n^2 + b_4 x_n y_n + b_5 y_n^2 + b_6 x_n^3 + b_7 x_n^2 y_n + b_8 x_n y_n^2 + b_9 y_n^3. \end{cases} \quad (17)$$

МНК-оценкой коэффициентов модели постоянных пересчета является вектор [10]:

$$\hat{\psi} = \arg \min_{\psi} (\tilde{Y} - H_1 \psi)^T (\tilde{Y} - H_1 \psi), \quad (18)$$

где $\hat{\psi}$ – оценка вектора коэффициентов постоянных пересчета ψ (4);

$\tilde{Y} = (x_{\delta 1}, x_{\delta 2}, \dots, x_{\delta N_{rep}})$, $\tilde{Y} = (y_{\delta 1}, y_{\delta 2}, \dots, y_{\delta N_{rep}})$ – совокупности соответствующих идеальных координат реперных символов, рассчитанных по формулам (11), (12);

N_{rep} – количество реперных символов;

H_1 – матрица Якоби, общая для уравнений (16) и (17).

В общем случае матрица Якоби имеет вид:

$$H_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{\delta 1}}{\partial \psi_1} & \dots & \frac{\partial x_{\delta 1}}{\partial \psi_n} & \dots & \frac{\partial x_{\delta 1}}{\partial \psi_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_{\delta i}}{\partial \psi_1} & \dots & \frac{\partial x_{\delta i}}{\partial \psi_n} & \dots & \frac{\partial x_{\delta i}}{\partial \psi_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_{\delta N_{rep}}}{\partial \psi_1} & \dots & \frac{\partial x_{\delta N_{rep}}}{\partial \psi_n} & \dots & \frac{\partial x_{\delta N_{rep}}}{\partial \psi_p} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где ψ_n – n -й оцениваемый параметр из вектора оцениваемых параметров ψ .

Матрица Якоби (19) H составляется из частных производных оценки идеальных координат (14), (15) по вектору коэффициентов постоянных пересчета (7). При этом i -й строке матрицы Якоби H соответствует значение производных по всем оцениваемым параметрам по отклонению в i -ой оценке положения центра символа, а n -й столбец матрицы содержит производные по n -му параметру вектора оцениваемых параметров ψ в каждой оценке положения центра символа. Другими словами, in -й элемент матрицы Якоби представляет собой производную оценки идеальной координаты i -го символа по n параметру вектора оцениваемых параметров ψ (7).

Матрица Якоби для квадратичной модели может быть представлена выражением:

$$H_1^T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & \dots & x_i & \dots & x_{N_{rep}} \\ y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N_{rep}} \\ x_1^2 & \dots & x_i^2 & \dots & x_{N_{rep}}^2 \\ x_1 y_1 & \dots & x_i y_i & \dots & x_{N_{rep}} y_{N_{rep}} \\ y_1^2 & \dots & y_i^2 & \dots & y_{N_{rep}}^2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Задача вычисления МНК-оценки сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений [7]:

$$H^T H \hat{\psi} = H^T \tilde{Y}. \quad (21)$$

Количество неизвестных в системе уравнений (16), (17) не меньше, чем число уравнений, поэтому эта система имеет по крайней мере одно решение [7].

Если матрица $H^T H$ невырожденная, то система уравнений имеет единственное решение [7]:

$$\hat{\psi} = (H^T H)^{-1} H^T \tilde{Y}. \quad (22)$$

В случае вырожденности матрицы $H^T H$ можно использовать QR-разложение [13] матрицы $H^T H$ из (21) с помощью модифицированного алгоритма Грама-Шмидта [13].

Так же МНК оценка может быть найдена с использованием градиентных методов (метод Ньютона), методов последовательного приближения, или их модификаций, например, алгоритма Левенберга-Марквардта (АЛМ) [13], являющегося комбинацией метода Ньютона с методом градиентного спуска.

В рамках проведенных исследований использовалась программная реализация алгоритма Левенберга-Марквардта из математического пакета ALGLIB [14].

Анализ разработанных методов определения координат символов на базовом кадре. Исследовались показатели точности определения координат символов на базовом кадре как реперных символов, так и всех остальных символов, расположенных на цифровом изображении. Получаемые цифровые кадры обрабатываются специальными программами, которые формируют совокупность оценок положений символов. Данные оценки положений содержат погрешности, которые получаются вследствие условий фотосъемки, несовершенства ее инструментов и программных средств обработки цифровых изображений. Для анализа разработанных методов используются следующие показатели точности оценок положения реперных символов кадра. Отклонения между символами текущего и базового кадра оценок X и Y координат используемых реперных символов в системе координат цифрового изображения (прямоугольная система координат цифрового изображения с центром в левом верхнем углу цифрового изображения) вычисляются согласно формулам:

$$\Delta_{Xi} = X_{j_1(t)} - X_{j_2(t)}; \quad (23)$$

$$\Delta_{Yi} = Y_{j_1(t)} - Y_{j_2(t)}, \quad (24)$$

где $X_{j_1(t)}$, $X_{j_2(t)}$, $Y_{j_1(t)}$, $Y_{j_2(t)}$ – координаты X и Y j_1 -го и j_2 -го символов разных кадров, составляющих в i -ю отождествленную пару.

Оценка среднего отклонения (математического ожидания отклонений) оценок положения символа по координатам X и Y используемых реперных символов определялось по следующим выражениям [15]:

$$\hat{\Delta}_X = \sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} \Delta_{Xl} / N_{\text{sym}}; \quad (25)$$

$$\hat{\Delta}_Y = \sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} \Delta_{Yl} / N_{\text{sym}}. \quad (26)$$

Оценка среднеквадратичного отклонения отклонений оценок координат X и Y используемых реперных символов вычислялось аналогично [15]:

$$\hat{\sigma}_X = \sqrt{\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} \left(\Delta_{Xl} - \hat{\Delta}_X \right)^2 / (N_{\text{sym}} - 1)}; \quad (27)$$

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} \left(\Delta_{Yl} - \hat{\Delta}_Y \right)^2 / (N_{\text{sym}} - 1)}. \quad (28)$$

При исследовании показателей точности оценок положения символов рассчитывались оценки коэффициентов асимметрии $\hat{\gamma}_1$ координат центра символа используемых реперных символов [16]:

$$\hat{\gamma}_{x1} = \frac{\sqrt{N_{\text{sym}}(N_{\text{sym}} - 1)} \sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} \left(\Delta_{Xl} - \hat{\Delta}_X \right)^3}{N_{\text{sym}} - 2 \left(\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} \left(\Delta_{Xl} - \hat{\Delta}_X \right)^2 \right)^{3/2}}; \quad (29)$$

$$\hat{\gamma}_{y1} = \frac{\sqrt{N_{\text{sym}}(N_{\text{sym}} - 1)} \sum_{i=1}^{N_{\text{sym}}} \left(\Delta_{Yl} - \hat{\Delta}_Y \right)^3}{N_{\text{sym}} - 2 \left(\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} \left(\Delta_{Yl} - \hat{\Delta}_Y \right)^2 \right)^{3/2}}. \quad (30)$$

Выражения для оценок коэффициентов эксцесса $\hat{\gamma}_2$ [16] по прямому восхождению и склонению оценок координат реперных символов имеют вид:

$$\hat{\gamma}_{x2} = \frac{N_{\text{sym}}^2 - 1}{(N_{\text{sym}} - 2)(N_{\text{sym}} - 3)} \left(\frac{\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} (\Delta_{xi} - \hat{\Delta}_x)^4}{\left(\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} (\Delta_{xi} - \hat{\Delta}_x)^2 \right)^2} - 3 + \frac{6}{N_{\text{sym}} + 1} \right); \quad (31)$$

$$\hat{\gamma}_{y2} = \frac{N_{\text{sym}}^2 - 1}{(N_{\text{sym}} - 2)(N_{\text{sym}} - 3)} \left(\frac{\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} (\Delta_{yi} - \hat{\Delta}_y)^4}{\left(\sum_{l=1}^{N_{\text{sym}}} (\Delta_{yi} - \hat{\Delta}_y)^2 \right)^2} - 3 + \frac{6}{N_{\text{sym}} + 1} \right). \quad (32)$$

Среднеквадратическое отклонение оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса оценок координат центра символа используемых реперных символов вычислялись согласно выражениям [17]:

$$\sigma_{\gamma_1} = \sqrt{\frac{6(N_{\text{sym}} - 2)}{(N_{\text{sym}} + 1)(N_{\text{sym}} + 3)}}; \quad (33)$$

$$\sigma_{\gamma_2} = \sqrt{\frac{24 N_{\text{sym}} (N_{\text{sym}} - 2)(N_{\text{sym}} - 3)}{(N_{\text{sym}} + 1)^2 (N_{\text{sym}} + 3)(N_{\text{sym}} + 5)}}. \quad (34)$$

В статье также исследовались свойства оценок координат центра символа как системы случайных величин [15, 18]. Исследованию подлежали главные дисперсии, оценки ковариации и коэффициента корреляции отклонений оценок координат центра символа используемых реперных символов, а также угол между главной осью эллипса рассеивания и осью абсцисс.

Оценка ковариации отклонений оценок координат центра символа вычислялась следующим образом [15]:

$$\hat{K}_{xy} = \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{sym}}} (\Delta_{xi} \Delta_{yi}) / N_{\text{sym}} - \hat{\Delta}_x \hat{\Delta}_y \right] \frac{N_{\text{sym}}}{N_{\text{sym}} - 1}. \quad (35)$$

Оценка коэффициента корреляции отклонений оценок координат центра символа используемых реперных символов определялась выражением [15]:

$$\hat{r}_{xy} = \hat{K}_{xy} / \sqrt{\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y}. \quad (36)$$

Угол между главной осью эллипса рассеивания и осью абсцисс координат центра символа, определяется выражением [15]:

$$\text{tg } 2\hat{\psi} = 2\hat{r}_{xy} \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y / (\hat{\sigma}_x^2 - \hat{\sigma}_y^2). \quad (37)$$

Главные дисперсии отклонений оценок координат по прямому восхождению и склонению используемых реперных символов [15] определялись следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (\hat{D}'_x)^2 &= \hat{\sigma}_x^2 \cos^2 \hat{\psi} + \hat{r}_{xy} \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \sin 2\hat{\psi} + \hat{\sigma}_x^2 \sin^2 \hat{\psi} \\ (\hat{D}'_y)^2 &= \hat{\sigma}_x^2 \cos^2 \hat{\psi} - \hat{r}_{xy} \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \sin 2\hat{\psi} + \hat{\sigma}_y^2 \sin^2 \hat{\psi} \end{aligned} \right\}. \quad (38)$$

Выражения (23) ч (38) соответствуют оценкам показателей точности используемых реперных символов, для оценки показателей точности всех символов изображения используются аналогичные выражения.

Выводы и перспективы дальнейших разработок. В статье разработан вычислительный метод определения постоянных пересчета цифровых текстовых изображений на базовое изображение, который учитывает основные особенности процесса формирования цифровых изображений. Для решения поставленной задачи в статье был предложен метод выбора реперных символов на цифровых изображениях. Выбор реперных символов на цифровых изображениях обеспечивает высокие показатели точности за счет равномерного распределения кандидатов в реперные символы на цифровом изображении и отбраковки ненадежных.

Так же в статье были введены показатели точности определения координат символов на базовом кадре как реперных символов так и всех остальных символов, расположенных на цифровом изображении. Для анализа разработанных методов были использованы следующие показатели точности: отклонение между символами текущего и базового кадра оценок X и Y координат используемых реперных символов в системе координат цифрового изображения; оценка среднего отклонения (математического ожидания отклонений) оценок положения символа по координатам X и Y используемых реперных символов, оценка среднеквадратичного отклонения отклонений оценок координат X и Y используемых реперных символов, среднеквадратическое отклонение оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса оценок координат центра символа используемых реперных символов.

Дальнейшие исследования разработанного вычислительного метода целесообразно сконцентрировать на оптимизации параметров разработанного метода для различных условий его использования.

Список использованной литературы:

1. *Wilhelm Burger Mark J.* Burge Principles of Digital Image Processing / *Wilhelm Burger Mark J.* – Fundamental Techniques. – Springer. – 2009. – 272 p.
2. *Solomon C.* Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab / *C.Solomon, T.Breckon.* – John Wiley & Sons, Ltd. – 2011. – 344 p.
3. *Белоус Н.В.* Вычислительный метод определения постоянных проективного преобразования и пересчета координат системы координат текущего кадра в систему координат базового / *Н.В. Белоус, Р.Н. Мельник* // Вестник ЗНТУ.
4. *Дума Д.П.* Загальна астрометрія : навч. посібник / *Д.П. Дума.* – К. : Наукова думка, 2007. – 600 с.
5. *Киселев А.А.* Теоретические основания фотографической астрометрии / *А.А. Киселев.* – М. : Наука, 1989. – 264 с.
6. *Sasian M.J.* Introduction to aberrations in optical imaging systems / *M.J. Sasian.* – Cambridge University Press, 2013. – 261 p.
7. *Ермаков С.М.* Математическая теория оптимального эксперимента / *С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский.* – М. : Наука, 1987. – 320 с.
8. *Kuhn H.W.* The Hungarian Method for the Assignment Problem / *H.W. Kuhn* // Springer Berlin Heidelberg. – 2009. – Pp. 29–47.
9. *Singh S.* A Comparative Analysis of Assignment Problem / *S.Singh, G.C. Dubey, R.Shrivastava* // OSR Journal of Engineering (IOSRJEN). – Vol. 2. – Is 8. – 2012 – Pp. 1–15.
10. *Hazewinkel M.* Encyclopaedia of Mathematics / *M.Hazewinkel.* – Springer Netherlands, 2001 – 732 p.
11. *Björck A.* Numerical Methods for Least Squares Problems / *A.Björck.* – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1996. – 408 p.
12. *Саваневич В.Е.* Вычислительный метод выбора опорных звезд на цифровых кадрах / *В.Е. Саваневич, Я.С. Мовсеян, Н.Ю. Духтяр* // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 7 (134). – С. 37–45.
13. *Dax A.* A modified Gram–Schmidt algorithm with iterative orthogonalization and column pivoting / *D.Achiya* // Linear Algebra and its Applications. – 2000. – № 310 (1–3). – Pp. 25–42.
14. ALGLib [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.alglib.net/>.
15. *Вентцель Е.С.* Теория вероятности и ее инженерные приложения : учеб. пособие для втузов / *Е.С. Вентцель Л.А. Овчаров.* – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2000. – 480 с.
16. Вероятность и математическая статистика : энциклопедия / Под ред. *Ю.В. Прохорова.* – М. : Большая российская энциклопедия, 2003. – 912 с.
17. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / *А.И. Кобзарь.* – М. : Физматлит, – 2006. – 816 с.
18. *Kallenberg O.* Foundations of Modern Probability / *O.Kallenberg.* – Springer, 1997. – 535 с.

References:

1. Burger, W. and Burge, M.J. (2009), *Principles of Digital Image Processing. Fundamental Techniques*, Springer, 272 p.
2. Solomon, C. and Breckon, T. (2013), *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*, John Wiley & Sons, Ltd, 344 p.
3. Belous, N.V. and Melnik, R.N. (2016), “Vyichislitelnyy metod opredeleniya postoyannykh proektivnogo preobrazovaniya i perescheta koordinat sistemyi koordinat tekushego kadra v sistemu koordinat bazovogo”, *Vestnik ZNTU*, unpublished.
4. Duma, D.P. (2007), *Zagalna astrometriya*, Naukova dumka, Kyiv, 600 p.
5. Kiselev, A.A. (1989), *Teoreticheskie osnovaniya fotograficheskoy astrometrii*, Nauka, Gl. red. fiz-mat. lit, Moscow, 264 p.
6. Sasian, M.J. (2013), *Introduction to aberrations in optical imaging systems*, Cambridge University Press, 261 p.
7. Ermakov, S.M. and Zhiglyavskiy, A.A. (1987), *Matematicheskaya teoriya optimalnogo eksperimenta*, Nauka, Moscow, 320 p.
8. Kuhn, H.W. (2009), “The Hungarian Method for the Assignment Problem”, *Springer Berlin Heidelberg*, pp. 29–47.
9. Singh, S., Dubey, G.C. and Shrivastava, R. (2012), “A Comparative Analysis of Assignment Problem”, *OSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, Vol. 2, Is. 8, pp. 1–15.
10. Hazewinkel, M. (2001), *Encyclopaedia of Mathematics*, Springer Netherlands, 732 p.
11. Bjorck, A. (1996), *Numerical Methods for Least Squares Problems*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 408 p.
12. Savanevych, V.E., Movsesian, Ya.S. and Dihtyar, N.Yu. (2016), “Vychislitel'nyy metod vybora opornykh zvezd na tsifrovyykh kadrakh”, *Sistemy obrobky informacii*, Vol. 7 (134), pp. 37–45.
13. Dax, A. (2000), “A modified Gram–Schmidt algorithm with iterative orthogonalization and column pivoting”, *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 310 (1–3), pp. 25–42.
14. ALGLib (2015), available at www.alglib.net/ (accessed 16 October 2015).
15. Venttsel, E.S. and Ovcharov, L.A. (2002), *Teoriya veroyatnosti i ee inzhenernyie prilozheniya*, 2-nd ed., Vysshaya shkola, Moscow, 480 p.
16. Prohorov, Yu.V. (Ed.) (2003), *Veroyatnost i matematicheskaya statistika*, Bolshaya rossiyskaya entsiklopediya, Moscow, 912 p.
17. Kobzar, A.I. (2006), *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*, Fizmatlit, Moscow, 816 p.
18. Kallenberg, O. (1997), *Foundations of Modern Probability*, Springer, 535 p.

БІЛОУС Наталія Валентинівна – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри програмної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки.

E-mail: bilous.n.v@gmail.com.

КРАСОВ Олексій Ігорович – аспірант кафедри програмної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки

E-mail: krasov.alex@inbox.ru.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2016.