

## **МЕТОД КОРРЕКЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТЕКУЩИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ**

В.И. Антюфеев, В.Н. Быков, А.М. Гричанюк, Я.Н. Кожушко  
(Объединенный научно-исследовательский институт ВС, Харьков)

*Предложен метод построения скорректированного текущего изображения (ТИ) на прямоугольной равномерной сетке эталонного изображения (ЭИ), основанный на интерполяции радиояркости ТИ по его значениям в ближайших узлах непрямоугольной неравномерной сетки, характерной для перспективных искажений ТИ, при наличии априорной информации о параметрах перспективного преобразования координат совмещаемых изображений.*

**радиометрическая система навигации, радиояркость, летательный аппарат, корреляционно-экстремальные системы навигации**

**Постановка проблемы.** Радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации (КЭСН) летательных аппаратов (ЛА), принцип действия которых основан на сравнении формируемого датчиком физического поля Земли ТИ с ЭИ района привязки, которое обычно получается в результате обработки аэрофотоснимка или цифровой карты местности этого района. При формировании кадра ТИ неизбежно возникают геометрические искажения, связанные с преобразованием координат изображений, а также искажения яркости, обусловленные различием условий съема ТИ и ЭИ (влияние погодных и сезонных условий, времени суток и т.д.). Представляет интерес исследовать влияние геометрических искажений ТИ (сдвиг, поворот, изменение масштаба, перспективная проекция) и рассмотреть методы уменьшения этого влияния на вероятность совмещения изображений в системах рассматриваемого класса, основанные на использовании априорной информации об условиях формирования ТИ.

**Анализ литературы.** В обзорной статье [1] рассмотрены геометрические искажения ТИ и два метода построения преобразования координат: перспективное преобразование и полиномиальная оценка. Первый нуждается в упомянутой априорной информации, второй не нуждается. Вопрос построения ТИ на сетке ЭИ по известному преобразованию координат остается открытым. В работе [2] формирование скорректированного ТИ осуществляется с помощью интерполяции по ближайшим отсчетам первоначального ТИ, но сетки обоих изображений предполагаются прямоугольными, что не выполняется для перспективных искажений.

**Цель работы** состоит в разработке метода коррекции перспективных искажений, возникающих при формировании ТИ, и оценке выигрыша в вероятности совмещений изображений в КЭСН за счет введения указанной коррекции ТИ.

**Постановка задачи.** Пусть КЭСН используется в комплексе с инерциальной системой навигации, которая с достаточно высокой точностью (до нескольких угловых минут) позволяет определить угловое положение оси групповой диаграммы направленности многолучевой антенны (ДНА) в системе координат, связанной с поверхностью земли. Предположим, что известны направляющие векторы осей парциальных ДНА в антенной системе координат, а также высота ЛА  $z_0$ , измеряемая с помощью высотомера. С помощью методики, изложенной в [3], можно определить координаты  $(x_{ij}, y_{ij})$  точек пересечения осей парциальных ДНА с поверхностью земли для некоторого произвольного значения  $(x_0, y_0, z_0)$  координат центра масс ЛА. Требуется, располагая некоторой реализацией ТИ  $\mathbf{t} = [t_{ij}]_{i \in \overline{1, N_1}}^{j \in \overline{1, N_2}}$ , построить скорректированное изображение

$\mathbf{t}'$ , координаты элементов которого на местности привязаны к прямоугольной сетке, шаг которой определяется шагом ЭИ. Кроме того, необходимо оценить выигрыш в вероятности правильного местоопределения КЭСН при замене исходного ТИ  $\mathbf{t}$  на скорректированное изображение  $\mathbf{t}'$ .

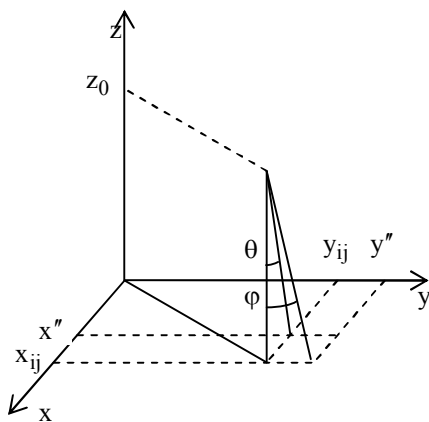


Рис. 1. Система координат, связанная с земной поверхностью

**Моделирование ЭИ.** Полагая известными высоту  $z_0$ , с которой предполагается осуществлять очередной сеанс привязки ТИ и ЭИ, координаты центра  $(x_e, y_e)$  ЭИ в системе координат (СК), связанной с поверхностью земли в районе привязки (рис. 1) и распределение радиоярких температур  $T(x, y)$  в плоскости  $z = 0$ , совпадающей с земной поверхностью.

Кроме того, предполагается известной диаграмма направленности (ДНА) (по мощности)  $G(\theta, \varphi)$  для каждого из парциальных лучей много-

лучевой антенны радиометрической КЭСН, размеры матрицы ЭИ  $M_1, M_2$ , а также шаг  $\Delta x, \Delta y$  сетки ЭИ по каждой из координат. Зная форму ДНА, можно определить ее ширину  $\Delta\theta, \Delta\varphi$  в угломестной и азимутальной плоскостях. Для определенности будем полагать, что изменению по углу места соответствует вращение по часовой стрелке вокруг оси  $y$ , изменению азимута – соответствующее вращение вокруг оси  $x$ .

Тогда координаты узлов сетки ЭИ с равномерным шагом  $\Delta x$  по оси  $x$  и равномерным шагом  $\Delta y$  по оси  $y$  определяются выражениями

$$\begin{aligned} x_{ij} &= x_e - (i - [M_1/2] - 1 + k_1)\Delta x; \\ y_{ij} &= x_e + (j - [M_2/2] - 1 + k_2)\Delta y; \end{aligned} \quad i \in \overline{1, M_1}; \quad j \in \overline{1, M_2}, \quad (1)$$

где  $k_1 = \begin{cases} 0, & M_1 = 2k + 1; \\ 1/2, & M_1 = 2k; \end{cases}$   $k_2 = \begin{cases} 0, & M_2 = 2k + 1; \\ 1/2, & M_2 = 2k; \end{cases}$   $[x]$  – целая часть числа  $x$ .

Будем полагать, что яркость элемента  $e_{ij}$  ( $i \in \overline{1, M_1}, j \in \overline{1, M_2}$ ) ЭИ определяется как результат свертки распределения радиоярких температур  $T(x, y)$  с ДНА  $G(\theta, \varphi)$ , фазовый центр которой расположен в точке  $(x_{ij}, y_{ij}, z_0)$  и ось которой направлена по нормали к поверхности Земли

$$e_{ij} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\theta(x, y), \varphi(x, y)) T(x_{ij} - x, y_{ij} - y) J(x, y) dx dy, \quad (2)$$

где в соответствии с рис. 1, угол места и азимут находятся из выражений

$$\theta(x, y) = \text{arctg}(x/z_0); \quad \varphi(x, y) = \text{arctg}(y/z_0); \quad x = x'' - x_{ij}; \quad y = y'' - y_{ij};$$

$$J(x, y) = \begin{vmatrix} \frac{\partial\theta}{\partial x} & \frac{\partial\theta}{\partial y} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial x} & \frac{\partial\varphi}{\partial y} \end{vmatrix} = \left\{ z_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{z_0} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{y}{z_0} \right)^2 \right] \right\}^{-1} \quad \text{– якобиан преобразования.}$$

Поскольку на практике распределение  $T(x, y)$  задано в виде изображения, т.е. в табличной форме, целесообразно для моделирования ЭИ использовать численное интегрирование в (2), применяя для вычисления подынтегральной функции в узлах интегрирования интерполяцию функции по ее значениям в соседних узлах сетки ЭИ. Поскольку используются узконаправленные ДНА, интегрирование по всей плоскости можно выполнять в квадрате

$$[-2z_0\Delta\theta, 2z_0\Delta\theta] \times [-2z_0\Delta\varphi, 2z_0\Delta\varphi].$$

**Моделирование ТИ.** При моделировании ТИ предполагалось, что многолучевая ДНА формируется как совокупность парциальных ДНА,

имеющих общий фазовый центр, расположенный в центре масс летательного аппарата. Антенная температура для  $ij$ -го луча определялась в соответствии с соотношением

$$t_{ij} = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} G_{ij}(\theta, \varphi) T(x'_{ij}(\theta, \varphi), y'_{ij}(\theta, \varphi)) d\theta d\varphi; \quad i \in \overline{1, N_1}; \quad j \in \overline{1, N_2}, \quad (3)$$

где  $G_{ij}(\theta, \varphi)$  – ДНА в локальной, связанной с  $ij$ -м лучом СК. Методика пересчета направляющего вектора

$$\mathbf{a}(\theta, \varphi) = (\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, \sin \theta)^T$$

в этой СК в направляющий вектор  $\mathbf{d}^{ij} = (d_x^{ij}, d_y^{ij}, d_z^{ij})^T$  в СК, представленной на рис. 1, описана в [3]. Подобные результаты можно получить и с помощью теории проективных пространств и проективных преобразований [2]. Предполагается, что углы ориентации осей парциальных ДНА относительно гироплатформы, на которой установлена антенна, известны. Если формирование ТИ осуществляется в точке  $(x_0, y_0, z_0)$ , то прямая с направляющим вектором  $\mathbf{d}^{ij}$  пересекает плоскость  $z = 0$  в точке с координатами

$$x'_{ij}(\theta, \varphi) = x_0 - z_0 \frac{d_x^{ij}(\theta, \varphi)}{d_z^{ij}(\theta, \varphi)}; \quad y'_{ij}(\theta, \varphi) = y_0 - z_0 \frac{d_y^{ij}(\theta, \varphi)}{d_z^{ij}(\theta, \varphi)}, \quad (4)$$

которые фигурируют в формуле (3), что позволяет смоделировать ТИ.

По формулам (4) можно вычислить и координаты точек пересечения осей парциальных ДНА земной поверхности, задавая в каждой из локальных СК направляющий вектор  $\mathbf{a} = (1, 0, 0)^T$ , т.е.

$$x'_{ij} = x_0 - z_0 \frac{d_x^{ij}(0, 0)}{d_z^{ij}(0, 0)}; \quad y'_{ij} = y_0 - z_0 \frac{d_y^{ij}(0, 0)}{d_z^{ij}(0, 0)}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлен фрагмент изображения, характеризующего распределение радиоярких температур в плоскости  $z = 0$ . Приведены точки с координатами узлов ЭИ (1) и ТИ (5), указаны координаты центров ЭИ и ТИ, а также границы ТИ и ЭИ. Предполагалось, что ТИ снималось из точки  $(x_0, y_0, z_0)$ , а ось групповой ДНА повернута относительно оси  $x$  на угол  $\xi = 0^\circ$  (крен), вокруг оси  $y$  на угол  $\eta = -20^\circ$  (тангаж) и вокруг оси  $z$  на угол  $\psi = 5^\circ$  (рыскание). Кроме того, предполагалось, что оси строчных парциальных ДНА лежат в плоскостях, проходящих через фазовый центр многолучевой антенны с одинаковыми угловыми расстояниями между ними, равными  $\Delta\varphi$ . То же касается и столбцовых ДНА, лежащих в плоско-

стях, углы между которыми выбраны равными  $\Delta\theta$ . Преобразование плоскости описывается при этом группой проективных преобразований [2], которые сохраняют коллинеарность точек. Точки, лежащие на одной прямой при таком преобразовании остаются лежать на прямой, но параллельность линий, свойственная для аффинных и евклидовых преобразований, здесь теряется. Такое преобразование называют еще перспективной проекцией. Границы ТИ при этом представляют собой прямые линии (рис. 2).

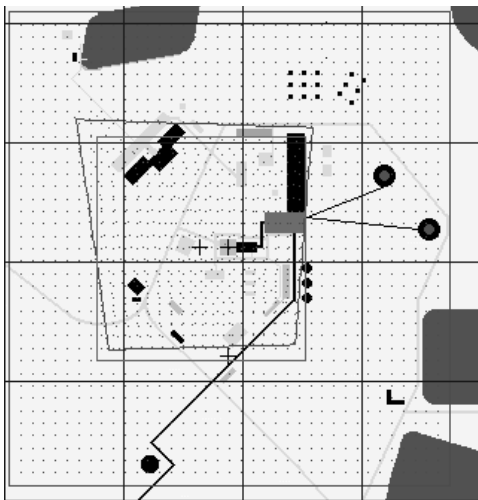


Рис. 2. Положение узловых точек и границ ЭИ и ТИ

**Коррекция ТИ.** Пусть для определенности  $N_1, N_2$  – нечетные числа. Тогда положение центра ТИ на местности будем определять как точку пересечения центрального луча групповой ДНА с плоскостью  $z = 0$ , координаты которой  $(x_t, y_t)$  (рис. 2) в соответствии с (5) равны

$$x_t = x_0 - z_0 \frac{d_x^{ij}(0,0)}{d_z^{ij}(0,0)}; \quad y_t = y_0 - z_0 \frac{d_y^{ij}(0,0)}{d_z^{ij}(0,0)}; \quad i = 1 + (M_1 - 1)/2; \quad j = 1 + (M_2 - 1)/2.$$

Подобно тому, как это делалось для ЭИ, вычисляются координаты узлов сетки ТИ, построенной с теми же постоянными шагами, что и ЭИ:

$$\begin{aligned} \xi_{kl} &= x_t - (k - [N_1/2] - 1 + k_1)\Delta x; & k \in \overline{1, N_1}; \quad l \in \overline{1, N_2}. \\ \xi_{il} &= x_t + (l - [N_2/2] - 1 + k_2)\Delta y; \end{aligned}$$

Этим достигается согласование сеток ЭИ и ТИ. Теперь возникает задача вычисления яркости ТИ в этих узлах по ее значениям в точках  $(x'_{ij}, y'_{ij})$ , определяемых формулами (5). Обычно это делается с помощью интерполяции [2]. Практика показала, что построение двумерного интерполяционного полинома по всем точкам  $(x'_{ij}, y'_{ij})$ ,  $i \in \overline{1, N_1}$ ,  $j \in \overline{1, N_2}$  связано со значительными вычислительными затратами. Поэтому целесообразно использовать локальные методы. Для определения яркости в точке  $(\xi_{kl}, \xi_{kl})$  определяется номер ближайшего к ней узла неравномерной сетки ТИ из соотношения

$$(i, j) = \arg \min_{m=1, N_1, n=1, N_2} \left[ (x'_{mn} - \xi_{kl})^2 + (y'_{mn} - \xi_{kl})^2 \right].$$

Затем строится двумерный полином, удовлетворяющий определенным условиям [2] в целочисленной окрестности  $I_{ij}$  точки  $(i, j)$ . Описанные в работе [2] интерполяционные сплайны позволяют определить яркость в точке  $(x, y)$ , лежащей в окрестности узла  $(x'_{ij}, y'_{ij})$ , по значениям яркости в узлах равномерной сетки. Здесь же возникает задача интерполяции функции по ее значениям в узлах неравномерной сетки.

Воспользуемся методом неопределенных коэффициентов, который основан на построении двумерного полинома, коэффициенты которого определяются из условия, чтобы значения полинома в точках окрестности  $I_{ij}$  совпадали со значениями яркости ТИ  $t_{kl}$ ,  $(k, l) \in I_{ij}$ .

Ограничимся случаем квадратичного двумерного полинома, для которого количество неизвестных коэффициентов равно шести:

$$z(x, y) = B_1 + B_2x + B_3y + B_4x^2 + B_5y^2 + B_6xy.$$

Возьмем в качестве окрестности  $I_{ij}$  множество

$$I_{ij} = \{(i, j), (i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), (i, j+1), (i+1, j+1)\}.$$

Тогда упомянутое условие для  $ij$ -го узла имеет вид системы линейных уравнений относительно коэффициентов  $B_i$ , которая в матричной форме имеет представление

$$\mathbf{T}^{ij} = \mathbf{M}^{ij} \mathbf{B}^{ij},$$

где вектор  $\mathbf{T}^{ij} = [t_{ij}, t_{i-1,j}, t_{i+1,j}, t_{i,j-1}, t_{i,j+1}, t_{i+1,j+1}]^T$  составлен из элементов ТИ, номера которых принадлежат  $I_{ij}$ , матрица

$$\mathbf{M}^{ij} = \begin{bmatrix} 1 & x_{ij} & y_{ij} & x_{ij}^2 & y_{ij}^2 & x_{ij}y_{ij} \\ 1 & x_{i-1,j} & y_{i-1,j} & x_{i-1,j}^2 & y_{i-1,j}^2 & x_{i-1,j}y_{i-1,j} \\ 1 & x_{i+1,j} & y_{i+1,j} & x_{i+1,j}^2 & y_{i+1,j}^2 & x_{i+1,j}y_{i+1,j} \\ 1 & x_{i,j-1} & y_{i,j-1} & x_{i,j-1}^2 & y_{i,j-1}^2 & x_{i,j-1}y_{i,j-1} \\ 1 & x_{i,j+1} & y_{i,j+1} & x_{i,j+1}^2 & y_{i,j+1}^2 & x_{i,j+1}y_{i,j+1} \\ 1 & x_{i+1,j+1} & y_{i+1,j+1} & x_{i+1,j+1}^2 & y_{i+1,j+1}^2 & x_{i+1,j+1}y_{i+1,j+1} \end{bmatrix}$$

составлена из координат этих элементов с соответствующими степенями.

Границы скорректированного ТИ, приведенного к сетке ЭИ, также представлены на рис. 2.

**Результаты статистических испытаний.** Чтобы оценить выигрыш в вероятности совмещения изображений в КЭСН, было осуществлено моделирование процесса привязки.

ЭИ размерами  $19 \times 19$  элементов и ТИ  $9 \times 9$  элементов моделировались по распределению радиоярких температур, приведенному на рис. 2, в соответствии с описанной выше методикой. Затем на ТИ накладывалась реализация белого (по пространственным координатам) гауссовского шума с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , имитирующая шумовые компоненты на выходах радиометрических каналов. При этом задавались следующие значения параметров:

$$\Delta\theta = \Delta\varphi = 2^\circ; \quad x_0 = 886,2 \text{ м}; \quad y_0 = 1250 \text{ м}; \quad z_0 = 1000 \text{ м};$$

$$x_e = y_e = 1250 \text{ м}; \quad x_t = 1343,1 \text{ м}; \quad y_t = 1250 \text{ м}; \quad \xi = 0^\circ; \quad \eta = -20^\circ; \quad \psi = 5^\circ.$$

ДНА по мощности  $G(\theta, \varphi)$  аппроксимировалась гауссовской поверхностью

$$G(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta\sigma_\varphi} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\theta}{\sigma_\theta} \right)^2 + \left( \frac{\varphi}{\sigma_\varphi} \right)^2 \right] \right\},$$

где параметры  $\sigma_\theta, \sigma_\varphi$  подбирались так, чтобы ширина ДНА на уровне -3 дБ в соответствующей плоскости составляла  $\Delta\theta, \Delta\varphi$ , а именно,

$$\sigma_\theta = \frac{\Delta\theta}{2\sqrt{2 \ln 2}}; \quad \sigma_\varphi = \frac{\Delta\varphi}{2\sqrt{2 \ln 2}}.$$

Сначала шаги сетки ЭИ  $\Delta x, \Delta y$  выбирались равными средним шагам ТИ

$$\Delta x = \Delta x_c = 41,757 \text{ м}; \quad \Delta y = \Delta y_c = 38,955 \text{ м},$$

где

$$\Delta x_c = \frac{1}{N_2(N_1 - 1)} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1-1} \left[ (x'_{ij} - x'_{i+1,j})^2 + (y'_{ij} - y'_{i+1,j})^2 \right]^{1/2};$$

$$\Delta y_c = \frac{1}{N_1(N_2 - 1)} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2-1} \left[ (x'_{ij} - x'_{i,j+1})^2 + (y'_{ij} - y'_{i,j+1})^2 \right]^{1/2}.$$

В качестве алгоритмов совмещения изображений использовались корреляционный алгоритм, который формирует оценку целочисленного сдвига ТИ и ЭИ и называемый далее алгоритмом первого типа, а также описанный в работе [4] алгоритм, основанный на аппроксимации дискретной решающей функции в окрестности ее экстремума поверхностью второго порядка и формирующий нецелочисленную оценку сдвига (алгоритм второго типа). Если использовалось скорректированное ТИ, то каждый из алгоритмов в качестве первого шага содержал формирование такого ТИ описанным выше методом.

Затем осуществлялись статистические испытания алгоритмов путем их многократного запуска при различных реализациях шумовой компо-

ненты ТИ. В случае алгоритма первого типа совмещение считалось правильным, если истинный сдвиг центров ТИ и ЭИ совпадал с его оценкой, формируемой алгоритмом. В случае алгоритма второго типа такой вывод делался, если оценка сдвига попадала в заданную окрестность точки истинного сдвига. Оценка вероятности  $P$  совмещения изображений определялась как отношение числа правильных совмещений к общему количеству запусков алгоритмов.

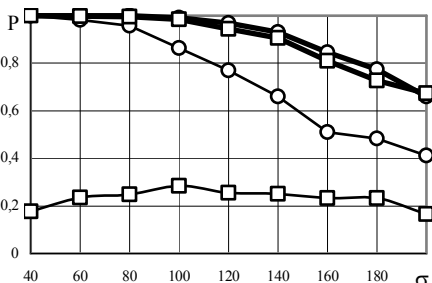


Рис. 3. График зависимости  $P(\sigma)$

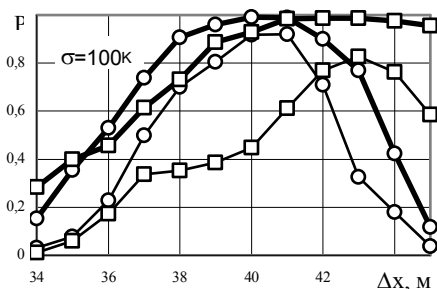


Рис. 4. График зависимости  $P(\Delta x)$

На рис. 3 представлены зависимости оценки вероятности совмещения изображений от среднеквадратического отклонения шума радиометрического канала. Алгоритму первого типа соответствуют тонкие кривые, второго типа – жирные кривые. Кривые для алгоритмов без коррекции ТИ помечены квадратами, с коррекцией – кружками.

Из анализа результатов следует, что в случае алгоритма первого типа перспективные искажения приводят к значительному ухудшению указанной характеристики КЭСН даже при больших отношениях сигнал/шум и применение коррекции ТИ позволяет существенно улучшить этот показатель. В случае алгоритма второго типа выигрыш от использования коррекции ТИ оказывается незначительным. Этот алгоритм оказывается более устойчивым к геометрическим искажениям ТИ. Степень устойчивости будет ухудшаться с увеличением размеров совмещаемых изображений и ростом искажений, который возникает при увеличении угла  $\eta$ , под которым снимается ТИ. Время обработки изображений указанных размеров при введении коррекции для компьютера Celeron-667 возрастает с  $\sim 30$  до  $\sim 50$  мс.

На практике неудобно использовать ЭИ с различными шагами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , соотношение между которыми зависит от условий съема ТИ. Естественно формировать ЭИ с одинаковыми шагами по осям. Рис. 4 иллюстрирует зависимости вероятности совмещения изображений от



шага ЭИ  $\Delta x = \Delta y$ . При этом изменялись только координаты узлов ЭИ, а ширина ДНА каждого луча оставалась прежней. Все кривые имеют максимум при определенном шаге ЭИ, который можно приближенно определить из соотношения

$$\Delta x = \Delta y \approx \frac{\Delta x_c + \Delta y_c}{2} = 40,356 \text{ м},$$

которое может быть положено в основу определения оптимального шага ЭИ при заданных высоте и углах съема ТИ. Алгоритмы второго типа слабо чувствительны к перспективным искажениям ТИ и могут применяться без предварительной коррекции текущего изображения.

**Выводы.** 1. Перспективные искажения ТИ при использовании корреляционного алгоритма совмещения изображений приводят к существенному снижению его эффективности. Этот эффект можно существенно ослабить путем формирования скорректированного ТИ, приведенного к прямоугольной сетке ЭИ.

2. Оптимальный шаг равномерной по обеим координатам сетки ЭИ равен среднему шагу между узлами ТИ по обеим координатам.

3. Алгоритм, основанный на локальном уточнении сдвига ТИ и ЭИ в пределах шага сетки, оказывается значительно более устойчивым к перспективным искажениям текущего изображения. При относительно малых искажениях ТИ привязка к ЭИ алгоритмом данного типа может осуществляться без предварительной коррекции текущего изображения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андросов В.А., Бойко Ю.В. и др. Совмещение изображений в условиях неопределенности // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1985. – № 4. – С. 54 – 70.
2. Грузман И.С., Киричук В.С., и др. *Цифровая обработка изображений в информационных системах*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
3. Антюфеев В.И., Быков В.Н., Гричанюк А.М. и др. Модель формирования изображений в радиометрических матричных корреляционно-экстремальных системах навигации // *Системы обработки информации*. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 6 (22). – С. 307 – 313.
4. Антюфеев В.И., Бакулин И.Е., Быков В.Н. и др. Повышение точности местопредопределения радиометрических корреляционно-экстремальных систем навигации путем использования методов приближения решающей функции. (Сообщение 1) // *Радиотехника*. – 2002. – Вып. 124. – С. 84 – 89.

Поступила 21.03.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор О.Н. Фоменко,  
Харьковский университет Воздушных сил