

ТОЧНОСТЬ АЛГОРИТМОВ СОПОСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫХ НА ИНТЕРПОЛЯЦИИ РЕШАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ

д.т.н. В.И. Антюфеев, И.Е. Бакулин,
к.т.н. В.Н. Быков, А.М. Гричанюк, Т.В. Мирошник-Быкова

Предложена аппроксимация систематической погрешности определения координат ТИ на ЭИ кубическим полиномом. Произведена оценка выигрыша в точности местоопределения навигационной системы за счет компенсации систематической погрешности.

В системах навигации, функционирующих по принципу сопоставления текущих изображений (ТИ), формируемых датчиками внешнего поля, и эталонных изображений (ЭИ), синтезируемых заранее, традиционные алгоритмы позволяют определять положение экстремума решающей функции (РФ) с погрешностью до пиксела изображения [1]. Для повышения точности местоопределения навигационных систем возможно применение интерполяции РФ алгоритма в окрестности ее экстремума. Предварительные испытания алгоритма показали, что существует систематическая погрешность в определении координат ТИ относительно ЭИ. Эта погрешность при сдвиге центра ТИ относительно сетки ЭИ по каждой из координат x , y представляет собой разрывную периодическую функцию с периодом один пиксел. Если известна форма этой функции, которая зависит от используемого алгоритма сопоставления изображений, то систематическая погрешность может быть скомпенсирована, и тем самым может быть повышена точность местоопределения.

Работа посвящена определению формы периодической функции корреляционного алгоритма на периоде в один пиксел, нахождению аналитической зависимости, аппроксимирующей эту функцию, а также оценке выигрыша в точности местоопределения за счет компенсации систематической погрешности. Формирование ТИ по ЭИ осуществляется следующим образом. задается положение центральной точки ТИ на ЭИ (x_0, y_0) , его размеры N_1, N_2 , коэффициент масштаба q и угол поворота ТИ φ относительно ЭИ вокруг точки (x_0, y_0) . Положим, что N_1, N_2 являются нечетными числами. Предполагая, что ось y направлена вниз, вычисляем координаты (x_{ij}, y_{ij}) элементов ТИ по формулам:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= x_0 + (x'_{ij} - x_0) \cos \varphi - (y'_{ij} - y_0) \sin \varphi; \\ y_{ij} &= y_0 + (x'_{ij} - x_0) \sin \varphi + (y'_{ij} - y_0) \cos \varphi; \end{aligned} \quad i \in \overline{1, N_1}, j \in \overline{1, N_2},$$

где $x'_{ij} = x_0 + qj$, $i \in \overline{1, N_1}$, $j \in \overline{[N_2/2], [N_2/2]}$;

$y'_{ij} = y_0 + qi$, $i \in \overline{[N_1/2], [N_1/2]}$, $j \in \overline{1, N_2}$; $[x]$ - целая часть числа x .

Затем для каждой точки (x_{ij}, y_{ij}) выбирается ближайшая целочисленная точка $(l = \{x_{ij}\}, k = \{y_{ij}\})$ и находится сдвиг $(\Delta x_{ij} = x_{ij} - l, \Delta y_{ij} = y_{ij} - k)$. Поместим начало локальной системы координат $(\Delta x, \Delta y)$ в точку (l, k) и построим интерполяционную поверхность в виде полинома второй степени

$$\pi(\Delta x, \Delta y) = b_1 + b_2 \Delta x + b_3 (\Delta x)^2 + b_4 \Delta y + b_5 (\Delta y)^2 + b_6 \Delta x \Delta y. \quad (1)$$

Коэффициенты b_i ($i \in \overline{1, 6}$) определяются по шести соседним отсчетам ЭИ с номерами (k, l) , $(k-1, l)$, $(k+1, l)$, $(k, l+1)$, $(k+1, l+1)$, $(k, l-1)$ соотношениями:

$$\begin{aligned} b_1 &= e_{kl}; \quad b_2 = (e_{k,l+1} - e_{k,l-1})/2; \quad b_3 = (e_{k-1,l} - e_{k+1,l})/2; \\ b_4 &= (e_{k,l-1} + e_{k,l+1} - 2e_{kl})/2; \quad b_5 = (e_{k+1,l} + e_{k-1,l} - 2e_{kl})/2; \\ b_6 &= e_{kl} + e_{k-1,l+1} - e_{k,l+1} - e_{k-1,l}, \end{aligned}$$

где $[e_{kl}]$ - матрица ЭИ.

Яркость (ij) -го элемента ТИ находится по формуле $t_{ij} = \pi(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij})$.

После формирования матрицы ТИ $[t_{ij}]$ изображение зашумляется путем добавления к каждому отсчету значения нормально распределенной случайной величины $n \in N(0, \sigma^2)$.

Испытаниям подвергался корреляционный алгоритм с решающей функцией

$$b_{kl} = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \tilde{e}_{ij}^{kl} \tilde{t}_{ij}^{kl}, \quad (2)$$

причем перед сравнением фрагмент ЭИ с номером (k, l) и ТИ центрировался и нормировался:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{ij}^{kl} &= \frac{e_{ij}^{kl} - \bar{e}^{kl}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (e_{ij}^{kl} - \bar{e}^{kl})^2}}; \quad \bar{e} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} e_{ij}^{kl}; \\ \tilde{t}_{ij} &= \frac{t_{ij} - \bar{t}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (t_{ij} - \bar{t})^2}}; \quad \bar{t} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} t_{ij}. \end{aligned}$$

Проводились статистические испытания алгоритма путем многократного запуска с различными реализациями шумовых компонент ТИ. При

каждом запуске после построения матрицы решающей функции $[b_{kl}]$ определялись координаты (k_0, l_0) фрагмента, на котором решающая функция достигает минимума, и путем ее аппроксимации в окрестности точки (k_0, l_0) находились уточненные координаты по формулам:

$$\tilde{y} = k_0 - \frac{b_4 b_6 - 2b_2 b_5}{4b_3 b_5 - b_6^2}; \quad \tilde{x} = l_0 + \frac{b_2 b_6 - 2b_3 b_4}{4b_3 b_5 - b_6^2}, \quad (3)$$

которые следуют из выражения (1).

Предполагалось, что i -я реализация ТИ локализована, если при i -м запуске алгоритма выполнялось условие

$$|x_0 - \tilde{x}_i| < \alpha_x, |y_0 - \tilde{y}_i| < \alpha_y. \quad (4)$$

В процессе многократного запуска алгоритма находилась оценка \tilde{P} вероятности локализации ТИ как отношение количества Q исходов, удовлетворяющих условиям (4), к общему количеству запусков N , а также выборочные значения среднеквадратических отклонений и средних значений координат ТИ:

$$\sigma_x = \left(\frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q (\tilde{x}_i - \bar{\tilde{x}})^2 \right)^{1/2}; \quad \bar{\tilde{x}} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q \tilde{x}_i; \quad (5)$$

$$\sigma_y = \left(\frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q (\tilde{y}_i - \bar{\tilde{y}})^2 \right)^{1/2}; \quad \bar{\tilde{y}} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q \tilde{y}_i. \quad (6)$$

В качестве ЭИ использовалось изображение 20×20 элементов (рис. 1), состоящее из четырех зон с яркостями $T_1 = 100$, $T_2 = 120$, $T_3 = 140$, $T_4 = 160$.



Рис. 1. Эталонное изображение

На рис. 2 представлена зависимость $m_x = \tilde{x} - \{x_0\}$ от смещения $\Delta x = x_0 - \{x_0\}$ ТИ по оси X

при изменении x_0 в интервале $(-9,5; 10,5)$ и следующих параметрах: $y_0 = 10$; размеры ТИ $N_1 = N_2 = 9$; $q = 1$; $\varphi = 0$; $\sigma = 0$; $\alpha_x = \alpha_y = 1$. График построен для случая незашумленного ТИ. Здесь же приведен график прямой $m(\Delta x) = \Delta x$, соответствующей случаю идеального местоопределения. Таким образом, корреляционный алгоритм обладает систематической погрешностью в определении координат, которая максимальна при сдвиге сеток ЭИ и ТИ ровно на половину пикселя и близка к нулю при совпадении сеток сопо-

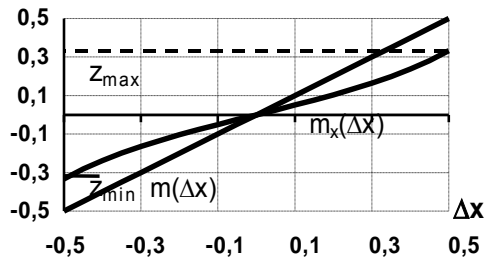


Рис. 2. Зависимость m_x от Δx

ставляемых изображений. Для устранения систематической погрешности необходимо построить функцию m_x^{-1} , обратную к m_x . Испытания показали, что при изменении x_0, y_0 в значительных пределах изменяются минимальное $z_{\min} = m_x(-1/2)$ и максимальное $z_{\max} = m_x(1/2)$ значения функции m_x , а форма кривой практически не изменяется. Аппроксимируем m_x кубической параболой

$$m_x(\Delta x) \approx \tilde{m}_x(\Delta x) = \alpha(\Delta x)^3 + \beta\Delta x + (z_{\min} + z_{\max})/2 \quad (7)$$

и из условий $m_x(1/4) = z_1, m_x(1/2) = z_{\max}$ определим коэффициенты α, β :

$$\alpha = 16(z_{\max} + z_{\min}/3 - 4z_1/3); \quad \beta = 16z_1/3 - 3z_{\max} - 7z_{\min}/3. \quad (8)$$

Вещественная ветвь функции, обратной к (7), имеет вид

$$\tilde{m}_x^{-1}(z) = \frac{\gamma(z)}{6|\alpha|} - \frac{2\beta}{\gamma(z)}, \quad (9)$$

где

$$\gamma(z) = \left\{ 108(z - (z_{\min} + z_{\max})/2) + 6\sqrt{3} \sqrt{16\beta^3/|\alpha| + 27(z_{\min} + z_{\max})^2 + 108z(z - z_{\min} - z_{\max})} \right\}^{1/3} \alpha^2 \quad (10)$$

Точность аппроксимации m_x зависимостью (7) иллюстрируется гра-

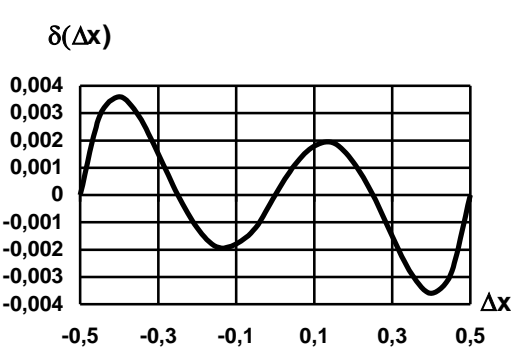


Рис. 3. График функции $\delta(\Delta x)$

фиком функции

$$\delta(\Delta x) = \tilde{m}_x(\Delta x) - m_x(\Delta x),$$

который представлен на рис. 3.

Чтобы осуществить компенсацию систематической погрешности местоопределения, алгоритм сопоставления изображений дополняется следующими вычислениями.

Пусть на первом этапе после вычисления решающей функции по формуле (2) координаты минимума равны (l, k) , а после уточнения пу-

тем аппроксимации РФ координаты центра ТИ составили (x, y) .

Для построения корректирующей функции вдоль оси x необходимо вычислить значения функции m_x в точках $\Delta x = -1/2; 1/4; 1/2$ и воспользоваться формулой (7). Поскольку функция m_x в точках $\Delta x = \pm 1/2$ имеет разрывы первого рода, вычисление значений z_{\min}, z_{\max} должно осуществляться в точках $-1/2 + \varepsilon, 1/2 - \varepsilon$, где $|\varepsilon| \ll 1$.

Процедура определения значения z_{\min} заключается в следующем. Методом интерполяции моделируется незашумленное ТИ с центром в точке $(\{x\} + \varepsilon, \{y\})$ и вычисляются новые значения РФ в девяти точках с координатами $(\{x\}, \{y\}), (\{x\} \pm 1, \{y\} \pm 1)$, по которым аппроксимируется поверхность РФ в окрестности экстремума. Затем по формулам (3) находят координаты минимума (x', y') и определяется $z_{\min} = x' - \{x\}$.

Аналогичным образом вычисляются значения z_1, z_{\max} , при этом моделируются ТИ с центрами в точках $(\{x\} + 1/4, \{y\}), (\{x\} + 1/2 - \varepsilon, \{y\})$. Затем в соответствии с формулой (9) находится уточненное значение координаты x :

$$\tilde{x} = \{x\} + \tilde{m}_x^{-1}(\delta x). \quad (11)$$

Подобным образом определяется уточненное значение координаты y :

$$\tilde{y} = \{y\} + \tilde{m}_y^{-1}(\delta y). \quad (12)$$

Аппроксимирующая поверхность (1) в случае

$$4b_3b_5 - b_6^2 > 0 \quad (13)$$

представляет собой эллиптический параболоид [2], для которого формулы (3) определяют координаты точки минимума. При невыполнении условия (13) аппроксимирующая поверхность представляет собой гиперболический параболоид, а формулы (3) дают координаты седловой точки. Поэтому следует предусмотреть проверку условия (13), и в случае его невыполнения отказаться от уточнения положения экстремума. На рис. 4 представлены графики зависимостей точности определения координаты x

$$\sigma_x = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_i - x_i)^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

от среднеквадратического значения шума σ с коррекцией и без коррекции систематической погрешности. В формуле (14) x_i - координата центра ТИ при его формировании в i -м испытании алгоритма в серии из N запусков, \tilde{x}_i - оценки координат центра ТИ, полученные с помощью алгоритма локализации.

График для точности определения координаты y выглядит аналогичным образом. При испытаниях алгоритма ко-



Рис. 4. Графики зависимостей точности определения координаты x от σ

ординаты (x_i, y_i) разыгрывались случайным образом в соответствии с выражениями:

$$x_i = [N_2/2] + r + 1 + (M_2 - N_2 - 2r - 3)\chi;$$
$$y_i = [N_1/2] + r + 1 + (M_1 - N_1 - 2r - 3)\chi,$$

где χ - значение случайной величины, распределенной по равномерному закону на интервале $[0, 1]$.

Из графиков на рис. 4 следует, что при больших отношениях сигнал/шум выигрыш в точности местоопределения при использовании процедуры коррекции может составить до 2 раз.

Выводы. Предложена аппроксимация систематической погрешности определения координат текущего изображения на ЭИ кубическим полиномом. Показано, что относительная погрешность местоопределения при такой аппроксимации не превышает 1 %. В результате статистических испытаний корреляционного алгоритма установлено, что при больших отношениях сигнал/шум в текущем изображении выигрыш в точности определения координат за счет коррекции систематической погрешности может достигать до 2 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации* / В.К. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьяков. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
2. *Привалов И.И. Аналитическая геометрия.* – М.: Физматгиз, 1963. – 272 с.

Поступила 25.03.2002

АНТЮФЕЕВ Валерий Иванович, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1969 году окончил ХГУ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, цифровая обработка изображений.

БАКУЛИН Игорь Евгеньевич, адъюнкт ХВУ. В 1995 году окончил ХВУ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов.

БЫКОВ Виктор Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела научного центра при ХВУ. В 1971 году окончил ХВКИУ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, дистанционное зондирование Земли, цифровая обработка изображений.

ГРИЧАНЮК Александр Михайлович, зам. нач. научно-исследовательского отдела научного центра при ХВУ. В 1990 году окончил ХВВКИУ РВ. Область научных интересов – системы навигации летательных аппаратов, цифровая обработка изображений.

МИРОШНИК - БЫКОВА Татьяна Викторовна, соискатель ХВУ. В 1999 году окончила ХВУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений.