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, использующихся 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

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

и матрица ЭИ

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

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

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

где

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

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

который является оптимальным при искажениях яркости, описываемых группой линейных преобразований

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

и называется в дальнейшем корреляционным алгоритмом (КА);

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

$$b_{kl} = \frac{1}{\sqrt{P_1P_2}}\sum_{m=0}^{P_1-1}\sum_{n=0}^{P_2-1}\frac{S_t(m,n)S_e^*(m,n)}{\left|S_t(m,n)S_e^*(m,n)\right|^{1-L}}e^{i2\pi\left(\frac{km}{P_1}+\frac{ln}{P_2}\right)}, \quad (4)$$

где

$$S_t(m,n) = \frac{1}{\sqrt{P_1P_2}}\sum_{k=0}^{P_1-1}\sum_{l=1}^{P_2-1}\tilde{t}_{k+1,l+1}e^{i2\pi\left(\frac{km}{P_1}+\frac{ln}{P_2}\right)};$$

$$S_e(m,n) = \frac{1}{\sqrt{P_1P_2}}\sum_{k=0}^{P_1-1}\sum_{l=1}^{P_2-1}\tilde{e}_{k+1,l+1}e^{i2\pi\left(\frac{km}{P_1}+\frac{ln}{P_2}\right)};$$

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

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

Размеры P_1, P_2 выбираются из соотношений $P_1 \ge R_1,\ P_2 \ge R_2$, 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

$$I_{x_0 y_0}^{d_1 d_2} = \left\{ (x,y) \left| \left| x - x_0 \right| < d_1, \left| y - y_0 \right| < d_2 \right. \right\} \qquad (5)$$

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 σ, 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 $N_1 < M_1,\ N_2 < M_2$, коэффициент масштаба μ и угол поворота ТИ φ 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 $x'_{ij} = x_0 + \mu(j + \kappa_x),\ i \in \overline{1,N_1},\ j \in \overline{-[N_2/2], N_x}$,

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

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

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

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

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

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

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

и находился сдвиг

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

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

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

Зависимости эффективности АОФК от параметра L для различных значений σ 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.

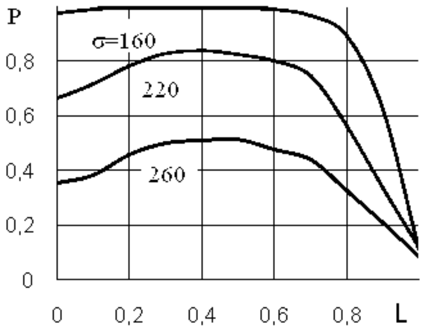

Рис. 1. Зависимость эффективности АОФК от параметра L

Рис. 2. Эталонное изображение

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

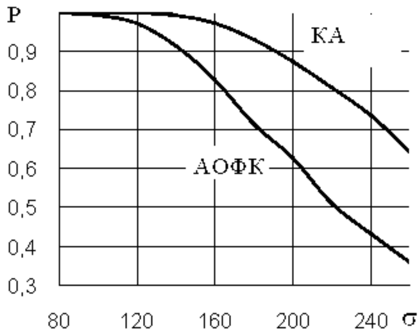

Рис. 3. Зависимость эффективности от σ

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

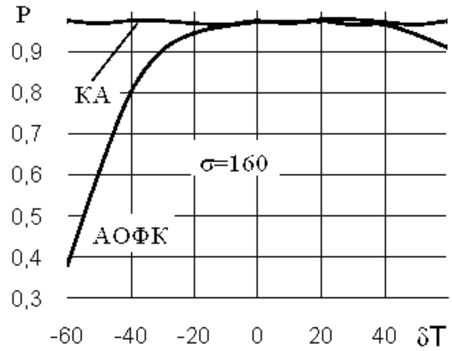

Рис. 4. Зависимость эффективности от сдвига по яркости δT

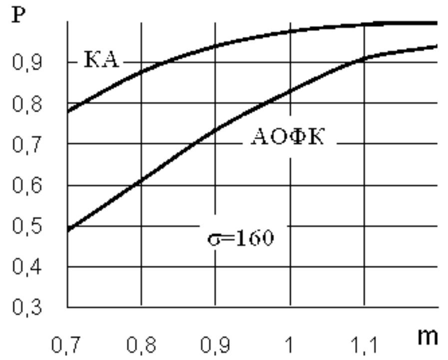

Рис. 5. Зависимость эффективности от m

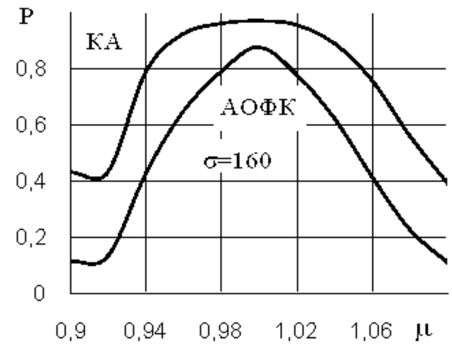

Рис. 6. Зависимость эффективности коэффициента масштаба μ

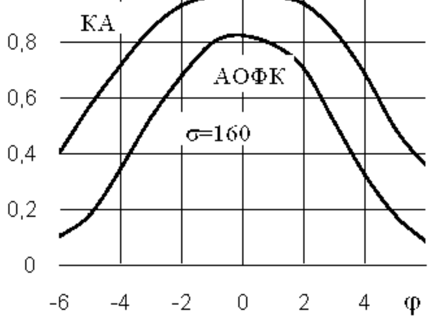

Рис. 7. Зависимость эффективности от угла взаимного поворота ТИ и ЭИ φ

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

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

где коэффициент c задает размеры подматрицы J; число s 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 $N_1 = N_2 \le 60$ 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., Одпорог 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. Perfomance comparison of scene matching techniques // IEEE Trans. on PAMI. – 1979. – V. PAMI-1, № 3. – P. 325-330.*
6. *Антюфеев В.И., Быков В.Н., Чмиль В.В. Теоретическая оценка эффективности иерархического корреляционного алгоритма совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч-техн. сб. – Х.: ХНУРЭ, 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 редколлегию17.12.2007

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