

УДК 621.373.826(075.8)

Л. В. Л а б у н е ц, А. В. П о п о в

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ 3D-ОБЪЕКТА ПО НАБОРУ РАКУРСНЫХ СНИМКОВ

*Предложена методика реконструкции тепловизионного изображения антропогенного объекта локации по относительно малому набору экспериментально полученных ракурсных снимков. Методика основана на применении эффективных алгебраических алгоритмов вычислительной томографии. Алгоритмы обеспечивают разумный компромисс между относительно низкими вычислительными затратами цифрового моделирования входных сигналов ИК координаторов цели и адекватность модели экспериментальным изображениям.*

**E-mail:** Labunetc@bmstu.ru; avpopov@smtp.ru

**Ключевые слова:** *томография, ART-алгоритм, реконструкция изображений, бронетанковая техника.*

Одним из перспективных направлений автоматизированного проектирования ИК систем наведения является создание поверочных комплексов цифрового моделирования входных сигналов локационных систем. Программное обеспечение таких комплексов предусматривает необходимость компьютерного моделирования в режиме реального времени тепловизионных изображений ИК координаторов цели. Эффективное решение этой задачи предполагает наличие представительной базы данных изображений 3D-объектов, сформированной методами экспериментальных измерений, физического и математического моделирования. Приведенные в работах [1, 2] имитационные цифровые модели изображений антропогенных объектов являются надежной методической основой для создания моделей реального масштаба времени входных сигналов тепловизионных локационных систем.

При построении цифровых моделей изображений целей и реализаций сигналов в оптическом спектральном диапазоне исходная информация нередко задается в виде набора ракурсных снимков объектов локации. В этом случае задачу синтеза изображения или расчета интегрального сигнала с любого заданного ракурса рационально сформулировать как задачу реконструкции геометрических и оптических параметров наблюдаемой цели.

Восстановление трехмерной конфигурации объекта по набору его снимков достаточно эффективно выполняют фотограмметрическими

методами на основе модели стереопсиса. В настоящей работе будем предполагать, что геометрический образ цели априори известен. В такой постановке задача реконструкции оптических параметров цели может быть успешно решена методами компьютерной томографии [3]. Их применение основано на поэтапном решении проблемы, а именно:

1) создание математической модели отражения и излучения, устанавливающей взаимосвязь ракурсных изображений 3D-объекта или его интегральных сигналов с оптическими параметрами. Такая модель представляет собой, как правило, систему уравнений энергетического баланса (СУЭБ) [2];

2) формирование эффективных вычислительных алгоритмов восстановления оптических параметров цели на основе решения СУЭБ;

3) моделирование в режиме реального времени изображения объекта и локационных сигналов для заданного ракурса.

Рассмотрению первого этапа посвящены работы [1, 2]. В частности, показано [2], что задача реконструкции оптических параметров отражающего и излучающего объектов по набору ракурсных снимков сводится в общем случае к решению системы нелинейных уравнений. Эта система уравнений описывает распределение по поверхности цели температуры, формы индикатрис отражения и излучения, а также оптические постоянные покрытия такие, как показатели преломления, поглощения и рассеяния.

Ясно, что попытка решения такой системы нелинейных уравнений приведет к необходимости построения весьма сложного в вычислительном отношении алгоритма. Однако если исходить из конечной цели моделирования, связанной с синтезом изображения объекта с любого заданного ракурса, то задача реконструкции значительно упрощается. В этом случае СУЭБ достаточно просто линеаризуется и принимает вид [2]

$$a_k[n] w_1[n] + Ln(w_3[n]) + Ln(w_4[m_{kn}]) = b_k[n]; \quad (1)$$
$$n = 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, K.$$

Здесь  $w_1[n]$ ;  $Ln(w_3[n])$  ( $n = 1, \dots, N$ ) и  $Ln(w_4[m])$  ( $m = 1, \dots, M$ ) — набор  $(2N + M)$  неизвестных теплофизических параметров цели;  $n = n_1 + (n_2 - 1)N_1$  — лексикографический индекс  $(n_1, n_2)$ -го пикселя синтезируемого изображения размером  $N_1 \times N_2$ ;  $N = N_1 N_2$  — число пикселей изображения;  $1 \leq m_{kn} \leq M$  — номер уровня квантования индикатрисы излучения, регистрируемого для  $(n_1, n_2)$ -го элемента поверхности  $\Delta S[n_1, n_2]$  объекта локации на  $k$ -м снимке;  $M$  — число уровней квантования нормированной индикатрисы излучения [1].

Значения коэффициентов системы линейных уравнений рассчитывают по формулам [2]

$$a_k[n] = \frac{B_k^{(R)}[n]}{B_{k0}^{(E)}[n]} \quad \text{и} \quad b_k[n] = a_k[n]R_0 + Ln \left( B_{k0}^{(E)}[n] \right) \quad (2)$$

по результатам измерений яркостей  $B_k[n]$  для  $k$ -го снимка цели. В указанных равенствах  $B_k^{(R)}[n] = \sum_{j=1}^N w_2[n, j] B_k[j]$  – суммарная яркость излучения, отраженного всеми элементами поверхности цели в направлении  $(n_1, n_2)$ -го элемента ее поверхности при  $k$ -м измерении;  $w_2[n, j]$  – вес, учитывающий геометрические условия теплообмена между  $(n_1, n_2)$ -м и  $(j_1, j_2)$ -м элементами поверхности [2],  $j = j_1 + (j_2 - 1)N_1$ ;  $B_{k0}^{(E)}[n] = B_k[n] - R_0 B_k^{(R)}[n]$  – средняя яркость  $(n_1, n_2)$ -го пикселя на  $k$ -м снимке, обусловленная собственным излучением объекта локации.

Средний полусферический коэффициент отражения цели  $0 \leq R_0 \ll 1$  является параметром линеаризации СУЭБ. Переотражение оптического излучения между элементами поверхности объекта отсутствует, если  $R_0 = 0$ . Типичное стартовое значение  $R_0 \approx 0,1$ . Значение коэффициента

$$R_0 = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{\delta_k[n]}{B_k^{(R)}[n]} (B_k[n] - w_3[n]w_4[m_{nk}])}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \delta_k[n]}$$

уточняют после каждого цикла в алгоритме решения системы уравнений (1). В последнем равенстве  $\delta_k[n]$  – индикаторная функция, равная единице, если  $(n_1, n_2)$ -й элемент поверхности цели не маскируется другими элементами по отношению к приемнику излучения для условий  $k$ -й съемки. В противном случае  $\delta_k[n] = 0$ .

Важно отметить, что система уравнений (1) записана для множества факетов  $\Delta S[n_1, n_2]$  ( $n_1 = 1, \dots, N_1$ ;  $n_2 = 1, \dots, N_2$ ), полученных центральным проецированием пикселей синтезируемого изображения на поверхность объекта относительно центра  $O_{0R}$  (рис. 1). Здесь значение индекса  $k = 0$  ассоциировано с ракурсом модельного изображения. Ясно, что обратная проекция  $(n_1, n_2)$ -й точки цели относительно центра  $O_{kR}$  на плоскость  $k$ -го ракурсного изображения ( $k = 1, \dots, K$ ), как правило, не совпадает с узлами растра экспериментального снимка. Это приводит к необходимости интерполяции значений яркостей  $B_k[n]$ , входящих в равенства (2), по экспериментальным значениям яркостей в ближайших узлах растра ракурсного изображения.

Пусть центральная проекция  $(n_1, n_2)$ -й точки объекта попадает в ячейку дискретизации  $k$ -го экспериментального снимка с индексами  $m_1 \leq y_{kR}/\Delta_Y \leq m_1 + 1$  и  $m_2 \leq z_{kR}/\Delta_Z \leq m_2 + 1$  (рис. 2). Здесь  $\{y_{kR}, z_{kR}\}$  – координаты центральной проекции  $(n_1, n_2)$ -й точки цели на плоскости  $k$ -го снимка. Для упрощения записи последующих

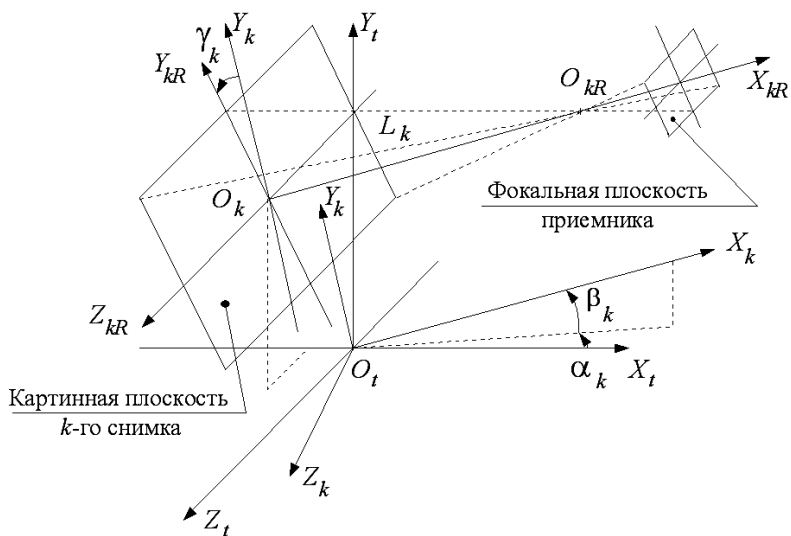


Рис. 1. Системы координат  $k$ -й ракурсной съемки

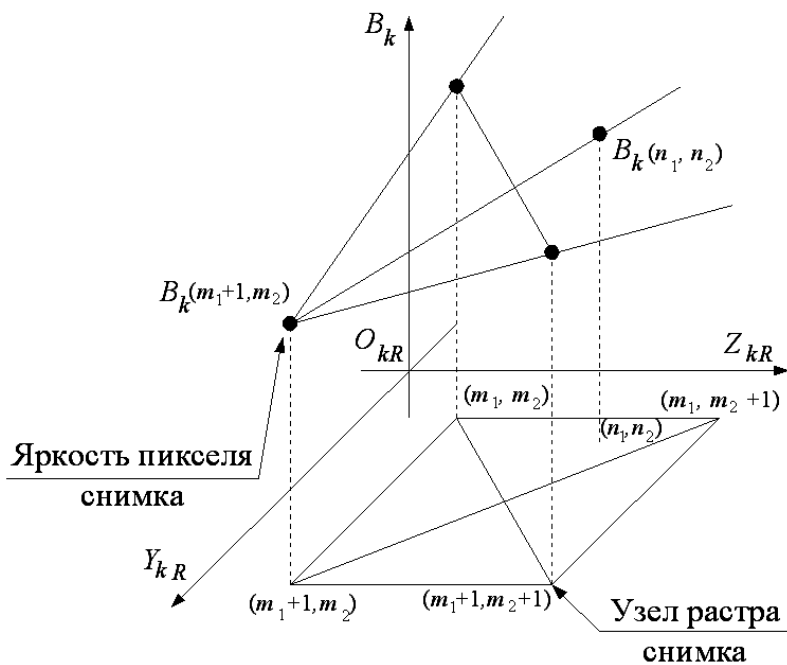


Рис. 2. Кусочно-линейная интерполяция яркости  $k$ -го ракурсного снимка цели

формулы обозначим:

$$y = y_{kR} / \Delta Y; \quad z = z_{kR} / \Delta Z; \quad B_k[n_1, n_2] = b(y, z).$$

Тогда в ячейке дискретизации  $k$ -го ракурсного изображения справедливы следующие формулы линейной интерполяции [4]:

$$2b(y, z) = \begin{cases} b_1(y, z) + b_2(y, z), & (y + z < m_1 + m_2 + 1) \wedge (y - z > m_1 - m_2); \\ b_2(y, z) + b_3(y, z), & (y + z > m_1 + m_2 + 1) \wedge (y - z > m_1 - m_2); \\ b_3(y, z) + b_4(y, z), & (y + z > m_1 + m_2 + 1) \wedge (y - z < m_1 - m_2); \\ b_1(y, z) + b_4(y, z), & (y + z < m_1 + m_2 + 1) \wedge (y - z < m_1 - m_2), \end{cases}$$

где

$$b_1(y, z) = B^{(k)}[m_1, m_2] + \{B^{(k)}[m_1 + 1, m_2] - B^{(k)}[m_1, m_2]\} (y - m_1) + \{B^{(k)}[m_1, m_2 + 1] - B^{(k)}[m_1, m_2]\} (z - m_2);$$

$$b_2(y, z) = B^{(k)}[m_1, m_2 + 1] + \{B^{(k)}[m_1 + 1, m_2 + 1] - B^{(k)}[m_1, m_2 + 1]\} (y - m_1) + \{B^{(k)}[m_1, m_2 + 1] - B^{(k)}[m_1, m_2]\} (z - m_2 - 1);$$

$$b_3(y, z) = B^{(k)}[m_1 + 1, m_2 + 1] + \{B^{(k)}[m_1 + 1, m_2 + 1] - B^{(k)}[m_1, m_2 + 1]\} (y - m_1 - 1) + \{B^{(k)}[m_1 + 1, m_2 + 1] - B^{(k)}[m_1 + 1, m_2]\} (z - m_2 - 1);$$

$$b_4(y, z) = B^{(k)}[m_1 + 1, m_2] + \{B^{(k)}[m_1 + 1, m_2] - B^{(k)}[m_1, m_2]\} (y - m_1 - 1) + \{B^{(k)}[m_1 + 1, m_2 + 1] - B^{(k)}[m_1 + 1, m_2]\} (z - m_2).$$

Здесь  $B^{(k)}[m_1, m_2]$  – значение яркости изображения в  $(m_1, m_2)$ -м узле растра  $k$ -го экспериментального снимка.

Оценка координат  $\{y_{kR}, z_{kR}\}$  центральной проекции  $(n_1, n_2)$ -й точки объекта на плоскости  $k$ -го снимка связана с необходимостью идентификации условий съемки, т.е. определения ракурса снимка  $\{\alpha_k, \beta_k, \gamma_k\}$  и координат приемника  $\{L_k, y_k, z_k\}$  в лучевой системе (см. рис. 1). Такого рода процедуру удобно реализовать с помощью алгоритма визуализации геометрического образа цели, представленного в работе [5]. Алгоритм позволяет добиваться совмещения контурного изображения геометрического образа объекта с его ракурсным снимком, варьируя в интерактивном режиме параметры  $\{\alpha_k, \beta_k, \gamma_k\}$  и  $\{L_k, y_k, z_k\}$  (рис. 3). Точность идентификации условий съемки существенно возрастает в результате применения дополнительного этапа выделения границ и характерных перепадов яркости снимка на основе цифровых методов сегментации изображений [6–8].

В рамках задачи моделирования изображений 3D-объекта в режиме реального времени практический интерес представляет недоопределенная система линейных уравнений (1), в которой число неизвестных

Координаты точки наблюдения .....	- .68	12.77	9.87
Координаты центра картинной пл-ти ...	- .57	1.80	-.53
Alpha, Beta, Gamma .....	-90.15	46.50	1.00
Дальность и смещение центра .....	15.12	-.54	1.63

F5 Обновить контур F6 Масштаб и крен F7 Сдвиг F8 Поворот F9 Сохранить F10 Выход

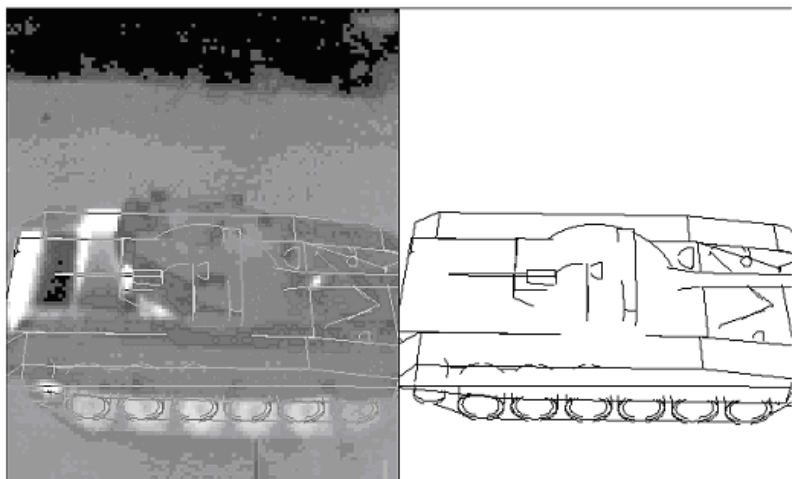


Рис. 3. Ракурсный снимок борта танка Т-72 и совмещенная с ним модель геометрического образа

$L_2 = (2N + M)$  больше (или равно) числа уравнений  $L_1 = \sum_{k=1}^K L_{1k}$ .

Здесь  $L_{1k} = \sum_{n=1}^N \delta_k[n]$  — число элементов поверхности цели, немаскируемых другими элементами по отношению к приемнику излучения для условий  $k$ -й съемки. В этом малоракурсном случае основные источники погрешностей реконструкции вектора-столбца

$$\vec{W} = \left\{ w_1[1], \dots, w_1[N], \text{Ln}(w_3[1]), \dots, \text{Ln}(w_3[N]), \text{Ln}(w_4[1]), \dots, \text{Ln}(w_4[M]) \right\}^T$$

оптических параметров объекта локации определяются ошибками измерений яркостей  $B^{(k)}[m_1, m_2]$  экспериментальных изображений, ошибками интерполяции значений яркостей  $B_k[n]$  на растр модельного изображения и ошибками линеаризации СУЭБ.

Очевидно, что в такой ситуации система уравнений (1) может быть несовместной. Ее точное алгебраическое решение, даже если бы оно существовало, не представляет большой ценности для реконструкции вектора  $\vec{W}$ . Наибольший интерес представляет решение, удовлетворяющее принципу реализуемости [9]. Согласно этому принципу в пространстве параметров  $\vec{W}$  ищется точка (решение), минимально уклоняющаяся от всех гиперплоскостей (экспериментальных изображений), заданных уравнениями (1).

Для упрощения последующих преобразований систему линейных уравнений запишем в векторной транскрипции. Для этого сформируем блочный вектор-столбец данных  $\vec{B} = \left( \vec{B}_1^T \mid \dots \mid \vec{B}_K^T \right)^T$  длиной  $L_1$  и разреженную проецирующую матрицу  $A = (A_1 \mid \dots \mid A_K)$  размером  $L_2 \times L_1$ . Вектор данных  $\vec{B}_k = \left( b_1^{(k)} \mid \dots \mid b_{L_{1k}}^{(k)} \right)^T$  имеет длину  $L_{1k}$ . Текущий блок  $A_k = \left( \vec{a}_1^{(k)} \mid \dots \mid \vec{a}_{L_{1k}}^{(k)} \right)$  проецирующей матрицы содержит  $L_2$  строк и  $L_{1k}$  столбцов.

Сформируем вектор-столбец  $\vec{B}_k$  длиной  $N$  по следующему правилу. Если индикаторная функция  $\delta_k[n] \neq 0$ , то  $b_n^{(k)} = b_k[n]$ , в противном случае — нуль. Аналогичным образом сформируем матрицу  $\tilde{A}_k$  размера  $L_2 \times N$ . Если индикаторная функция  $\delta_k[n] \neq 0$ , то  $n$ -й столбец  $\vec{a}_n^{(k)}$  матрицы содержит элементы  $a_k[n]$ , 1 и 1 соответственно в  $n$ -й,  $(N+n)$ -й и  $(2N+m_{kn})$ -й строках. Здесь согласно уравнению (1)  $m_{kn} = [\theta_k[n]/\Delta\theta] + 1$ , квадратные скобки означают целую часть числа, а  $\Delta\theta$  и  $\theta_k[n]$  — интервал квантования нормированной индикатрисы излучения и угол наблюдения facets  $\Delta S[n_1, n_2]$  с  $k$ -го ракурса. Остальные элементы матрицы  $\tilde{A}_k$  равны нулю. Вектор данных  $\vec{B}_k$  и проецирующую матрицу  $A_k$  получаем из вектора  $\vec{B}_k$  и матрицы  $\tilde{A}_k$  вычеркиванием соответственно всех нулевых элементов и столбцов. Ясно, что  $k$ -му экспериментальному изображению цели соответствует подсистема линейных уравнений  $A_k^T \vec{W} \approx \vec{B}_k$ , а  $(n_1, n_2)$ -му пикселю этого изображения — уравнение  $\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} \approx b_n^{(k)}$  при условии, что  $\delta_k[n] \neq 0$ .

В принятых обозначениях принцип реализуемости удобно формулировать в терминах задачи квадратичного программирования [10]:

$$\vec{W}_{\text{opt}} = \arg \min_{\vec{W}} \left\| A^T \vec{W} - \vec{B} \right\|^2.$$

Оптимальное решение этой задачи имеет вид  $\vec{W}_{\text{opt}} = A^\# \vec{B}$ . Однако в силу огромного размера матрицы  $A^T$  ее псевдообращение  $A^\# = (AA^T)^{-1}A$  с помощью алгоритма Ланцоша становится нецелесообразным по критерию вычислительных затрат.

Согласно принципу реализуемости систему линейных уравнений (1) рационально заменить системой линейных неравенств (СЛН) [3, 9]

$$\begin{aligned} |a_k[n]w_1[n] + Ln(w_3[n]) + Ln(w_4[m_{kn}]) - b_k[n]| &\leq \varepsilon_k[n]; \\ n = 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, K; \quad m_{kn} = 1, \dots, M. \end{aligned}$$

Иными словами, в пространстве оптических параметров цели ищется точка  $\vec{W}$ , лежащая внутри  $\varepsilon$ -полос всех гиперплоскостей экспериментальных изображений объекта локации. Здесь допуск

$\varepsilon_k[n] = \varepsilon |b_k[n]|$  удобно трактовать, как ошибку регистрации яркости  $B_k[n]$ , а  $\varepsilon$  – как заданную относительную погрешность решения системы уравнений (1).

В дополнении к вектору данных  $\vec{B}_k$  рассмотрим вектор-столбец допустимых ошибок реконструкции  $\vec{E}_k = \left( e_1^{(k)} \mid \dots \mid e_{L_{1k}}^{(k)} \right)^T$  длиной  $L_{1k}$ .

Для этого сформируем вектор-столбец  $\vec{\tilde{E}}_k$  длиной  $N$  по следующему правилу. Если индикаторная функция  $\delta_k[n] \neq 0$ , то  $e_n^{(k)} = \varepsilon_k[n]$ , в противном случае – нуль. Вектор ошибок  $\vec{E}_k$  получаем из вектора  $\vec{\tilde{E}}_k$ , вычеркивая нулевые элементы. Тогда  $k$ -му экспериментальному изображению цели соответствует подсистема неравенств

$$A_k^T \vec{W} - \vec{B}_k - \vec{E}_k \leq 0; \quad -A_k^T \vec{W} + \vec{B}_k - \vec{E}_k \leq 0,$$

а  $(n_1, n_2)$ -му пикселю этого изображения – неравенства

$$\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} - b_n^{(k)} - e_n^{(k)} \leq 0; \quad -\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} + b_n^{(k)} - e_n^{(k)} \leq 0. \quad (3)$$

Объединяя подсистемы линейных неравенств в одну систему, для всех снимков  $k = 1, \dots, K$  окончательно получаем

$$A_\oplus^T \vec{W} + \vec{B}_\oplus \leq 0, \quad (4)$$

где  $A_\oplus = (A_1 \mid -A_1 \mid \dots \mid A_K \mid -A_K)$  – расширенная проецирующая матрица размером  $L_2 \times 2L_1$ ;

$$B_\oplus = - \left( \vec{E}_1^T + \vec{B}_1^T \mid \vec{E}_1^T - \vec{B}_1^T \mid \dots \mid \vec{E}_K^T + \vec{B}_K^T \mid \vec{E}_K^T - \vec{B}_K^T \right)^T$$

– расширенный блочный вектор-столбец данных длиной  $2L_1$ .

Стандартную СЛН (4) решают методом последовательных приближений с помощью эффективного в вычислительном отношении алгоритма Качмажа [9]:

$$\vec{W}[i+1] = \vec{W}[i] - \lambda \delta_j^{(k)} \left( \vec{W}[i] \right) \frac{\vec{W}^T[i] \vec{a}_n^{(k)} - d_j^{(k)}}{\left\| \vec{a}_n^{(k)} \right\|} \cdot \frac{\vec{a}_n^{(k)}}{\left\| \vec{a}_n^{(k)} \right\|}; \quad (5)$$

$$d_j^{(k)} = \begin{cases} b_n^{(k)} - e_n^{(k)}, j = 2n - 1; \\ b_n^{(k)} + e_n^{(k)}, j = 2n; \end{cases} \quad n = 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, K,$$

где  $i$  – номер итерации обучения вектора  $\vec{W}$ . Алгоритм (5) последовательного учета столбцов  $\vec{a}_n^{(k)}$  проецирующей матрицы  $A$  имеет наглядный геометрический смысл (рис. 4). В пространстве  $\vec{W} \in R^{L_2}$  оптических параметров объекта локации орт  $\vec{a}_n^{(k)} / \left\| \vec{a}_n^{(k)} \right\|$  задает направление коррекции вектора  $\vec{W}[i]$  по положительной нормали к гиперплоскости  $\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} = b_n^{(k)}$  обучающего примера  $\left\{ \vec{a}_n^{(k)}; b_n^{(k)} \right\}$ , соот-



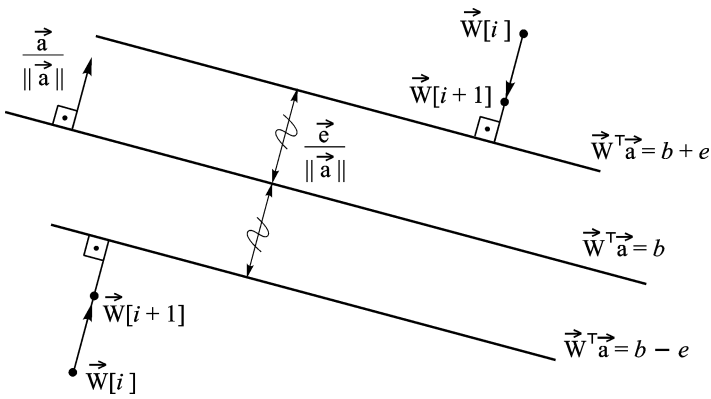


Рис. 4. Алгоритм ART2 реконструкции оптических параметров цели

ветствующего  $(n_1, n_2)$ -му пикселю на  $k$ -м снимке при условии, что  $\delta_k[n] \neq 0$ . Эта гиперплоскость является осью симметрии полосы  $\varepsilon$  допустимых ошибок  $\pm e_n^{(k)}$  решения СЛН для текущего примера. Скаляры  $(\vec{W}^T[i] \vec{a}_n^{(k)} - d_j^{(k)}) / \|\vec{a}_n^{(k)}\|$ ,  $j = (2n - 1), 2n$ , определяют евклидовы расстояния от текущей точки с радиусом-вектором  $\vec{W}[i]$  до границ полосы  $\varepsilon$  в виде гиперплоскостей  $\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} = b_n^{(k)} - e_n^{(k)}$  и  $\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} = b_n^{(k)} + e_n^{(k)}$ . Расстояния измеряют по нормальям к граничным гиперплоскостям. Функция ошибок

$$\delta_j^{(k)}(\vec{W}[i]) = \begin{cases} 1, & \text{если } (-1)^j (\vec{W}^T[i] \vec{a}_n^{(k)} - d_j^{(k)}) \geq 0, \\ 0, & \text{если } (-1)^j (\vec{W}^T[i] \vec{a}_n^{(k)} - d_j^{(k)}) < 0, \end{cases}$$

реализует принцип подкрепления–наказания. Если точка  $\vec{W}[i]$  находится за пределами полосы  $\varepsilon$ , то функция  $\delta_j^{(k)}(\vec{W}[i]) = 1$  и оптические параметры корректируют (фаза наказания) так, чтобы вектор  $\vec{W}[i+1]$  приблизился к границам или попал внутрь полосы допустимых ошибок решения СЛН. Если точка с радиусом-вектором  $\vec{W}[i]$  находится внутри полосы  $\varepsilon$ , то функция  $\delta_j^{(k)}(\vec{W}[i]) = 0$  и  $\vec{W}[i+1] = \vec{W}[i]$ , т.е. оптические параметры цели не корректируют (фаза подкрепления).

Существенной проблемой является обеспечение условий сходимости алгоритма Качмажа к компромиссному решению несовместной СЛН (4). Алгоритм (5) регуляризуют вследствие введения параметра релаксации  $\mu \leq \lambda \leq 2 - \mu$  [3]. Здесь  $\mu$  – положительная достаточно малая постоянная, которая задает значение шага коррекции вектора  $\vec{W}[i]$  в долях расстояний от границ полосы  $\varepsilon$ . Очевидно, что для значения  $\lambda = 1$  последующее приближение  $\vec{W}[i+1]$  вектора оптических параметров цели представляет собой ортогональную проекцию

вектора  $\vec{W}[i]$  на граничную гиперплоскость полосы  $\varepsilon$ . Значению  $\lambda = 2$  соответствует зеркальное отражение относительно граничной гиперплоскости.

Дополнительный механизм формирования устойчивой быстрой модели тепловизионного изображения состоит в снижении числа  $L_2$  реконструируемых оптических параметров объекта локации. В соответствии со структурой разреженной проецирующей матрицы  $A$  алгоритм (5) за одну итерацию обучения корректирует три компоненты вектора  $\vec{W}$ . Это  $w_1[n]$  — полусферический коэффициент

отражения и  $w_3[n]$  — яркость, излученную  $(n_1, n_2)$ -м факетом цели в направлении его нормали. Третья компонента  $w_4[m_{kn}]$  представляет собой значение нормированной индикатрисы излучения факета, наблюдаемого под углом  $\theta_k[n] \approx (m_{kn} - 1) \Delta\theta$ . Важно отметить, что первые два параметра ( $w_1[n]$  и  $w_3[n]$ ) зависят от температуры  $T_S[n]$  факета [2]. Их число  $2N$  можно сократить за счет наличия на поверхности объекта изотермических зон. Идентификацию областей равных температур выполняют на этапе сегментации экспериментальных изображений цели. В качестве примера на рис. 5 представлена схема распределения областей равных температур по поверхности танка (вид сверху). Пусть  $p_l$  — это  $l$ -я изотермическая зона объекта локации ( $l = \bar{1}; P$ ), а  $P$  — их число. Тогда алгоритм обучения (5) рационально дополнить ограничениями в форме равенств  $w_1[n] = w_1[l]$  и  $w_3[n] = w_3[l]$ , если  $(n_1, n_2)$ -й факет принадлежит области  $p_l$ . В результате число степеней свободы модельного изображения цели сокращают до порядка нескольких десятков  $\tilde{L}_2 = 2P + M$ , что сопоставимо с числом экспериментальных снимков  $K$ .

Алгоритм Качмажа (5) функционирует в последовательном режиме обучения. В этом режиме вектор оптических параметров  $\vec{W}$  корректируют для очередной обучающей пары  $\{\vec{a}_n^{(k)}; b_n^{(k)}\}$ . Циклический перебор экспериментальных данных  $j = (i)_{2L_1}$  моделирует принцип “повторение — мать учения”. Здесь функция  $(u)_v$  означает остаток от деления  $u$  на  $v$ . Цикл обучения, за который перебирают все обучающие пары, называют эпохой. В итоге объем вычислительных затрат за одну эпоху обучения пропорционален  $3 \times 2L_1$ . Известно [3], что

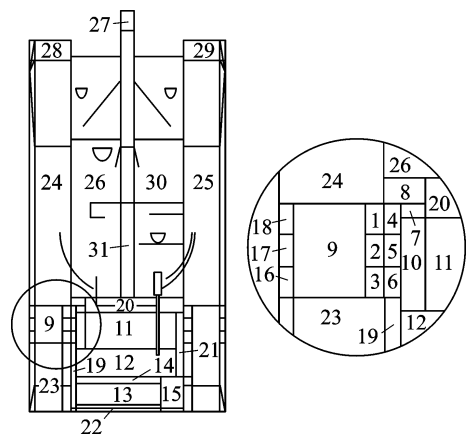


Рис. 5. Схема распределения изотермических зон по поверхности танка Т-72:

$a$  — вид сверху;  $b$  — участок поверхности в увеличенном масштабе

порядок перебора примеров в пределах эпохи существенно влияет на скорость сходимости алгоритма (5). Эффективной является последовательность, в которой соседние акты проецирования в наибольшей степени независимы [11]. Иными словами, в пространстве  $W$  гиперплоскости последовательных обучающих пар должны быть ортогональными. Этому требованию в алгоритме (5) удовлетворяет выбор, например, соседних пикселей  $k$ -го экспериментального снимка. В этом случае  $\left\{ \vec{a}_n^{(k)} \right\}^T \vec{a}_{n+1}^{(k)} \equiv 0$ . Таким образом, рациональная последовательность перебора примеров содержит три цикла итераций, а именно — внешний цикл по ракурсам  $k = 1, \dots, K$  экспериментальных снимков цели, средний цикл по изотермическим зонам  $l = 1, \dots, P$  и внутренний по пикселям  $n = 1, \dots, N$  фиксированного снимка при условии, что  $\delta_k[n] \neq 0$  и  $(n_1, n_2)$ -й фацет принадлежит области  $p_l$  равных температур. Альтернативный вариант состоит в случайном выборе пикселей фиксированного снимка.

Третья проблема состоит в рациональном выборе начального приближения  $\vec{W}[0]$  для вектора оптических параметров объекта локации. Хорошими начальными значениями неизвестных  $w_1[l]$ ,  $w_3[l]$ , ( $l = \overline{1; P}$ ) и  $w_4[m]$ , ( $m = \overline{1; M}$ ) являются оценки, полученные в случае диффузного, серого излучателя. В этой модели  $M = 1$ ,  $w_4[m] \equiv 1$ , а теплофизические параметры  $w_1[l]$  и  $w_3[l]$  удовлетворяют линейной СУЭБ [2]

$$B_k^{(R)}[n]w_1[l] + w_3[l] \approx B_k[n] \quad (n = 1, \dots, N; \\ k = 1, \dots, K; \quad l = 1, \dots, P)$$

при условии, что  $\delta_k[n] \neq 0$  и  $(n_1, n_2)$ -й фацет принадлежит  $p_l$  области равных температур. Из этой системы с учетом ограничения  $0 \leq w_1[l] \leq 1$  непосредственно следуют оценки для начальных значений параметров

$$w_1^{(0)}[l] = 1/2; \quad w_3^{(0)}[l] = \frac{1}{q_l} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \delta_k[n] \vartheta_l[n] \left( B_k[n] - B_k^{(R)}[n] / 2 \right); \\ q_l = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \delta_k[n] \vartheta_l[n]; \quad l = 1, \dots, P; \quad w_4[m] = 1; \quad m = 1, \dots, M.$$

Здесь  $\vartheta_l[n]$  — индикаторная функция, равная единице, если  $(n_1, n_2)$ -й фацет принадлежит изотермической зоне  $p_l$ , и нулю в противном случае.

Второй алгоритм ортогонального проецирования основан на решении системы двухсторонних неравенств [9, 12]

$$-e_n^{(k)} \leq \vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} - b_n^{(k)} \leq e_n^{(k)}; \quad n = 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, K).$$

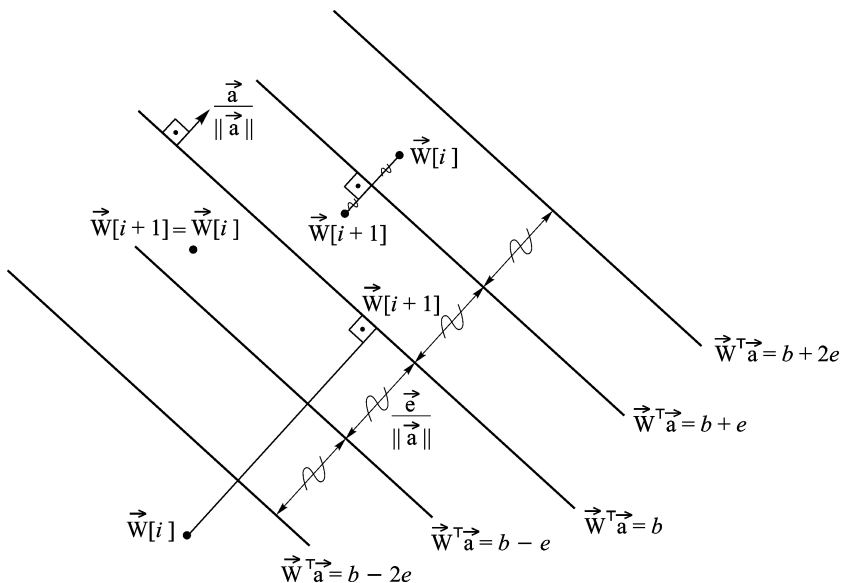


Рис. 6. Алгоритм ART3 реконструкции оптических параметров цели

В этом алгоритме гиперплоскость  $\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} = b_n^{(k)}$  каждого обучающего примера ограничена двумя зонами. Внутренняя полоса допустимых ошибок  $\pm e_n^{(k)}$  имеет ширину  $2e_n^{(k)} / \|\vec{a}_n^{(k)}\|$ . Ширина внешней зоны в 2 раза больше (рис. 6). Реконструкцию вектора  $\vec{W}$  оптических параметров цели выполняют по следующим правилам:

если текущее приближение параметров лежит на внутренней полосе допустимых ошибок, то это приближение не корректируют, т.е.

$$\vec{W}[i+1] = \vec{W}[i], \quad \text{если} \quad -e_n^{(k)} \leq \vec{W}^T[i] \vec{a}_n^{(k)} - b_n^{(k)} \leq e_n^{(k)};$$

если текущее приближение параметров лежит за пределами внутренней зоны, но на внешней полосе, то это приближение корректируют с помощью зеркального отражения относительно ближайшей границы внутренней зоны, т.е.

$$\vec{W}[i+1] = \vec{W}[i] - \Delta_n^{(k)} \left( \vec{W}[i] \right) \vec{a}_n^{(k)} / \|\vec{a}_n^{(k)}\|; \quad (6)$$

$$\Delta_n^{(k)} \left( \vec{W}[i] \right) = \begin{cases} -2 \frac{D_n^{(k)} \left( \vec{W}[i] \right) + e_n^{(k)}}{\|\vec{a}_n^{(k)}\|}, & \text{если } -2e_n^{(k)} < D_n^{(k)} \left( \vec{W}[i] \right) < -e_n^{(k)}, \\ 2 \frac{D_n^{(k)} \left( \vec{W}[i] \right) - e_n^{(k)}}{\|\vec{a}_n^{(k)}\|}, & \text{если } e_n^{(k)} < D_n^{(k)} \left( \vec{W}[i] \right) < 2e_n^{(k)}, \end{cases}$$

где  $D_n^{(k)} \left( \vec{W} \right) = \vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} - b_n^{(k)}$  – дискриминантная функция текущего обучающего примера  $\left\{ \vec{a}_n^{(k)}; b_n^{(k)} \right\}$ ;

если текущее приближение параметров лежит за пределами внешней зоны удвоенных допустимых ошибок, то это приближение корректируют с помощью ортогонального проецирования (6) на гиперплоскость  $\vec{W}^T \vec{a}_n^{(k)} = b_n^{(k)}$  текущего обучающего примера, т.е.

$$\Delta_n^{(k)}(\vec{W}[i]) = \begin{cases} -2 \frac{D_n^{(k)}(\vec{W}[i])}{\|\vec{a}_n^{(k)}\|}, & \text{если } D_n^{(k)}(\vec{W}[i]) < -2e_n^{(k)}, \\ 2 \frac{D_n^{(k)}(\vec{W}[i])}{\|\vec{a}_n^{(k)}\|}, & \text{если } D_n^{(k)}(\vec{W}[i]) > 2e_n^{(k)}. \end{cases}$$

В вычислительном эксперименте исследовались ошибки восстановления изображений танка Т-72 по относительно малому набору  $K$  его ракурсных снимков. Критерием качества являлась относительная среднеквадратическая ошибка (СКО)

$$\sigma_0 = \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N (B_R[n] - B_I[n])^2}{\sum_{n=1}^N B_I^2[n]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

между имитационной цифровой моделью  $\{B_I[n]\}_{n=1}^N$  тепловизионного изображения цели и его реконструкцией  $\{B_R[n]\}_{n=1}^N$ .

Модельные изображения  $\{B_I[n]\}_{n=1}^N$  танка представляли собой решения исходной СУЭБ для заданного вектора  $\vec{W}_I$  оптических параметров объекта локации [2]. Имитационное цифровое моделирование выполнялось для ракурса  $k = 0$ , соответствующего виду сверху. Размер синтезированных изображений составлял  $N = 200 \times 200$  пикселей с глубиной цвета — 8 бит (в оттенках серого). Спектральную и температурную зависимости степени черноты в направлении нормали  $\varepsilon_{\lambda N}(T_S)$  аппроксимировали моделью Хагена–Рубенса [1] для металлической поверхности цели. Расчеты проводили для диапазона длин волн 7...14 мкм. Распределение температуры facets на поверхности танка (см. рис. 5) задавали значениями, представленными в табл. 1 для приращений температуры в каждой из  $P = 31$  изотермических зон по отношению к температуре внешней среды для различных режимов работы двигателя. В качестве нормированной индикатрисы степени черноты  $\rho(\theta)$  анализировали диффузную и направленную модели [1] с параметрами, представленными в табл. 2.

Восстановленные изображения  $\{B_R[n]\}_{n=1}^N$  танка представляли собой результат решения исходной СУЭБ для вектора  $\vec{W}_R$  оптических параметров цели, реконструированных с помощью проекционных алгоритмов Качмажа. В вычислительном эксперименте исследовались

## Температуры изотермических зон танка Т-72

Зона №	Пасмурно (14°С)		Солнечно (30–35 °С)		Осадки (10–15 °С)	
	После пробега	После 40 мин остывания	После пробега	После 40 мин остывания	После пробега	После 40 мин остывания
1	162	55	182	50	200	70
2	161	54	181	49	195	65
3	106	56	126	52	170	60
4	106	56	126	52	170	60
5	76	48	70	61	80	64
6	74	47	68	59	78	63
7	26	23	28	24	32	26
8	20	17	23	20	26	21
9	15	13	20	17	20	16
10	11	10	13	11	15	12
11	5	4	7	6	7	6
12	0	0	3	3	4	3
13	43	37	45	39	48	38
14	9	8	15	13	11	9
15	9	8	15	13	11	9
16	26	23	24	21	29	23
17	16	14	15	13	18	14
18	8	7	7	6	13	10
19	7	6	10	9	10	8
20	5	4	8	7	7	6
21	8	7	12	10	11	9
22	19	17	17	15	23	18
23–31	0	0	12	12	0	0

зависимости СКО (7) от вида алгоритма АРТ2 – (5) и АРТ3 – (6), формы нормированной индикатрисы степени черноты  $\rho(\theta)$  и числа  $K$  ракурсных снимков. Результаты анализа сведены в табл. 3. В качестве примера на рис. 7 приведены модельное изображение танка Т-72 и изображение, восстановленное с помощью алгоритма АРТ3 для направленной нормированной индикатрисы степени черноты и параметров реконструкции:  $K = 16$ ,  $M = 9$ ,  $\varepsilon = 0,1$ .

Анализ погрешности восстановления тепловизионного изображения объекта локации по относительно небольшому набору его ракурсных снимков с помощью алгебраических алгоритмов реконструктивной вычислительной томографии позволяет сделать следующие выводы.

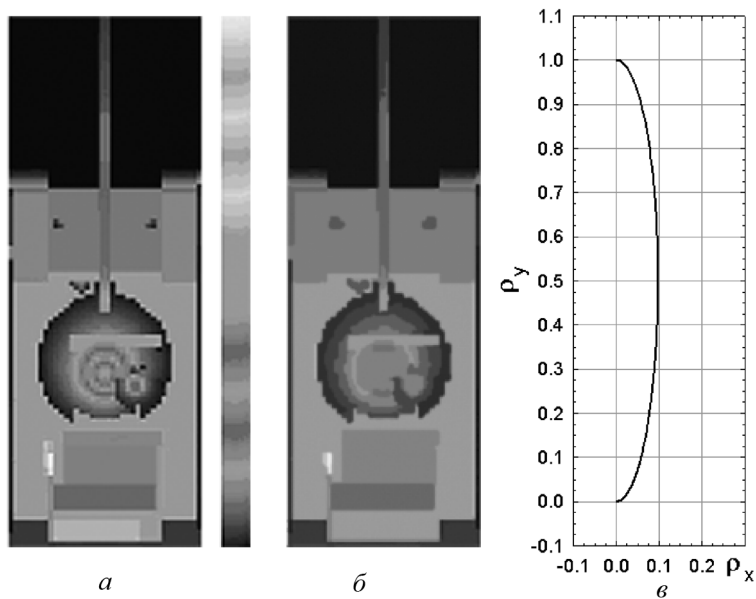


Рис. 7. Модельное изображение танка Т-72 (а), восстановленное изображение танка (б); направленная нормированная индикатриса степени черноты (в)

Таблица 2

Параметры модели нормированной индикатрисы излучения

Модель	Параметры			
	$k_{B1}$	$k_{R1}$	$k_{B2}$	$k_{R2}$
Диффузная	0,93	0,94	0,07	0,65
Направленная	0,99	0,19	0,01	0,24

Проекционные алгоритмы Качмажа, сформулированные для линеаризованной системы уравнений энергетического баланса, реконструируют с достаточной для практики точностью оптические параметры 3D-объекта по относительно небольшому набору его ракурсных снимков.

Для диффузной индикатрисы коэффициента теплового излучения цели число ракурсных снимков, необходимых для восстановления тепловизионного изображения цели с относительной погрешностью 10 %, в 1,5–2 раза меньше, чем в случае направленной индикатрисы.

Проекционный алгоритм Качмажа ART2 требует порядка 10–15 ракурсных снимков 3D-объекта для восстановления его тепловизионного изображения на любой заданный ракурс с относительной погрешностью 10 % в случае диффузной индикатрисы коэффициента теплового излучения цели и порядка 20–30 снимков — в случае направленной индикатрисы.

### СКО восстановленного изображения танка Т-72 по отношению к модельному изображению

Число ракурсных снимков $K$	Диффузная индикатриса		Направленная индикатриса	
	ART2	ART3	ART2	ART3
8	26,2	20,0	36,5	25,0
16	10,1	9,3	15,3	12,8
24	9,2	8,8	10,7	10,2
32	8,8	8,2	9,5	10,0

При прочих равных условиях проекционный алгоритм Качмажа ART3 требует на 30–50% меньшего числа ракурсных снимков 3D-объекта для восстановления его тепловизионного изображения, чем алгоритм ART2.

Объем вычислительных затрат при цифровом моделировании тепловизионного изображения 3D-объекта с помощью решения СУЭБ и реконструированных оптических параметров цели сокращается как минимум на порядок по сравнению с имитационной моделью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л а б у н е ц Л. В., П о п о в А. В. Математическое моделирование индикатрисы спектрального коэффициента направленного теплового излучения покрытий объектов локации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2009. – № 2. – С. 50–61.
2. Л а б у н е ц Л. В., П о п о в А. В. Математическое моделирование тепловизионного изображения 3D-объекта в ИК координаторе цели // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2010. – № 2. – С. 35–47.
3. Х е р м а н Г. Т. Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии. – М.: Мир, 1983. – 352 с.
4. К р а с о в с к и й А. А. Аппроксимация функций многих аргументов в системах цифрового моделирования // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1989. – № 3. – С. 3–11.
5. Л а б у н е ц Л. В. Цифровые модели изображений целей и реализаций сигналов в оптических локационных системах: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 216 с.
6. Б а к у т П. А., К о л м о г о р о в Г. С., В а р н о в и ц к и й И. Э. Сегментация изображений: Методы пороговой обработки / Применение методов сегментации изображений в автономных системах обнаружения, распознавания и сопровождения движущихся целей (спец. вып.); Под ред. П.А. Бакута // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 10. – С. 8–24.
7. Е ф и м о в В. М., Р е з н и к А. Л. Алгоритмы идентификации фрагментов двух изображений, инвариантные к повороту // Автотметрия. – 1984. – № 5. – С. 61–67.
8. S h a p i r o L. S., Z i s s e r m a n A., B r a d y M. Motion from point matches using affine epipolar geometry: Technical Report OUEL. – Oxford: University, 1994. – 53 p.



9. Ц е н с о р Я. Методы реконструкции изображений, основанные на разложении в конечные ряды // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 3. – С. 148–160.
10. L e n t A., C e n s o r Y. Extension of Hildreth's row-action method for quadratic programming // SIAM Journal Control and optimization. – 1980. – Vol. 18. – P. 444–454.
11. H e r m a n G. T. Algebraic reconstruction techniques can be made computationally efficient // IEEE Transactions on medical imaging. – 1993. – Vol. 12. No. 3. – P. 600–609.
12. H e r m a n G. T. A relaxation for reconstructing objects from noisy X-rays // Mathematical Programming, – 1975. – Vol. 8. – P. 1–19.

Статья поступила в редакцию 6.09.2010

Леонид Витальевич Лабунец родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, профессор кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Зав. кафедрой “Информационные технологии фондового рынка” Российского Нового Университета. Автор свыше 100 научных работ в области цифрового моделирования входных сигналов локационных систем; статистического моделирования; статистической радиотехники; теории распознавания образов; нейросетевых и нечетко-множественных методов обработки информации; экспертных систем, генетических алгоритмов.

L.V. Labunets (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. D. Sc. (Eng.), senior researcher, professor of "Autonomous Information and Control Systems" department of the Bauman Moscow State Technical University. Head of "Information Technologies of Fund Market" department of the Russian New University. Author of more than 100 publications in the field of digital simulation of input signals of radar systems, statistical simulation, statistical radio engineering, theory of image identification, neuronet and fuzzy logic methods of data processing, expert systems, genetic algorithms.

Александр Владимирович Попов родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Аспирант кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: цифровое моделирование входных сигналов локационных систем; исследование отражательных характеристик объектов; статистическая радиотехника; эффективные вычислительные алгоритмы.

A.V. Popov (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Post-graduate of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Field of scientific interests includes digital simulation of input signals of radar systems, study of reflective characteristics of objects, statistical radio engineering, efficient computational algorithms.