УДК 621.396.98

В.І. Антюфєєв[1], В.М. Биков[1], О.П. Ковтуненко[2], В.В. Чміль[2]

[1]*Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил, Харків*
[2]*Центральний НДІ озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ*

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОРІВНЕВОГО АЛГОРИТМУ СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ У КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НАВІГАЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Наводиться розв'язання задачі пошуку оптимального щодо швидкодії кількості рівнів багаторівневого алгоритму суміщення зображень у КЕСН.

літальний апарат, кореляційно-екстремальні системи навігації, зображення

Вступ

Постановка проблеми. Принцип дії кореляційно-екстремальних систем навігації (КЕСН) ґрунтується на прив'язці за допомогою одного з алгоритмів, як правило, кореляційного, поточного зображення (ПЗ), сформованого за допомогою датчика геофізичного поля Землі, до еталонного зображення (ЕЗ), отриманого заздалегідь. В оптичних КЕСН розміри ПЗ і ЕЗ можуть бути досить великими (більш ніж 100×100 елементів), і безпосередня обробка таких зображень кореляційним алгоритмом на сучасних комп'ютерах може займати десятки секунд, за умови потрібної швидкодії (0,1…0,5) с. Зменшення розмірів зображень приводить до погіршення ефективності алгоритму, тобто імовірності прив'язки (правильного суміщення зображень), при якій помилка місцевизначення не перевищує пікселя зображення. Підвищення швидкодії можливо шляхом переходу до ієрархічних (багаторівневих) алгоритмів, на кожному рівні яких здійснюється прив'язка зображень менших розмірів, одержуваних з вихідних зображень шляхом усереднення за вікном визначених розмірів. Після визначення координат глобального максимуму наступна прив'язка здійснюється для зображень великих розмірів не по всьому ЕЗ, а лише в околиці цього максимуму, що дозволяє різко скоротити обсяг обчислювань.

При зростанні числа рівнів багаторівневого алгоритму обчислювальна складність, а разом з нею і швидкодія, поліпшується, але погіршується ефективність алгоритму. Виникає проблема розробки оптимального за кількістю рівнів алгоритму при обмеженні на його ефективність.

Аналіз літератури. Більшість робіт [1 – 10], що стосуються ієрархічних алгоритмів, присвячена в основному розрахунку виграшу в обчислювальній ефективності їх використання в порівнянні з однорівневим кореляційним алгоритмом. У багаторівневих алгоритмах на вищих рівнях виникає проблема нецілечислового зсуву ЕЗ і ПЗ, що приводить до необхідності оцінки ефективності (правильного суміщення зображень) на цих рівнях не на одноточковій множині, а в прямокутній цілочисловій околиці формованої алгоритмом оцінки зсуву зображень, розміри якої визначаються в процесі тестів алгоритму. Вираження для такої ефективності у випадку бінарних зображень отримане в [5], а у загального випадку – у роботі [11].

Метою роботи є параметрична оптимізація багаторівневого алгоритму суміщення зображень у КЕСН щодо критерію швидкодії за кількістю рівнів при обмеженні на ефективність алгоритму.

Постановка задачі

Будемо ставити задачу параметричної оптимізації алгоритму при таких припущеннях і допущеннях:

– використовується кореляційний алгоритм суміщення зображень з коефіцієнтом взаємної кореляції ПЗ і ЕЗ як розв'язувальної функції;

– сітки ЕЗ і ПЗ збігаються;

– відносний поворот ЕЗ і ПЗ відсутній, а масштаби зображень збігаються.

Нехай ЕЗ і ПЗ задані у вигляді матриць

$$\mathbf{e}=[e_{ij}],\ i\in\overline{1,M_1},\ j\in\overline{1,M_2}\ ,$$

$$\mathbf{t}=[t_{ij}],\ i\in\overline{1,N_1},\ j\in\overline{1,N_2};\ N_1<M_1,\ N_2<M_2\ ,$$

відповідно і відомий зсув (k_0,l_0) ПЗ відносно ЕЗ. Припустимо, що справедлива адитивна модель взаємодії формованого датчиком ПЗ із шумом кожного каналу датчика

$$t_{ij}=a_{ij}+n_{ij},\quad i\in\overline{1,N_1},\ j\in\overline{1,N_2}, \tag{1}$$

причому шуми каналів вважаємо незалежними гауссівськими випадковими величинами з нульовим середнім значенням і середньоквадратичним відхиленням σ, тобто $n_{ij}\in\mathbf{N}(0,\sigma)$.

Якщо сітки ПЗ і ЕЗ збігаються й спотворення яскравості ПЗ відсутні, то

$$t_{ij}=e_{i+k_0-1,j+l_0-1}\mathrm{rect}(i/N_1,j/N_2)+n_{ij}\ , \tag{2}$$

де $\mathrm{rect}(i/N_1,j/N_2)=\begin{cases}1,\ (i,j)\in\overline{1,N_1}\times\overline{1,N_2};\\ 0,\ (i,j)\notin\overline{1,N_1}\times\overline{1,N_2}.\end{cases}$

Розіб'ємо вихідне ПЗ $\mathbf{t}$ на сукупність $s_1\times s_1$ - підматриць і побудуємо нове ПЗ розмірами $N_1^{(1)}\times N_2^{(1)}$ $(N_p^{(1)}=[N_p/s_1],\ p=1,2$, ($[x]$ позначає операцію взяття цілої частини числа x) з елементами

$$t_{ij}^{(1)}=\sum_{k=1}^{s_1}\sum_{l=1}^{s_1}t_{s_1 i+k-1,s_1 j+l-1}\ . \tag{3}$$

Аналогічним чином за допомогою рекурентних співвідношень

$$t_{ij}^{(r)}=\sum_{k=1}^{s_r}\sum_{l=1}^{s_r}t^{(r-1)}_{s_r i+k-1,s_r j+l-1},\ t_{ij}^{(0)}=t_{ij},\ r\in\overline{1,R} \tag{4}$$

побудуємо сукупність поточних зображень $\{\mathbf{t}^{(r)}\}_{r=0}^{R}$ $(\mathbf{t}^{(0)}=\mathbf{t})$, кожне з який має розміри $N_p^{(r)}=[N_p^{(r-1)}/s_r],\ N_p^{(0)}=N_p,\ r\in\overline{0,R},\ p\in\overline{1,2}$. З адитивної моделі зображення (1) випливає, що

$$t_{ij}^{(r)}\in N\left(a_{ij}^{(r)},\sigma_r\right)\ , \tag{5}$$

де $a_{ij}^{(r)}=\sum_{k=1}^{s_r}\sum_{l=1}^{s_r}a^{(r-1)}_{s_r i+k-1,s_r j+l-1},\ a_{ij}^{(0)}=a_{ij}$,

$\sigma_r=\sigma_{r-1}/s_r,\ \sigma_0=\sigma$.

Оскільки елементи матриці $\mathbf{t}$ передбачалися статистично незалежними між собою, то й елементи матриць $\mathbf{t}^{(r)},\ r\in\overline{1,R}$ мають цю властивість.

Аналогічним чином сформуємо сукупність еталонних зображень $\{\mathbf{e}^{(r)}\}_{r=0}^{R}$ $(\mathbf{e}^{(0)}=\mathbf{e})$, кожне з яких має розміри

$$M_p^{(r)}=[M_p^{(r-1)}/s_r];\ (M_p^{(0)}=M_p);\ p\in\overline{1,2}$$

і містить елементи

$$e_{ij}^{(r)}=\sum_{k=1}^{s_r}\sum_{l=1}^{s_r}e^{(r-1)}_{s_r i+k-1,s_r j+l-1},\ e_{ij}^{(0)}=e_{ij}, \tag{6}$$

$$r\in\overline{1,R},\ i\in\overline{1,M_1^{(r)}},\ j\in\overline{1,M_2^{(r)}}\ .$$

Розв'язувальна функція кореляційного алгоритму сполучення зображень на r-му рівні має вигляд

$$b_{kl}^{(r)}=\sum_{i=1}^{N_1^{(r)}}\sum_{j=1}^{N_2^{(r)}}\tilde{t}_{ij}^{(r)}\tilde{e}_{ij,kl}^{(r)}\ , \tag{7}$$

$$k\in\overline{1,R_1^{(r)}};\ l\in\overline{1,R_2^{(r)}};\ R_p^{(r)}=M_p^{(r)}-N_p^{(r)}+1;\ p\in\overline{1,2}\ ,$$

де $\tilde{t}_{ij}^{(r)}=\left(t_{ij}^{(r)}-\bar{t}^{(r)}\right)\left[\frac{1}{N^{(r)}}\sum_{i=1}^{N_1^{(r)}}\sum_{j=1}^{N_2^{(r)}}\left(t_{ij}^{(r)}-\bar{t}(r)\right)^2\right]^{-1/2}$;

$$\bar{t}^{(r)}=\frac{1}{N^{(r)}}\sum_{i=1}^{N_1^{(r)}}\sum_{j=1}^{N_2^{(r)}}t_{ij}^{(r)},\ N^{(r)}=N_1^{(r)}N_2^{(r)};$$

$$\tilde{e}_{ij,kl}^{(r)}=\left(e^{(r)}_{i+k-1,j+l-1}-\bar{e}_{kl}^{(r)}\right)\left[\frac{1}{N^{(r)}}\sum_{i=1}^{N_1^{(r)}}\sum_{j=1}^{N_2^{(r)}}\left(e^{(r)}_{i+k-1,j+l-1}-\bar{e}_{kl}^{(r)}\right)^2\right]^{-1/2};$$

$k_0^{(r)}=\{k_0^{(r-1)}/s_r\},\ l_0^{(r)}=\{l_0^{(r-1)}/s_r\}],\ k_0^{(0)}=k_0,\ l_0^{(0)}=l_0$;

$\{x\}$ – операція округлення x до найближчого цілого.

Позначимо через $A_{pq}^{(r)}$ подію, що полягає в тому, що $b_{pq}^{(r)}>b_{kl}^{(r)},\ k\neq p,\ l\neq q,\ (k,l)\in J^{(r)}$, тобто максимум розв'язувальної функції досягається на фрагменті з номером (p,q) в області

$$J^{(r)}=\left\{(k,l)\in\overline{R_{1\min}^{(r)},R_{1\max}^{(r)}}\times\overline{R_{2\min}^{(r)},R_{2\max}^{(r)}}\right\}\ , \tag{8}$$

де з урахуванням крайових ефектів

$$\begin{cases}R_{1\min}^{(r)}=\max\left(1,\ k_0^{(r)}-[c_r s_r]\right),\ r\in\overline{0,R-1};\\ 1,\qquad r=R;\end{cases}$$

$$\begin{cases}R_{1\max}^{(r)}=\min\left(R_1^{(r)},\ k_0^{(r)}+[c_r s_r]\right);\\ R_1^{(R)},\qquad r=R;\end{cases}$$

$$\begin{cases}R_{2\min}^{(r)}=\max\left(1,\ l_0^{(r)}-[c_r s_r]\right),\ r\in\overline{0,R-1};\\ 1,\qquad r=R;\end{cases}$$

$$\begin{cases}R_{2\max}^{(r)}=\min\left(R_2^{(r)},\ l_0^{(r)}+[c_r s_r]\right);\\ R_2^{(R)},\qquad r=R;\end{cases}$$

$$R_j^{(r)}=(M_j^{(r)}-N_j^{(r)}+1),\ j\in\overline{1,2}\ .$$

За допомогою коефіцієнта c_r встановлюються розміри підматриці $\mathbf{e}^{(r)}_{k_0^{(r)}l_0^{(r)}}\subset\mathbf{e}^{(r)}$, за елементами якої організується пошук екстремуму вирішальної функції (7) на r-му рівні. При збільшенні цього коефіцієнта зростає кількість операцій для пошуку положення екстремуму і падає швидкодія алгоритму, але зростає імовірність перебування максимуму в межах підматриці $\mathbf{e}^{(r)}_{k_0^{(r)}l_0^{(r)}}$. Цієї підматриці на $(r+1)$-му рівні відповідає підматриця $\mathbf{e}^{(r+1)}_{k_0^{(r+1)}l_0^{(r+1)}}$, номери елементів якої утворюють множину

$$I^{(r+1)} = \left\{(k,l) \in \overline{k_0^{(r+1)} - d_{r+1}, k_0^{(r+1)} + d_{r+1}} \times \overline{l_0^{(r+1)} - d_{r+1}, l_0^{(r+1)} + d_{r+1}}\right\},$$

де за допомогою коефіцієнта $d_{r+1} = [c_r]$ задаються розміри околу точки $\left(k_0^{(r+1)}, l_0^{(r+1)}\right)$, при влученні в яку максимум розв’язувальної функції суміщення вважається правильним. На нульовому рівні коефіцієнт d_0 задається заздалегідь. У роботі [11] показано, що імовірність правильного суміщення за допомогою багаторівневого алгоритму визначається виразом

$$P = \prod_{r=0}^{R} P^{(r)} , \qquad (9)$$

де $P^{(r)} = P(A^{(r)} / A^{(R)} \ldots A^{(r+1)})$;

$$P^{(r)} = P(A^{(r)} / A^{(r+1)}) = 1 - \prod_{(p,q) \in I^{(r+1)}} (1 - P_{pq}^{(r)}) ;$$

$$P_{pq}^{(r)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2/2} \times$$

$$\times \prod_{(k,l) \in J^{(r)} \setminus (p,q)} \Phi\left(\frac{x\sqrt{\mu_2(b_{pq}^{(r)})} + m_1(b_{pq}^{(r)}) - m_1(b_{kl}^{(r)})}{\sqrt{\mu_2(b_{kl}^{(r)})}} \right) dx,$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-t^2/2} dt$ – інтеграл імовірності; $m_1(b_{kl})$, $\mu_2(b_{kl}) = m_2(b_{kl}) - m_1^2(b_{kl})$ – середнє значення і дисперсія випадкової величини b_{kl}

Розрахуємо тепер швидкодію алгоритму безпосереднім обчисленням часу, необхідного для виконання кількості операцій додавання $\tau_{a\Sigma}$ і множення $\tau_{m\Sigma}$, необхідних для реалізації кореляційного багаторівневого алгоритму:

$$\tau = \tau_{a\Sigma} + \tau_{m\Sigma} ; \qquad (10)$$

$$\tau_{a\Sigma} = \tau_a \left[4 + R + \sum_{r=0}^{R-1} \left(N^{(r)} (3 + s_r^2) + M_1^{(r)} M_2^{(r)} s_r^2 + n_{ar} \right) \right];$$

$$\tau_{m\Sigma} = \tau_m \left[3(1+R) + \sum_{r=0}^{R-1} \left(2N^{(r)} + n_{mr} \right) \right],$$

де

$$n_{ar} = \tau_a \begin{cases} \left(2[c_r s_r] + 1\right)^2 (4N^{(r)} + 1), & r \in \overline{0, R-2}; \\ R_1^{(r)} R_2^{(r)} (4N^{(r)} + 1), & r = R-1, \end{cases}$$

$$n_{mr} = \tau_m \begin{cases} 3\left(2[c_r s_r] + 1\right)^2 (N^{(r)} + 1), & r \in \overline{0, R-2}; \\ R_1^{(r)} R_2^{(r)} (N^{(r)} + 1), & r = R-1, \end{cases}$$

$N^{(r)} = N_1^{(r)} N_2^{(r)}$; τ_a, τ_m – час виконання операції додавання і множення відповідно комп'ютером даного типу.

Постановка задачі виглядає таким чином: потрібно мінімізувати швидкодію (10) багаторівневого алгоритму суміщення зображень за параметрами R, $\{s_r\}_{r=0}^{R-1}$ при обмеженні на ефективність алгоритму вигляду

$$P \geq P_d , \qquad (11)$$

де P_d – задане значення ефективності.

Оптимізація алгоритму суміщення зображень

Поставлена задача відноситься до типу задач цілечисельного програмування [12]. Через невисоку розмірність задачі її можна розв’язувати методом перебору. Як ЕЗ використовувалося наведене на рис. 1 зображення. Оскільки в роботі [11] показано, що результати обчислень ефективності за формулою (9) досить істотно відрізняються від результатів статистичних іспитів алгоритму суміщення зображень при значеннях ефективності, близьких до одиниці, у роботі використовувалися оцінки ефективності, отримані другим методом.

Рис. 1. Еталонне зображення

Таблиця 1

Швидкодія та ефективність алгоритму

R	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	τ, c	P	
								σ = 600	σ = 800
2	2	2	-	-	-	-	1,022	0,995	0,98
	2	3	-	-	-	-	1,024	1,0	0,97
	3	2	-	-	-	-	0,4200	1,0	0,98
	3	3	-	-	-	-	0,4205	1,0	0,955
	3	4	-	-	-	-	**0,421**	1,0	0,965
	4	3	-	-	-	-	0,477	1,0	0,965
	4	4	-	-	-	-	0,478	1,0	0,97
3	2	2	2	-	-	-	0,2058	0,99	0,925
	3	2	2	-	-	-	0,2689	0,975	0,95
	2	3	2	-	-	-	**0,1902**	0,99	0,945
	2	3	3	-	-	-	0,1903	0,995	0,95
	2	3	4	-	-	-	0,1905	0,99	0,92
4	2	2	2	2	-	-	**0,1581**	0,97	0,93
	3	2	2	2	-	-	0,2610	0,94	0,895
	3	3	2	2	-	-	0,2727	0,93	0,76
	2	2	3	2	-	-	0,1628	0,975	0,92
	2	2	3	3	-	-	0,1628	0,925	0,92
5	2	2	2	2	2	-	**0,1560**	0,935	0,915
	3	2	2	2	2	-	0,2611	0,965	0,865
	2	2	2	2	3	-	0,1561	0,925	0,88
	2	2	2	3	3	-	0,1577	0,96	0,825
6	2	2	2	2	2	2	**0,1562**	0,855	0,795
	2	2	2	2	2	3	0,1562	0,85	0,79

У табл. 1 наведено результати обчислення швидкодії за формулою (10) і оцінок ефективності, отриманих шляхом імітаційного моделювання, для різних сукупностей параметрів R, $s_0, \ldots, s_{R-1}$, що варіюють. Використовувалося ЕЗ розмірами 200×200

елементів, ПЗ розмірами 101×101 елемент і такі значення параметрів:

$$c_r = c = 2; \; P_d = 0,95 ;$$

$$k_0 = 100, \; l_0 = 100, \sigma = 600, \sigma = 800 .$$

Для використовуваного комп'ютера з процесором Celeron-950 МГц час виконання операцій додавання і множення склав відповідно $\tau_a = 0{,}019$ мкс, $\tau_m = 0{,}021$ мкс.

Таблиця 2

Швидкодія та ефективність алгоритму

R	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	τ, с	P	
								σ =1800	σ =1600
3	2	2	2	-	-	-	3,1134	0,95	0,985
	3	2	2	-	-	-	2,0535	0,97	0,96
	2	3	2	-	-	-	**1,5543**	0,95	0,98
	2	3	3	-	-	-	1,5550	0,945	0,98
	2	3	4	-	-	-	1,5562	0,95	0,965
4	2	2	2	2	-	-	1,1052	0,925	0,96
	3	2	2	2	-	-	1,6675	0,92	0,955
	3	3	2	2	-	-	1,7221	0,95	0,97
	2	2	3	2	-	-	1,6671	0,94	0,97
	2	2	3	3	-	-	**1,0441**	0,91	0,95
	2	2	3	4	-	-	1,0444	0,9	0,94
5	2	2	2	2	2	-	**0,9884**	0,85	0,935
	3	2	2	2	2	-	1,6468	0,88	0,935
	2	2	2	2	3	-	0,9885	0,88	0,95
	2	2	2	3	3	-	0,9932	0,855	0,935
6	2	2	2	2	2	2	**0,9824**	0,7	0,91
	2	2	2	2	2	3	0,9825	0,715	0,855

У табл. 2 наведені аналогічні результати для зображень великих розмірів: ЕІ 500×500 елементів, ТІ 251×251 елемент, $\sigma = 1600$, $\sigma = 1800$, $k_0 = 200$, $l_0 = 200$. Напівжирним шрифтом виділені мінімальні для кожної кількості рівнів R значення часу τ обчислень багаторівневим алгоритмом. Обчислення проводилися не за формулою (7) для кореляційного алгоритму, а відповідно до виразу

$$\hat{b}_{kl}^{(r)} = \sum_{i=1}^{N_1^{(r)}} \sum_{j=1}^{N_2^{(r)}} \left[\left(\tilde{t}_{ij}^{(r)} \right)^2 - \left(\tilde{e}_{ij,kl}^{(r)} \right)^2 \right] = 2\left(1 - b_{kl}^{(r)} \right) ,$$

оскільки операція піднесення до квадрата комп'ютером виконується істотно швидше операції множення (для даного комп'ютера тривалість операції піднесення до квадрата складає 0,006 мкс).

У результаті аналізу отриманих даних можна зробити такі висновки:

– виграш у швидкодії при $R > 4$ стає незначним, а ефективність з ростом R падає, тому використання алгоритмів з $R > 4$ недоцільно;

– за даними табл. 1 оптимальними параметрами алгоритму, при яких задовольняється обмеження (10), є такі:

при $\sigma = 600$ $\hat{R} = 4$, $\hat{s}_r = 2$, $r \in \overline{0,3}$; $\hat{\tau} = 0,581$с;

при $\sigma = 800$ $\hat{R} = 2$, $\hat{s}_0 = 3, \hat{s}_1 = 4$; $\hat{\tau} = 0,421$с;

– за даними табл. 2:

при $\sigma = 1600$ $\hat{R} = 4$, $\hat{s}_0 = \hat{s}_1 = 2$; $\hat{s}_2 = \hat{s}_3 = 3, \hat{\tau} = 1,0441$с;

при $\sigma = 1800$ $\hat{R} = 2$, $\hat{s}_0 = \hat{s}_2 = 2, \hat{s}_1 = 3, \hat{\tau} = 1,5543$с;

– швидкодія багаторівневого алгоритму для даного комп'ютера задовольняє вимоги (не більше 0,5с) тільки для зображень, розміри яких не перевищують 200×200 елементів.

ВиЯновкия

Наведено розв’язання задачі параметричної оптимізації багаторівневого алгоритму суміщення зображень у КЕСН. Показано, що застосування алгоритмів з кількістю рівнів більше ніж 4 не доцільно. Для підвищення швидкодії багаторівневого алгоритму можна використовувати алгоритми швидкого перетворення Фур'є й інші швидкі алгоритми для обчислення взаємної кореляції зображень.

СпиЯокялітература

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. Wong R.Y. Sequentical scene matching using edge features // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1978. – V. AES-14, N 1. – P. 128-140.

3. Rosenfeld A., VanderBrug G.J. Coarse fine template matching // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. – 1977. – V. SMC-7. – N 2. – P. 104-107.

4. Vanderbrug G.J., Rosenfeld A. Two-stage template matching // IEEE Trans. Comput. – 1977. – V. C-26, N 4. – P. 384-393.

5. Tanimoto, Pavlidis T. A hierarchical data structure for picture processing // Computer Graphics Image Processing. – 1975. – V. 4. – P. 104-117.

6. Wong R.Y., Hall E.L. Sequentical hierarchical scene matching // IEEE Trans. Comput. – 1978. – V. C-27, N 4. – P. 359-366.

7. Benie G.B., Thomson K.P.B. Hierarchical image segmentation using local and adaptive similarity // Int. J. Remote Sens. – 1992. – V. 13, N 8. – P. 1559-1570.

8. Tanimoto , Pavlidis T. A hierarchical data structure for picture processing // Computer Graphics Image Processing. – 1975. – V. 4. – P. 104-117.

9. Гороховатский В.А. Выбор порогов в иерархических статистических алгоритмах анализа изображений // Радиотехника. – 1989. – Вып. 91. – С. 63-68.

10. Гороховатский В.А. Оптимизация иерархических корреляционных алгоритмов анализа изображений // Радиоэлектроника. – 1988. – Т. 31, № 1. – С. 46-51.

11. Антюфеев В.И., Быков В.Н., Чмиль В.В. Теоретическая оценка эффективности иерархического корреляционного алгоритма совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации // Радиотехника. – Х.: ХНУРЭ, 2005. – Вып. 143. – С. 65-71.

12. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Сов. радио, 1975. – 234 с.

Надійшла до редколегії 6.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Є.Л. Казаков, Об’єднаний науково-дослідний інститут ЗС, Харків.