

Л. В. Лабунец, А. В. Попов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ 3D- ОБЪЕКТА В ИК-КООРДИНАТОРЕ ЦЕЛИ

Предложена математическая модель тепловизионного изображения антропогенного объекта локации, основанная на системе уравнений энергетического баланса. Структура модели обеспечивает разумный компромисс между относительно низкими вычислительными затратами имитационного цифрового моделирования входных сигналов ИК координаторов цели и адекватность модели экспериментальным изображениям.

Формирование представительной базы данных тепловизионных изображений 3D-объектов является одним из наиболее трудоемких этапов проектирования ИК локационных систем. Эффективное решение этой задачи основано на рациональном сочетании экспериментальных измерений и математического моделирования изображений целей. Математические модели тепловизионных изображений позволяют создавать аппаратно – программные комплексы имитационного цифрового моделирования входных сигналов ИК координаторов. Основное требование, предъявляемое к таким комплексам, - это адекватное воспроизведение в вычислительном эксперименте физических закономерностей отражения и собственного излучения лучистой энергии объектом локации. При моделировании такого рода процессов существенное значение имеет теплообмен между различными участками поверхности цели. Синтез изображений 3D- объектов, в этом случае, опирается на метод энергетического сальдо [1].

Положение пикселей на изображении цели с заданного ракурса удобно задавать с помощью следующих систем координат (рис. 1):

- $O_t X_t Y_t Z_t$ - целевая система координат (ЦСК), связанная с условным центром цели O_t . Ориентацию целевой системы удобно выбрать такой, чтобы координатные плоскости $X_t O_t Y_t$, $X_t O_t Z_t$ и $Z_t O_t Y_t$ являлись плоскостями тангажа, курса и крена соответственно;
- $O_t X_0 Y_0 Z_0$ - лучевая система координат (ЛСК), ось $O_t X_0$ которой направлена на приемное устройство регистрирующей системы. ЛСК может быть получена из целе-

вой при ее последовательных поворотах на углы α_0 и β_0 вокруг осей $O_t Y_t$ и $O_t Z_k$. Наклонная дальность L_0 отсчитывается вдоль оси $O_t X_0$ от условного центра объекта до приемника. Картинная плоскость $Y_0 O_t Z_0$ параллельна плоскости изображения цели;

- $O_{0R} X_{0R} Y_{0R} Z_{0R}$ - система координат приемника (СКП) может быть получена из лучевой ее поворотом на угол γ_0 вокруг оси $O_t X_0$ и последующим параллельным переносом в точку O_{0R} с координатами $\{L_0, y_0, z_0\}$ в ЛСК. Начало координат СКП задает положение центра проецирования объекта на плоскость регистрируемого изображения. Ось $O_{0R} X_{0R}$ задает положение оси приемной оптики регистрирующей системы.

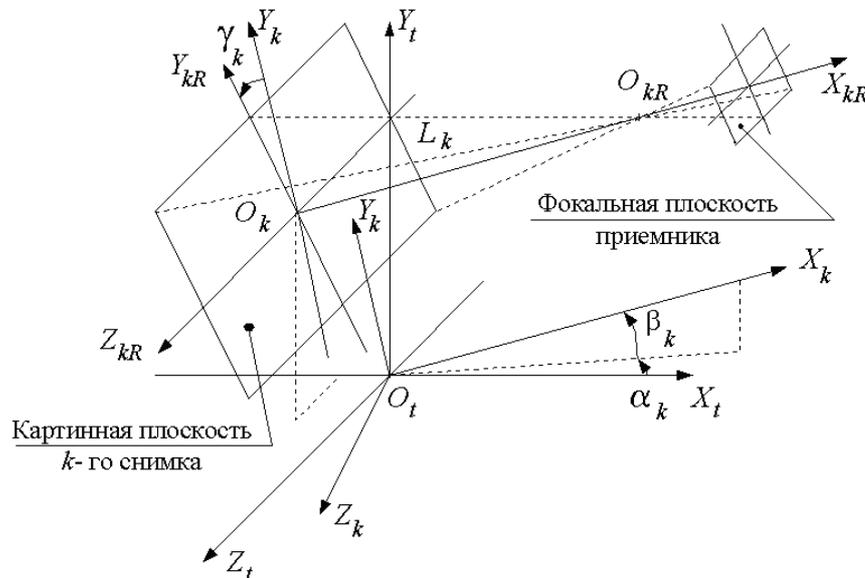


Рис. 1. Системы координат k -ой ракурсной съемки.

Положение пикселей синтезируемого изображения задают ортогональным растром в плоскости $Y_{0R} O_{0R} Z_{0R}$ с координатами узлов $(n_1 \Delta_Y, n_2 \Delta_Z)$, где Δ_Y и Δ_Z интервалы дискретизации по осям Y и Z . Синтезируемое изображение цели соответствует заданному ракурсу $\{\alpha_0, \beta_0, \gamma_0\}$. Пространственную дискретизацию поверхности 3D-объекта удобно задавать множеством линий визирования, проходящих через текущие пиксели изображения и центр проецирования в точке O_{0R} с координатами $\{L_0, y_0, z_0\}$ в ЛСК.

Теплообмен излучением между элементами поверхности цели $\Delta S [n_1, n_2]$ рассмотрим в частном случае, когда все площадки являются диффузными и серыми излучателями. По определению диффузно - серой поверхности [1] ее направленная спектральная степень черноты не зависит ни от полярного угла θ направления наблюдения, ни от длины волны излучения λ , но зависит от температуры поверхности T_s .

В пределах элементов поверхности $\Delta S [n_1, n_2]$ примем следующие допущения: температура постоянна; все излучение испускается и отражается диффузно; падающий и, следовательно, отраженный потоки излучения постоянны. При таких допущениях отраженное излучение каждого элемента поверхности цели имеет такой же диффузный и равномерно распределенный по направлениям наблюдения характер, как и собственное излучение. Следовательно, отраженное и собственное излучение можно объединить в одно *эффективное излучение*, испускаемое поверхностью объекта. Когда поверхность является одновременно диффузным излучателем и диффузным отражателем, интенсивность эффективного излучения не зависит от направления наблюдения. Это позволяет применить для записи уравнений энергетического баланса метод сальдо [1, с. 270].

В общем случае яркость эффективного излучения, создаваемого (n_1, n_2) - м элементом поверхности объекта $\Delta S [n_1, n_2]$ в направлении синтезируемого изображения, представляет собой сумму испускаемой и отражаемой частей

$$B_{0\lambda} [n_1, n_2] = B_{0\lambda}^{(E)} [n_1, n_2] + B_{0\lambda}^{(R)} [n_1, n_2],$$

где индексы (E) и (R) - означают испускаемое и отражаемое излучение. Тогда интенсивность (n_1, n_2) - ого пикселя синтезируемого изображения пропорциональна потоку энергии, излучаемой элементом поверхности $\Delta S [n_1, n_2]$ объекта во входной зрачок приемной оптики регистрирующей системы

$$I_0 [n_1, n_2] = \Delta \omega_0 [n_1, n_2] \Delta S [n_1, n_2] \cos \theta_0 [n_1, n_2] \times \\ \times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_{0\lambda} [n_1, n_2] R(\lambda) d\lambda; \quad (n_1 = 1, \dots, N_1; n_2 = 1, \dots, N_2). \quad (1)$$

Здесь $\Delta \omega_0 [n_1, n_2]$ - телесный угол, в пределах которого (n_1, n_2) - ой элемент поверхности $\Delta S [n_1, n_2]$ испускает излучение во входной зрачок приемной оптики диаметром D_R ; $\theta_0 [n_1, n_2]$ - угол между вектором нормали (n_1, n_2) - ого элемента поверхности $\Delta S [n_1, n_2]$ и линией визирования: (n_1, n_2) - ой пиксель синтезируемого изображения -

(n_1, n_2) - ой элемент поверхности цели; $R(\lambda)$ - относительная чувствительность приемной системы в спектральном диапазоне $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$; $N_1 \times N_2$ - размер синтезируемого изображения объекта.

С учетом соотношений $\Delta_Y = \Omega_Y f / N_1$ и $\Delta_Z = \Omega_Z f / N_2$, где f - фокусное расстояние приемной оптики, а Ω_Y и Ω_Z - углы поля зрения приемной системы в радианах, нетрудно получить

$$\Delta \omega_0[n_1, n_2] \Delta S[n_1, n_2] \cos \theta_0[n_1, n_2] = \Delta \omega_R[n_1, n_2] \pi D_R^2 / 4;$$

$$\Delta \omega_R[n_1, n_2] = \Omega_Y \Omega_Z (N_1 N_2)^3 / (N_1^2 N_2^2 + n_1^2 N_2^2 \Omega_Y^2 + n_2^2 N_1^2 \Omega_Z^2)^2.$$

Раскрывая формулу (1) с помощью последних равенств нетрудно видеть, что с точностью до постоянного множителя $\pi D_R^2 / 4$ интенсивность (n_1, n_2) - ого пикселя синтезируемого изображения равна интегральной яркости эффективного излучения $B_0[n_1, n_2]$, создаваемого (n_1, n_2) - м элементом поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ объекта в спектральном диапазоне $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$

$$I_0[n_1, n_2] = \Delta \omega_R[n_1, n_2] \cdot B_0[n_1, n_2]; \quad B_0[n_1, n_2] = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_{0\lambda}[n_1, n_2] \cdot R(\lambda) d\lambda.$$

В соответствии с результатами работы [2] яркость *испускаемой* части излучения цели может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} B_0^{(E)}[n_1, n_2] &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_{0\lambda}^{(E)}[n_1, n_2] \cdot R(\lambda) d\lambda = \\ &= \delta_0[n_1, n_2] \rho \left\{ \theta_0[n_1, n_2] \mid \vec{k}[n_1, n_2] \right\} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_{\lambda N}(T_S[n_1, n_2]) i_{\lambda B}(T_S[n_1, n_2]) R(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\delta_0[n_1, n_2]$ - индикаторная функция, равная единице, если линия визирования: точка O_{0R} - (n_1, n_2) - ой пиксель синтезируемого изображения пересекается с поверхностью объекта, и ноль в противном случае; $\varepsilon_{\lambda N}(T_S[n_1, n_2])$ и $\rho \left\{ \theta_0[n_1, n_2] \mid \vec{k}[n_1, n_2] \right\}$ - спектральная степень черноты в направлении нормали элемента поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ и его нормированная индикатриса излучения, аппрокси-

мированная моделью из работы [2]. Форму индикатрисы задает вектор параметров $\vec{k} = \{k_{B1}, k_{R1}, k_{B2}, k_{R2}\}$.

В приближении серого излучателя степень черноты в направлении нормали элемента поверхности не зависит от длины волны $\epsilon_{\lambda N}(T_S[n_1, n_2]) = \epsilon_N(T_S[n_1, n_2])$, что позволяет вынести ее за знак интеграла в правой части последнего равенства. Долю излучения абсолютно черного тела, испускаемую в спектральном диапазоне $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, удобно аппроксимировать выражением, полученным в работе [3]

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} i_{\lambda B}(T_S) R(\lambda) d\lambda = \tilde{K} \{ \Phi(\lambda_{\max}, T_S) - \Phi(\lambda_{\min}, T_S) \};$$

$$\Phi(\lambda, T_S) = \begin{cases} 2\pi C_1 \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_S}\right) f_1(\lambda, T_S) & , \quad \lambda T_S < 3 \cdot 10^3 \text{ [мкм} \cdot \text{K]} \\ 2\pi C_1 \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_S}\right) f_2(\lambda, T_S) & , \quad 3 \cdot 10^3 \leq \lambda T_S < 9 \cdot 10^4 \text{ [мкм} \cdot \text{K]}, \\ \frac{2\pi}{3} C_1 \left(\frac{C_2}{T_S}\right) & , \quad \lambda T_S \geq 9 \cdot 10^4 \text{ [мкм} \cdot \text{K]} \end{cases}$$

где \tilde{K} - усредненная по спектральному диапазону $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ относительная чувствительность приемника; $C_1 = 0,59548 \cdot 10^{-4} \text{ [Вт} \cdot \text{мкм}^2]$ и $C_2 = 14388 \text{ [мкм} \cdot \text{K]}$ - постоянные Планка;

$$f_1(\lambda, T_S) = \lambda^{-3} (C_2/T_S)^{-1} + 3\lambda^{-2} (C_2/T_S)^{-2} + 6\lambda^{-1} (C_2/T_S)^{-3} + 6(C_2/T_S)^{-4};$$

$$f_2(\lambda, T_S) = f_1(\lambda, T_S) + A\lambda(\lambda T_S)^{-1,45} (C_2/T_S)^{-5} \{ \exp[B/(\lambda T_S)] - C \}^{-1}.$$

Здесь, в свою очередь, $A = 2,01284 \cdot 10^7$; $B = 1,13259 \cdot 10^4$ и $C = 15,5936$ - постоянные.

В приближении диффузного излучения и отражения яркость *отражаемой* части излучения цели получим в виде [1, с. 270]

$$B_0^{(R)}[n_1, n_2] = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_{0\lambda}^{(R)}[n_1, n_2] \cdot R(\lambda) d\lambda =$$

$$= \delta_0[n_1, n_2] \sum_{m_1=1}^{N_1} \sum_{m_2=1}^{N_2} \vartheta[n_1, n_2; m_1, m_2] F[n_1, n_2 | m_1, m_2] \Delta S[m_1, m_2] \times$$

$$\times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \{1 - \varepsilon_{\lambda}(T_S[n_1, n_2])\} B_{0\lambda}[m_1, m_2] R(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $\vartheta[n_1, n_2; m_1, m_2]$ - индикаторная функция, равная единице, если (m_1, m_2) - ой элемент поверхности $\Delta S[m_1, m_2]$ не затеняется другими элементами по отношению к (n_1, n_2) - ому элементу поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ объекта, и равная нулю в противном случае, причем $\vartheta[n_1, n_2; n_1, n_2] \equiv 0$; $F[n_1, n_2 | m_1, m_2]$ - угловой коэффициент (n_1, n_2) - ого элемента поверхности цели, излучающего в направлении (m_1, m_2) - ого элемента [1, с.206]

$$F[n_1, n_2 | m_1, m_2] = \frac{\cos \theta[n_1, n_2 | m_1, m_2] \cos \theta[m_1, m_2 | n_1, n_2]}{\pi L^2[n_1, n_2; m_1, m_2]}.$$

Здесь $\theta[n_1, n_2 | m_1, m_2]$ - угол между вектором нормали к (n_1, n_2) - ому элемент поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ и линией визирования: (m_1, m_2) - ой элемент - (n_1, n_2) - ой элемент поверхности цели, а $L[n_1, n_2; m_1, m_2]$ - расстояние между указанными элементами.

Полусферическая спектральная степень черноты (n_1, n_2) - ого элемента поверхности $\varepsilon_{\lambda}(T_S[n_1, n_2])$ связана с направленной спектральной степенью черноты соотношением [1, с.67]

$$\varepsilon_{\lambda}(T_S) = \varepsilon_{\lambda N}(T_S) \int_0^{\pi/2} \rho(\theta | \bar{k}) \sin(2\theta) d\theta = \varepsilon_N(T_S) \{1 - k_{B1} R(k_{R1}) - k_{B2} R(k_{R2})\}.$$

Интегрирование в правой части последнего равенства в соответствии с моделью работы [2] дает

$$R(k_R) = \begin{cases} 1 - \frac{2k_R^2}{1 - k_R^2} \left(\frac{1}{2\sqrt{1 - k_R^2}} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - k_R^2}}{1 - \sqrt{1 - k_R^2}} - 1 \right), & 0 \leq k_R < 1 \\ 1 - \frac{2}{3} k_R^2, & k_R = 1 \\ 1 - \frac{2k_R^2}{k_R^2 - 1} \left(1 - \frac{\arctg \sqrt{k_R^2 - 1}}{\sqrt{k_R^2 - 1}} \right), & k_R > 1 \end{cases}$$

Раскрывая равенство (1) в соответствии с формулами (2) и (3) для всех элементов поверхности объекта $\Delta S[n_1, n_2]$, видимых в направлении синтезируемого изображения,

т.е. $\delta_0[n_1, n_2] = 1$, получим уравнение энергетического баланса в приближении серого излучателя

$$\tilde{B}_0[n] = \tilde{\delta}_0[n]w_3[n]w_{04}[n] + \tilde{\delta}_0[n]w_1[n] \sum_{m=1}^{N_1 \cdot N_2} w_2[n, m] \tilde{B}_0[m]; \quad (4)$$

$$w_1[n] = 1 - \varepsilon_0[n];$$

$$\varepsilon_0[n] = \varepsilon_N(T_S[n_1, n_2]) \times \\ \times \{1 - k_{B1}[n_1, n_2]R(k_{R1}[n_1, n_2]) - k_{B2}[n_1, n_2]R(k_{R2}[n_1, n_2])\};$$

$$w_2[n, m] = \vartheta[n_1, n_2; m_1, m_2]F[n_1, n_2 | m_1, m_2] \Delta S[m_1, m_2];$$

$$w_3[n] = \varepsilon_N(T_S[n_1, n_2]) \tilde{R} \{ \Phi(\lambda_{\max}, T_S[n_1, n_2]) - \Phi(\lambda_{\min}, T_S[n_1, n_2]) \};$$

$$w_{04}[n] = \rho(\theta_0[n_1, n_2] | \bar{k}[n_1, n_2]); \quad (n = 1, \dots, N); \quad N = N_1 N_2.$$

Здесь лексикографические преобразования двумерных индексов (n_1, n_2) и (m_1, m_2) в одномерные $n = n_1 + (n_2 - 1)N_1$ и $m = m_1 + (m_2 - 1)N_1$ устанавливают соответствия:

$$\tilde{B}_0[n] = B_0[n_1, n_2]; \quad \tilde{B}_0[m] = B_0[m_1, m_2] \quad \text{и} \quad \tilde{\delta}_0[n] = \delta_0[n_1, n_2].$$

Важно отметить, что векторы коэффициентов $\vec{W}_1 = (w_1[1], \dots, w_1[N])$ и $\vec{W}_3 = (w_3[1], \dots, w_3[N])$ не зависят от ракурса цели и определяются теплофизическими свойствами излучающей поверхности объекта. Напротив матрица угловых коэффициентов $\{w_2[n, m]\}_{n=1, N}^{m=1, N}$ определяется способом пространственной дискретизации поверхности цели. Этот способ, как отмечалось выше, связан с процедурой центрального проецирования пикселей синтезируемого изображения на поверхность объекта локации. Наконец, вектор отсчетов нормированной индикатрисы излучения $\vec{W}_{04} = (w_{04}[1], \dots, w_{04}[N])$ зависит от ракурса цели.

Иными словами, задача синтеза изображения объекта *с априори известной пространственной конфигурацией* сводится к двухэтапной вычислительной процедуре.

Прежде всего, необходимо реконструировать неизвестные теплофизические параметры \vec{W}_1 ; \vec{W}_3 и \vec{W}_{04} по относительно небольшому набору экспериментально измеренных ракурсных снимков объекта локации. В дальнейшем изображение цели с заданного ракурса синтезируется на основе уравнения (4).

Идентификацию неизвестных параметров \vec{W}_1 ; \vec{W}_3 и \vec{W}_{04} рационально осуществлять на основе решения *системы уравнений энергетического баланса* (СУЭБ). Эта система составлена относительно экспериментально измеренных распределений яркостей излучения $\tilde{B}_k[n] = B_k[n_1, n_2]$ для элементов поверхности объекта $\Delta S[n_1, n_2]$ по набору $k = 1, \dots, K$ ракурсных снимков цели. Значение индекса $k = 0$, в этом случае, удобно интерпретировать как индекс ракурса, заданного пользователем, в направлении которого необходимо синтезировать модельное изображение.

Важно отметить, что множество $\Delta S[n_1, n_2]$, ($n_1 = 1, \dots, N_1$; $n_2 = 1, \dots, N_2$) предварительно получено центральным проецированием пикселей синтезируемого изображения на поверхность объекта. Аналогично уравнению (4) нетрудно получить СУЭБ

$$w_3[n]w_{k4}[n] + w_1[n] \sum_{j=1}^{N_1 \cdot N_2} w_2[n, j] \tilde{B}_k[j] = \tilde{B}_k[n]; \quad (k = 1, \dots, K), \quad (5)$$

где n принимает значения из интервала $[1, N]$, для которых индикаторная функция $\tilde{\delta}_k[n] = \delta_k[n_1, n_2] \neq 0$, то есть элемент поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ не маскируется другими элементами по отношению к приемной системе при k -ой ракурсной съемке.

Для сокращения последующих записей введем обозначение

$$B_k^{(R)}[n] = \sum_{j=1}^N w_2[n, j] \tilde{B}_k[j]$$

суммарной яркости излучения, отражаемого всеми элементами поверхности объекта в направлении (n_1, n_2) -ого элемента его поверхности при k -ом измерении.

Систему нелинейных уравнений (5) рационально предварительно линеаризовать. Для этого выполним, прежде всего, процедуру табуляции нормированной индикатрисы излучения $\rho(\theta | \vec{k})$. С этой целью интервал $[0^\circ, 90^\circ]$ углов наблюдения θ разобьем с равномерным шагом $\Delta\theta = \pi/(2M)$ на M интервалов. Будем полагать, что $w_{k4}[n] = w_4[m_{kn}]$ если

$$(m_{kn} - 1)\Delta\theta \leq \theta_k[n] = \theta_k[n_1, n_2] < m_{kn}\Delta\theta.$$

Здесь $w_4[m]$, ($m = 1, \dots, M$) - уровни квантования нормированной индикатрисы излучения $\rho(\theta | \vec{k})$, подлежащие идентификации по набору ракурсных снимков; m_{kn} -

уровень квантования индикатрисы, соответствующий (n_1, n_2) - ому элементу поверхности цели и ее k - ому ракурсному снимку. Ясно также, что на этапе синтеза модельного изображения цели для компонент вектора \vec{W}_{04} справедливы оценки

$$w_{04}[n] = w_4[m_{0n}] \quad \text{если} \quad (m_{0n} - 1)\Delta\theta \leq \tilde{\theta}_0[n] < m_{0n}\Delta\theta.$$

Вторым шагом линеаризации является логарифмирование системы уравнений (5)

$$\text{Ln}(w_3[n]) + \text{Ln}(w_4[m_{kn}]) = \text{Ln}(\tilde{B}_k[n] - w_1[n]B_k^{(R)}[n]). \quad (6)$$

Рассмотрим полусферическую степень черноты цели, усредненную по всем ее элементам поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$, $(n_1 = 1, \dots, N_1; n_2 = 1, \dots, N_2)$

$$E_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \epsilon_0[n].$$

В этом случае, оценка для среднего значения полусферического коэффициента отражения цели имеет вид

$$R_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_1[n] = 1 - E_0.$$

Тогда в качестве аппроксимаций правых частей системы уравнений (6) удобно принять линейные члены следующего ряда Тейлора

$$\text{Ln}(\tilde{B}_k[n] - w_1[n]B_k^{(R)}[n]) \approx \text{Ln}(B_{k0}^{(E)}[n]) - \frac{B_k^{(R)}[n]}{B_{k0}^{(E)}[n]}(w_1[n] - R_0).$$

Здесь

$$B_{k0}^{(E)}[n] = \tilde{B}_k[n] - R_0 B_k^{(R)}[n] \quad (7)$$

- имеет смысл средней яркости (n_1, n_2) - ого пикселя на k - ом снимке объекта локации, обусловленной собственным излучением цели.

В результате необходимых подстановок получим систему $\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_1 N_2} \delta_k[n]$ *линейных* уравнений

$$\frac{B_k^{(R)}[n]}{B_{k0}^{(E)}[n]} w_1[n] + \text{Ln}(w_3[n]) + \text{Ln}(w_4[m_{kn}]) = \frac{B_k^{(R)}[n]}{B_{k0}^{(E)}[n]} R_0 + \text{Ln}(B_{k0}^{(E)}[n]);$$

$$(k = 1, \dots, K); \quad (n = 1, \dots, N); \quad (m_{kn} = 1, \dots, M) \quad (8)$$

относительно набора $(2N_1 N_2 + M)$ неизвестных теплофизических параметров цели

$$w_1[n]; \quad Ln(w_3[n]), \quad (n=1, \dots, N) \quad \text{и} \quad Ln(w_4[m]), \quad (m=1, \dots, M). \quad (9)$$

В уравнении (8) $m_{kn} = \lfloor \tilde{\theta}_k[n]/\Delta\theta \rfloor + 1$, где символ «квадратные скобки» - означает целую часть числа, а индекс элемента поверхности n принимает значение, при котором индикаторная функция $\tilde{\delta}_k[n] \neq 0$.

Важно отметить, что в выражениях (7) и (8) средний полусферический коэффициент отражения цели $0 \leq R_0 \ll 1$ является параметром линеаризации исходной системы нелинейных уравнений (5). При $R_0 = 0$ переотражение оптического излучения между элементами поверхности объекта отсутствует. Типичное стартовое значение $R_0 \approx 0,1$. Значение коэффициента R_0 можно уточнять после каждого цикла решения системы уравнений (8). В соответствии с равенствами (5) и (7) не трудно получить формулу для итерационного обновления коэффициента R_0 :

$$R_0 = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{\delta}_k[n]}{B_k^{(R)}[n]} (\tilde{B}_k[n] - w_3[n]w_4[m_{kn}])}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \tilde{\delta}_k[n]}.$$

Для диффузного излучателя $k_{B1} = k_{B2} = 0$ и $\rho(\theta|\vec{k}) = 1$. В этом случае $M = 1$ и $w_4[m_{kn}] = 1$ то есть, система уравнений (8) разделяется на совокупность N независимых подсистем, каждая из которых содержит $\sum_{k=1}^K \tilde{\delta}_k[n]$ уравнений с двумя неизвестными $w_1[n]$ и $Ln(w_3[n])$. Параметр $w_1[n]$ представляет собой полусферический коэффициент отражения (n_1, n_2) -ого элемента поверхности объекта. Параметр $w_3[n]$ характеризует яркость, излученную (n_1, n_2) -ым элементом поверхности в направлении его нормали.

Ясно также, что решение системы (8) в случае диффузного излучения цели является хорошим начальным приближением неизвестных $w_1[n]$ и $Ln(w_3[n])$ ($n=1, \dots, N$) для итерационного решения системы уравнений (8) в общем случае.

Реконструкцию теплофизических параметров цели (9) по относительно небольшому набору K ракурсных снимков рационально выполнять с помощью линеаризованной

СУЭБ (8). Ее решение основано на эффективных в вычислительном отношении алгебраических методах *реконструктивной вычислительной томографии* [4].

В соответствии с представленной методикой проводилось исследование влияния формы нормированной индикатрисы $\rho(\theta)$ и эффекта переотражения на статистические характеристики синтезированного тепловизионного изображения танка Т-72. В вычислительном эксперименте спектральную и температурную зависимости степени черноты в направлении нормали $\varepsilon_{\lambda N}(T_S)$ аппроксимировали моделью Хагена – Рубенса [1] для металлической поверхности объекта локации. Расчеты проводились для спектрального диапазона 7 – 14 мкм. Распределение температуры по поверхности цели задавалось в рамках кусочно-аналитической модели геометрического образа объекта (рис. 2), представленной в работе [5]. В качестве моделей $\rho(\theta)$ анализировались нормированные диффузная и направленная индикатрисы с параметрами, представленными в таблице 1.

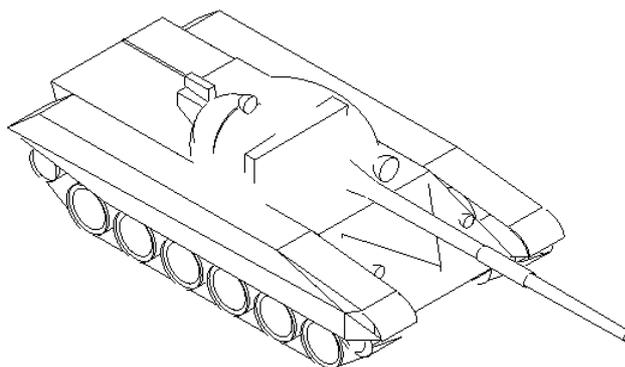


Рис.2. Геометрический образ танка.

Таблица 1.

Параметры модели нормированной индикатрисы излучения

| 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 |

Решение линеаризованной СУЭБ для малоракурсного случая ($K \approx 10$) получено с помощью алгоритма, представленного в работе [6]. Размер синтезированного изображения цели составлял 200×200 пикселей, а глубина цвета – 8 бит, в оттенках серого.

В качестве основных статистик модельных изображений исследовались математическое ожидание (МО), среднее квадратичное отклонение (СКО) и медиана одномерного распределения для уровня яркости изображения. Кроме того, анализировался вид гисто-

граммной оценки распределения, как наиболее важной характеристики для выбора параметров алгоритмов сегментации изображений. Нормированные индикатрисы $\rho(\theta)$ и результаты цифрового моделирования тепловизионных изображений танка Т-72, а также соответствующие им гистограммы яркости изображений представлены на рис. 3 – 5. Оценки основных статистик модельных изображений сведены в таблицу 2.

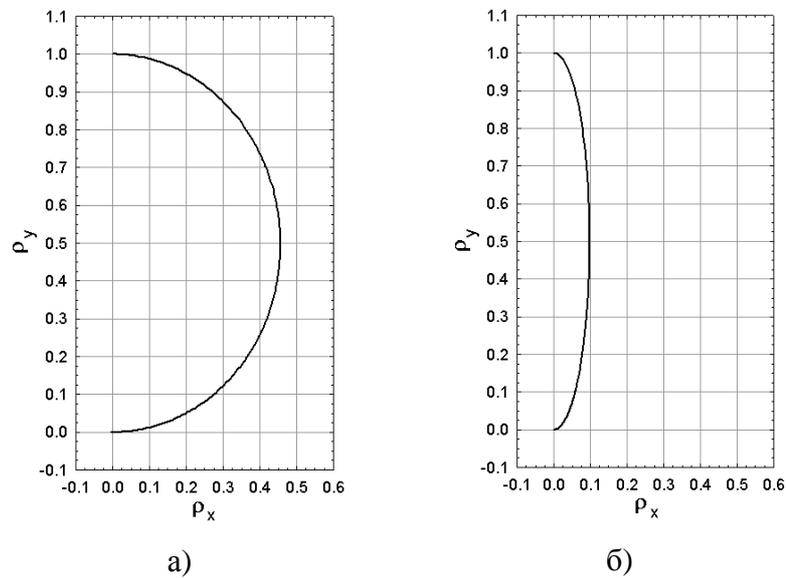


Рис. 3. Нормированная индикатриса $\rho(\theta)$ степени черноты:
а) – диффузная; б) – направленная.

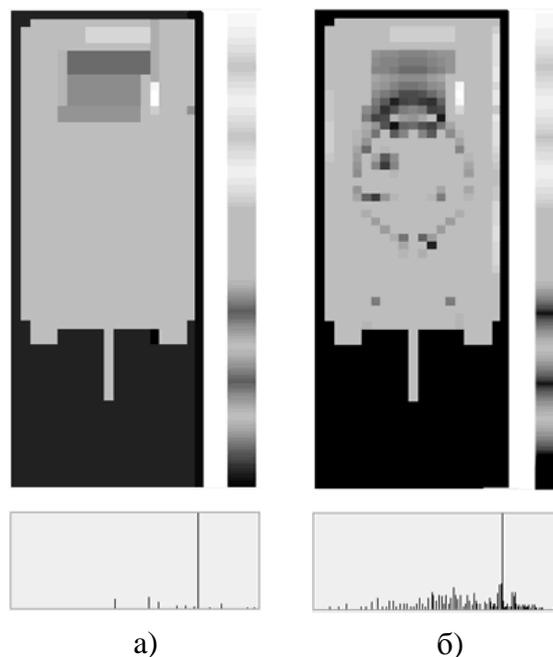


Рис. 4. Синтезированное изображение танка Т-72 и его гистограмма для диффузной индикатрисы степени черноты:
а) – без учета отражения; б) - с учетом отражения.

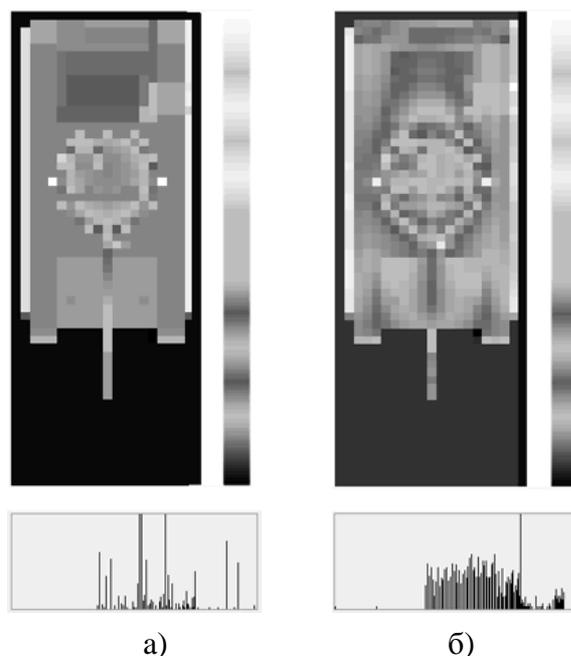


Рис. 5. Синтезированное изображение танка Т-72 и его гистограмма для направленной индикатрисы степени черноты: а) – без учета отражения; б) - с учетом отражения.

Таблица 2.
Статистики модельных изображений танка Т-72.

| № п/п | Индикатриса | Отражение | МО | Медиана | СКО |
|-------|--------------|-----------|--------|---------|-------|
| 1 | Диффузная | нет | 187,03 | 193 | 20,30 |
| 2 | | да | 155,30 | 193 | 96,89 |
| 3 | Направленная | нет | 148,8 | 160 | 91,01 |
| 4 | | да | 154,85 | 154 | 36,13 |

Полученные результаты цифрового моделирования тепловизионных изображений объекта локации позволяют сделать следующие выводы:

1. Теплообмен излучением и эффект переотражения различных участков поверхности 3D- объекта существенно влияют на качество и статистические характеристики тепловизионного изображения цели.
2. Метод сальдо и линеаризованная система уравнений энергетического баланса позволяют с достаточной для практики точностью реконструировать теплофизические параметры 3D- объекта по небольшому набору его ракурсных снимков.
3. Увеличение направленных свойств индикатрисы коэффициента теплового излучения уменьшает стандартное отклонение для яркости тепловизионного изображения цели.
4. Степень адекватности предложенной математической модели тепловизионного изображения цели проверена на сопоставлении экспериментальных и расчетных дан-

ных. СКО ошибки между экспериментальным и модельным изображениями танка Т-72 не превышает 12% от СКО уровня яркости цели с фиксированного ракурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / Под ред. Б. А. Хрусталева: Пер. с англ. - М.: Мир, 1975. - 934 с.
2. Лабунец Л. В. Попов А. В. Математическое моделирование индикатрисы спектрального коэффициента направленного теплового излучения покрытий объектов локализации // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, - сер. Приборостроение. - 2009. - № 2. - С. 50 - 61.
3. Барбар Ю. А. Васильев Е. А. Вычисление энергетической светимости нагретых тел // Оптико - механическая промышленность. - 1986. - № 10. - С. 6 - 8.
4. Ценсор Я. Методы реконструкции изображений, основанные на разложении в конечные ряды // ТИИЭР. - 1983. - Т. 71, № 3. - С. 148 - 160.
5. Лабунец Л. В. Цифровые модели изображений целей и реализаций сигналов в оптических локационных системах: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 216 с.
6. Herman G. T. Algebraic reconstruction techniques can be made computationally efficient // IEEE Transactions on medical imaging. - 1993. - V. 12, № 3. - P. 600 - 609.