

УДК 621.396.96

Я.Н. Кожушко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## АЛГОРИТМЫ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Приводятся результаты сравнительного анализа эффективности алгоритмов совмещения изображений в КЭСН двух типов: нормированного корреляционного и алгоритма обобщенной фазовой корреляции, обладающих достаточно высоким быстродействием. Показано, что наиболее устойчивым к воздействию различного рода искажений как геометрических, так и яркостных, оказывается нормированный корреляционный алгоритм.

*корреляционно-экстремальные системы навигации, алгоритмы совмещения изображений, эффективность и быстродействие алгоритмов*

### Введение

Принцип действия корреляционно-экстремальных систем навигации (КЭСН) летательных аппаратов основан на сравнении текущего изображения (ТИ), полученного с помощью датчика геофизического поля Земли, с эталонным изображением (ЭИ), полученным заранее. Сравнение изображений осуществляется с помощью одного из алгоритмов совмещения изображений. Эффективность алгоритма характеризуется вероятностью верного совмещения изображений. Другим важнейшим показателем алгоритмов, используемых в КЭСН, является быстродействие, которое должно быть не хуже 0,2...0,3 с. Сравнительные характеристики алгоритмов различных типов отсутствуют.

В литературе [1 – 4] описано большое количество алгоритмов, которые могут использоваться для совмещения изображений в КЭСН. Имеются некоторые оценки по быстродействию алгоритмов [1, 5], однако сравнительные оценки по эффективности алгоритмов отсутствуют. Другой метод повышения быстродействия корреляционного алгоритма состоит в использовании одного из быстрых алгоритмов [7] (например, быстрого преобразования Фурье (БПФ)) для вычисления взаимной корреляции ТИ и ЭИ с помощью спектрального представления изображений.

**Целью статьи** является проведение сравнительного анализа алгоритмов различных типов как с точки зрения эффективности, так и быстродействия, а также оценка их устойчивости к воздействию различного рода искажений ТИ.

### Выбор алгоритмов

Пусть заданы матрица ТИ

$$\mathbf{t} = [t_{ij}]_{(k,l) \in \overline{1, N_1} \times \overline{1, N_2}}$$

и матрица ЭИ

$$\mathbf{e} = [e_{ij}]_{(k,l) \in \overline{1, M_1} \times \overline{1, M_2}}.$$

Остановимся на двух алгоритмах, наиболее часто употребляемых на практике и удовлетворяющих требованиям по быстродействию:

– алгоритм с РФ в виде коэффициента взаимной корреляции ТИ и ЭИ

$$b_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (t_{ij} - \bar{t})(e_{i+k-1, j+l-1} - \bar{e}^{kl})}{\left[ \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (t_{ij} - \bar{t})^2 \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (e_{i+k-1, j+l-1} - \bar{e}^{kl})^2 \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

где

$$(k, l) \in \overline{1, R_1} \times \overline{1, R_2}, \quad R_i = M_i - N_i + 1, \quad i \in \overline{1, 2},$$

$$\bar{t} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} t_{ij}, \quad \bar{e}^{kl} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} e_{i+k-1, j+l-1},$$

который является оптимальным при искажениях яркости, описываемых группой линейных преобразований

$$\mathbf{t} = \alpha \mathbf{t}' + \beta, \quad \alpha > 0, \quad (3)$$

и называется в дальнейшем корреляционным алгоритмом (КА);

– алгоритм обобщенной фазовой корреляции (АОФК) [1,8] с РФ

$$b_{kl} = \frac{1}{\sqrt{P_1 P_2}} \sum_{m=0}^{P_1-1} \sum_{n=0}^{P_2-1} \frac{S_t(m, n) S_e^*(m, n)}{|S_t(m, n) S_e^*(m, n)|^{1-L}} e^{i2\pi \left( \frac{km}{P_1} + \frac{ln}{P_2} \right)}, \quad (4)$$

где

$$S_t(m, n) = \frac{1}{\sqrt{P_1 P_2}} \sum_{k=0}^{P_1-1} \sum_{l=0}^{P_2-1} \tilde{t}_{k+1, l+1} e^{i2\pi \left( \frac{km}{P_1} + \frac{ln}{P_2} \right)};$$

$$S_e(m, n) = \frac{1}{\sqrt{P_1 P_2}} \sum_{k=0}^{P_1-1} \sum_{l=0}^{P_2-1} \tilde{e}_{k+1, l+1} e^{i2\pi \left( \frac{km}{P_1} + \frac{ln}{P_2} \right)};$$

$$\tilde{t}_{ij} = \begin{cases} t_{ij}, & (i, j) \in \overline{1, N_1} \times \overline{1, N_2}; \\ 0, & (i, j) \notin \overline{1, N_1} \times \overline{1, N_2}; \end{cases}$$

$$\tilde{e}_{ij} = \begin{cases} e_{ij}, & (i, j) \in \overline{1, M_1} \times \overline{1, M_2}; \\ 0, & (i, j) \notin \overline{1, M_1} \times \overline{1, M_2}. \end{cases}$$

Размеры  $P_1, P_2$  выбираются из соотношений  $P_1 \geq R_1, P_2 \geq R_2$ , чтобы избежать наложения спектров изображений.

При  $L = 1$  рассматриваемый алгоритм соответствует корреляционному, представленному в частотной области.

В случае  $L = 0$ , когда утрачивается вся информация об амплитудах спектра изображений, он называется алгоритмом фазовой корреляции.

Предполагается, что на выходе каждого алгоритма включен блок уточнения координат, использующий один из методов приближения решающей функции в окрестности ее экстремума [9].

Под эффективностью такого алгоритма будем понимать вероятность наступления события, называемого верным совмещением изображений и состоящего в том, что оценка сдвига текущего и эталонного изображений  $(\tilde{x}, \tilde{y})$ , формируемая алгоритмом, попадает в окрестность

$$I_{x_0 y_0}^{d_1 d_2} = \{(x, y) \mid |x - x_0| < d_1, |y - y_0| < d_2\} \quad (5)$$

точки истинного сдвига  $(x_0, y_0)$ .

### Моделирование процесса совмещения изображений

Моделирование процесса совмещения изображений включает ряд этапов:

- 1) считывание ЭИ из файла;
- 2) случайным образом в соответствии с равномерным законом распределения по каждой из координат разыгрываются координаты центра  $(x_0, y_0)$  ТИ на ЭИ;
- 3) моделирование незашумленного текущего изображения по заданному ЭИ;
- 4) моделирование ТИ путем наложения на незашумленное ТИ нормально распределенного шума с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , имитирующего собственные шумы датчика;
- 5) моделирование собственно алгоритмов совмещения ЭИ и ТИ всех трех типов;
- 6) статистические испытания алгоритмов путем многократного их запуска с целью оценки эффективности как отношения числа верных привязок к общему количеству запусков алгоритмов.

Формирование ТИ по ЭИ осуществлялось следующим образом.

Задавались его размеры  $N_1 < M_1, N_2 < M_2$ , ко-

эффициент масштаба  $\mu$  и угол поворота ТИ  $\varphi$  относительно ЭИ вокруг точки  $(x_0, y_0)$ . В предположении, что ось  $y$  направлена вниз, вычислялись координаты  $(x_{ij}, y_{ij})$  элементов ТИ по формулам

$$x_{ij} = x_0 + (x' - x_0) \cos \varphi - (y' - y_0) \sin \varphi;$$

$$y_{ij} = y_0 + (x' - x_0) \sin \varphi + (y' - y_0) \cos \varphi;$$

$$(i, j) \in \overline{1, N_1} \times \overline{1, N_2},$$

где  $x'_{ij} = x_0 + \mu(j + \kappa_x)$ ,  $i \in \overline{1, N_1}, j \in -\overline{[N_2/2], N_x}$ ,

$$y'_{ij} = y_0 + \mu(i + \kappa_y), i \in -\overline{[N_1/2], N_y}, j \in \overline{1, N_2},$$

$$N_x = \begin{cases} [N_2/2] - 1; & N_2 = 2p; \\ [N_2/2]; & N_2 = 2p - 1; \end{cases}$$

$$N_y = \begin{cases} [N_1/2] - 1; & N_1 = 2p; \\ [N_1/2]; & N_1 = 2p - 1; \end{cases}$$

$$\kappa_x = \begin{cases} 1/2; & N_2 = 2p; \\ 0; & N_2 = 2p - 1; \end{cases} \quad \kappa_y = \begin{cases} 1/2; & N_1 = 2p; \\ 0; & N_1 = 2p - 1; \end{cases}$$

$[x]$  – операция определения целой части числа  $x$ .

Затем для каждой точки  $(x_{ij}, y_{ij})$  выбиралась ближайшая целочисленная точка

$$(k = [y_{ij}], l = [x_{ij}])$$

и находился сдвиг

$$(\Delta x_{ij} = x_{ij} - l, \Delta y_{ij} = y_{ij} - k),$$

для которого путем двумерной интерполяции по шести соседним отсчетам ЭИ с номерами  $(k, l)$ ,  $(k - 1, l)$ ,  $(k + 1, l)$ ,  $(k, l + 1)$ ,  $(k, l - 1)$ ,  $(k + 1, l + 1)$  находилась яркость  $t_{ij}$  элемента ТИ по формуле

$$t_{ij} = e_{k-1,l} \Delta y_{ij} (\Delta y_{ij} - 1) / 2 + e_{k,l-1} \Delta x_{ij} (\Delta x_{ij} - 1) / 2 +$$

$$+ e_{k,l} [1 + \Delta x_{ij} \Delta y_{ij} - (\Delta x_{ij})^2 - (\Delta y_{ij})^2] +$$

$$+ e_{k,l+1} \Delta x_{ij} (\Delta x_{ij} - 2\Delta y_{ij} + 1) / 2 +$$

$$+ e_{k+1,l} \Delta y_{ij} (\Delta y_{ij} - 2\Delta x_{ij} + 1) / 2 + e_{k+1,l+1} \Delta x_{ij} \Delta y_{ij}.$$

Зависимости эффективности АОФК от параметра  $L$  для различных значений  $\sigma$  представлена на рис. 1. Зависимости сняты для ЭИ, представленного на рис. 2, при следующих значениях параметров  $M_1 = M_2 = 50, N_1 = N_2 = 21, d_1 = d_2 = 1, P_1 = P_2 = 64$ . Видно, что чисто корреляционный алгоритм, соответствующий  $L = 1$ , на практике применять нецелесообразно. В дальнейшем выбирается близкое к оптимальному значение  $L = 0,4$ .

### Сравнительная характеристика алгоритмов

Представляет интерес провести сравнительный анализ рассматриваемых алгоритмов двух типов как с точки зрения быстродействия, так и с точки зрения эффективности.

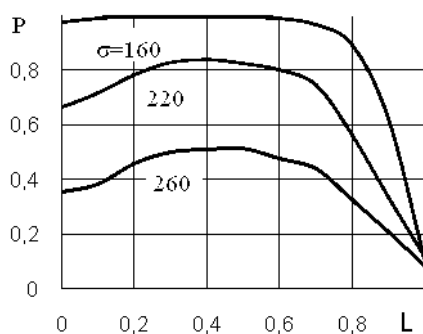


Рис. 1. Зависимость эффективности АОФК от параметра L

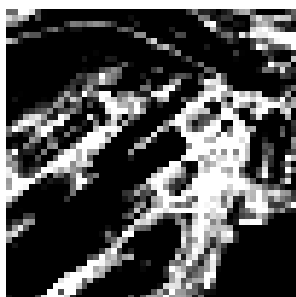


Рис. 2. Эталонное изображение

На рис. 3 представлены зависимости эффективности алгоритмов от среднеквадратического отклонения зашумляющего процесса  $\sigma$ . АОФК существенно уступает КА по устойчивости к шумовой компоненте ТИ.

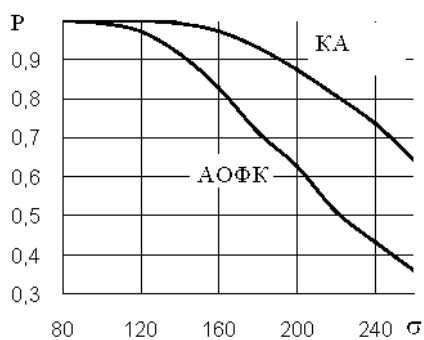


Рис. 3. Зависимость эффективности от  $\sigma$

От КА следует ожидать устойчивости при линейных искажениях яркости  $t'_{ik} = mt_{ik} + 1\delta T$  ( $\mathbf{1} - N_1 \times N_2$  – матрица с единичными элементами). Зависимости на рис. 4 от сдвига по яркости  $\delta T$  и рис. 5 от контрастности  $m$  подтверждают этот факт.

АОФК существенно уступает КА при изменении контраста изображений, так и сдвига по яркости.

На рис. 6, 7 приведены зависимости эффективности алгоритмов от угла поворота ТИ относительно ЭИ и различия в масштабах в пространственном положении элементов ЭИ и ТИ.

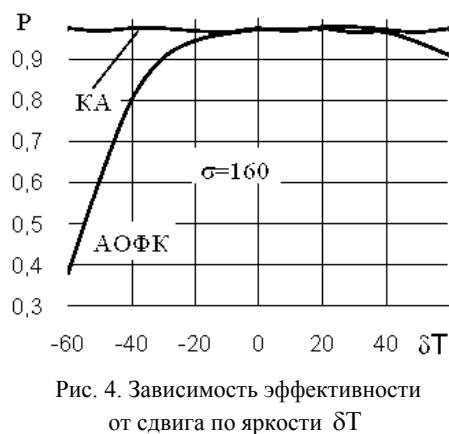


Рис. 4. Зависимость эффективности от сдвига по яркости  $\delta T$

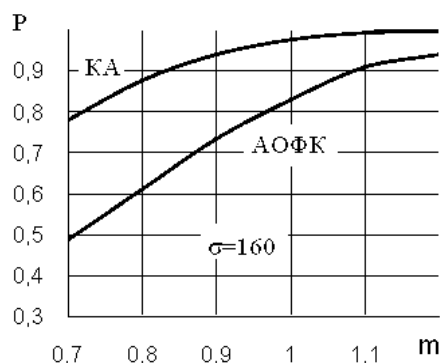


Рис. 5. Зависимость эффективности от  $m$

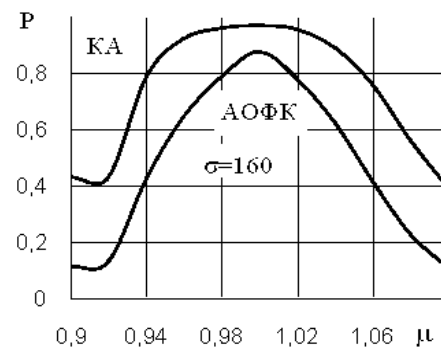


Рис. 6. Зависимость эффективности коэффициента масштаба  $\mu$

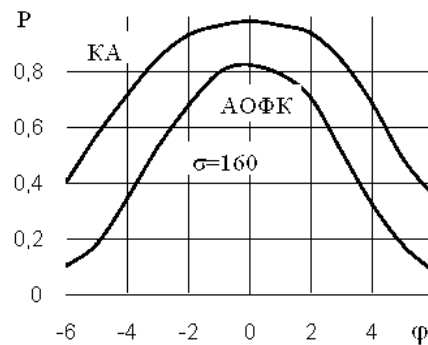


Рис. 7. Зависимость эффективности от угла взаимного поворота ТИ и ЭИ  $\varphi$

Быстродействие алгоритмов при обработке изображений указанных размеров для КА, РА и АОФК соответственно составило 57 мс и 45 мс в случае использования компьютера Celeron-630.

В КА использовался обычный одноуровневый алгоритм, а при реализации АОФК использовался алгоритм Radix4, требующий, чтобы размеры сравниваемых изображений были кратны четырем, и обладающий удвоенным быстродействием по сравнению с обычным алгоритмом БПФ.

Чтобы проиллюстрировать возможности повышения быстродействия при использовании БПФ и многоуровневых иерархических алгоритмов, рассмотрим случай обработки ЭИ относительно больших размеров  $M_1 = M_2 = 200$ . При этом размеры обрабатываемых изображений в АОФК выбирались  $P_1 = P_2 = 256$ , а быстродействие алгоритмов для различных размеров ТИ представлено в табл. 1.

Таблица 1

Анализ быстродействия алгоритма

ТИ	Быстродействие алгоритма, с				
	АОФК	РА		КА	
		1 ур.	2 ур.	1 ур.	2 ур.
20×20	0,811	0,95	0,036	1,75	0,054
40×40	0,811	3,21	0,086	5,98	0,144
60×60	0,811	5,71	0,155	13,34	0,272
80×80	0,811	16,74	0,311	25,71	0,488
100×100	0,811	27,75	0,572	31,74	0,726

Для КА и РА приведены результаты как одноуровневого, так и двухуровневого вариантов. Во втором случае на первом уровне находится оценка  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  сдвига изображений, на втором поиск экстремума РФ осуществляется не по всему ЭИ, а на множестве

$$J = [s(\tilde{x} - c), [s(\tilde{x} + c)] \times [s(\tilde{y} - c), [s(\tilde{y} + c)],$$

где коэффициент  $s$  задает размеры подматрицы  $J$ ; число  $c$  задает размер окна усредняющего фильтра.

В рассматриваемом случае были взяты следующие значения параметров:  $s = 2$ ;  $c = 2$ .

Результаты испытаний алгоритмов по показателю быстродействия показали, что при  $P_1 = P_2 = 64$  все они сравнимы по этому параметру, а при  $P_1 = P_2 = 256$  АОФК существенно превосходит корреляционные одноуровневые алгоритмы, но не удовлетворяет предъявляемым требованиям. Но двухуровневый КА в случае  $N_1 = N_2 \leq 60$  удовлетворяет требованиям по быстродействию.

## Выводы

При воздействии геометрических искажений КА и РА оказываются эквивалентными, а АОФК существенно уступает им в эффективности.

При воздействии линейных искажений по яркости наиболее устойчивым оказывается нормированный корреляционный алгоритм.

С точки зрения быстродействия многоуровневый КА превосходит АОФК.

Таким образом, нормированный корреляционный алгоритм оказывается наиболее устойчивым ко всем видам искажений ТИ.

## Список литературы

1. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации / В.К. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьяков; Под ред. В.К. Баклицкого. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
2. Андросов В.А., Бойко Ю.В., Бочкарев А.М., Однорог А.П. Совмещение изображений в условиях неопределенности // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 4. – С. 54-70.
3. Андреев Г.А., Потапов А.А. Алгоритмы обработки навигационной пространственно-временной информации. Ч. 1 // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №3. – С. 3-19.
4. Андреев Г.А., Потапов А.А. Алгоритмы обработки навигационной пространственно-временной информации. Ч. 2 // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – №4. – С. 3-21.
5. Wong R.Y., Hall E.L. Performance comparison of scene matching techniques // IEEE Trans. on PAMI. – 1979. – V. PAMI-1, № 3. – P. 325-330.
6. Антюфеев В.И., Быков В.Н., Чмил В.В. Теоретическая оценка эффективности иерархического корреляционного алгоритма совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХНУРЕ, 2005. – Вып. 143. – С. 65-71.
7. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1989. – 256 с.
8. Киричук В.С., Перетягин Г.И. Об установлении сходства фрагментов с эталоном // Автометрия. – 1986. – № 4. – С. 83-89.
9. Антюфеев В.И., Бакулин И.Е., Быков В.Н., Гричанюк А.М., Мирошник-Быкова Т.В. Повышение точности местоопределения радиометрических корреляционно-экстремальных систем навигации путем использования методов приближения решающей функции (сообщение 1) // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб., 2002. – Вып. 124. – С. 84-89.

Поступила в редколлегию 17.12.2007

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