

Л. В. Л а б у н е ц, А. В. П о п о в

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО-
ВИЗИОННОГО 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.

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

Ключевые слова: система уравнений энергетического баланса, тепловизионное изображение, математическая модель.

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 систем координат, приведенных на рис. 1, где оси обозначены в общем виде индексом k ; в тексте мы будем использовать $k = 0$, соответствующее ракурсу, заданному пользователем, в направлении которого необходимо синтезировать модельное изображение;

$O_t X_t Y_t Z_t$ — целевая система координат (ЦСК), связанная с условным центром цели O_t . Ориентацию ЦСК 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. Может

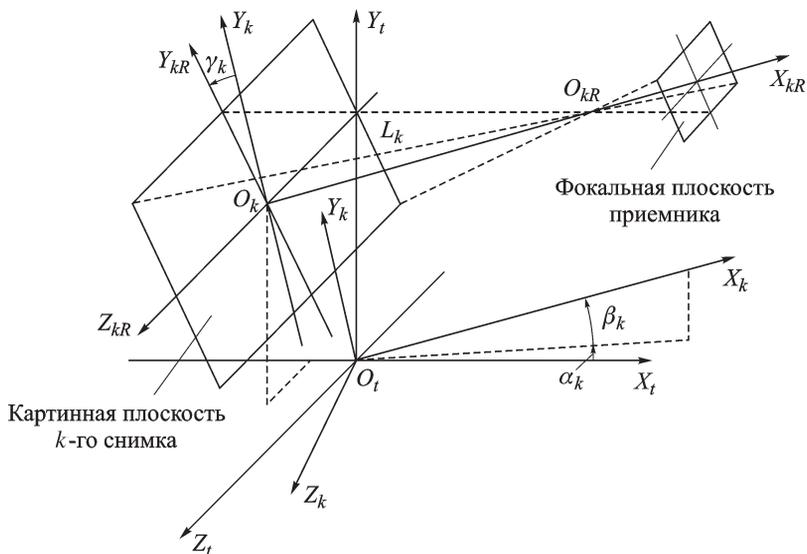


Рис. 1. Системы координат k -й ракурсной съемки

быть получена из ЦСК 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 ЛСК 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.

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 коэффициент направленного теплового излучения 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 яркостей испускаемой и отражаемой частей излучения:

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

где индексы (E) и (R) относятся соответственно к испускаемому и отражаемому излучению. Тогда интенсивность (n_1, n_2) -го 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) -й 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) -го элемента поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ и линией визирования ((n_1, n_2) -й пиксель синтезируемого изображения — (n_1, n_2) -й 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 следующее выражение:

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

в котором

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

Раскрывая формулу (1) с помощью последних равенств, нетрудно получить, что с точностью до постоянного множителя $\pi D_R^2/4$ интенсивность (n_1, n_2) -го 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 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$:

$$I_0[n_1, n_2] = \Delta \omega_R[n_1, n_2] B_0[n_1, n_2];$$

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

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

$$B_0^{(E)}[n_1, n_2] =$$

$$= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B_{0\lambda}^{(E)}[n_1, n_2] R(\lambda) d\lambda = \delta_0[n_1, n_2] \rho \left\{ \theta_0[n_1, n_2] | \vec{k}[n_1, n_2] \right\} \times$$

$$\times \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_{\lambda N}(T_S[n_1, n_2]) i_{\lambda B}(T_S[n_1, n_2]) R(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Здесь $\delta_0[n_1, n_2]$ — индикаторная функция, которая равна единице, если линия визирования (точка O_{0R} — (n_1, n_2) -й пиксель синтезируемого изображения) пересекается с поверхностью объекта, и равна нулю в противном случае; $\varepsilon_{\lambda N}(T_S[n_1, n_2])$ и $\rho \left\{ \theta_0[n_1, n_2] | \vec{k}[n_1, n_2] \right\}$ — соответственно коэффициент теплового излучения в направлении нормали элемента поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ и его нормированная индикатриса излучения, аппроксимированная моделью из работы [2]; $i_{\lambda B}(T_S)$ — спектральная светимость излучения абсолютно черного тела, имеющего температуру T_S , К. Форму индикатрисы задает вектор параметров $\vec{k} = \{k_{B1}, k_{R1}, k_{B2}, k_{R2}\}$.

В приближении серого излучателя коэффициент направленного теплового излучения в направлении нормали элемента поверхности не зависит от длины волны: $\varepsilon_{\lambda N}(T_S[n_1, n_2]) = \varepsilon_N(T_S[n_1, n_2])$, что позволяет вынести ее за знак интеграла в правой части последнего равенства. Долю излучения абсолютно черного тела, испускаемого в спектральном диапазоне $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, удобно аппроксимировать выражением работы [3]

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

$$\Phi(\lambda, T_S) =$$

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

где \tilde{R} – усредненная по спектральному диапазону $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, мкм, относительная чувствительность приемника; $C_1 = 0,59548 \cdot 10^{-4}$ Вт · мкм² и $C_2 = 14388$ мкм · К – постоянные Планка;

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

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

$$A = 2,01284 \cdot 10^7; B = 1,13259 \cdot 10^4; C = 15,5936.$$

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

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

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

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

где $\vartheta[n_1, n_2; m_1, m_2]$ – индикаторная функция равна единице, если (m_1, m_2) -й элемент поверхности $\Delta S[m_1, m_2]$ не затеняется другими элементами по отношению к (n_1, n_2) -му элементу поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ объекта, и равна 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) -го элемента поверхности цели, излучающего в направлении (m_1, m_2) -го элемента [1, с. 206], определяемый по формуле

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

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

Полусферический коэффициент теплового излучения (n_1, n_2) -го элемента поверхности $\varepsilon_\lambda(T_S[n_1, n_2])$ связан с коэффициентом направленного теплового излучения следующим соотношением [1, с. 67]:

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

Отсюда в соответствии с моделью работы [2] имеем

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

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. $\delta_0[n_1, n_2] = 1$, получаем уравнение энергетического баланса в приближении серого излучателя:

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

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

$$\varepsilon_0[n] = \varepsilon_N(T_S[n_1, n_2]) \times$$

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

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

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

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

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 поверх-

ности 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 ранее, 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.

Отметим, 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 $\tilde{\delta}_k[n] = \delta_k[n_1, n_2] \neq 0$, т.е. элемент поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$ не маскируется другими элементами по отношению к приемной системе при k -й 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 по-

верхности объекта в направлении (n_1, n_2) -го элемента его поверхности при k -м 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. Предположим, что $w_{k4}[n] = w_4[m_{kn}]$, если

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

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) -му элементу поверхности цели и ее k -му ракурсному снимку. Ясно также, что на этапе синтеза модельного изображения цели для компонент вектора \vec{W}_{04} справедливы оценки

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

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 усредненный коэффициент теплового излучения по всем элементам поверхности $\Delta S[n_1, n_2]$, $n_1 = 1, \dots, N_1$, $n_2 = 1, \dots, N_2$:

$$E_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varepsilon_0[n].$$

В этом случае оценка усредненного 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) -го пикселя на k -м снимке объекта локации, обусловленной собственным излучением цели.

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

$$\begin{aligned} \frac{B_k^{(R)}[n]}{B_{k0}^{(E)}[n]} w_1[n] + \text{Ln}(w_3[n]) + \text{Ln}(w_4[m_{kn}]) = \\ = \frac{B_k^{(R)}[n]}{B_{k0}^{(E)}[n]} R_0 + \text{Ln}(B_{k0}^{(E)}[n]), \end{aligned} \quad (8)$$

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

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

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

В уравнении (8) $m_{kn} = \left[\tilde{\theta}_k[n] / \Delta\theta \right] + 1$, квадратные скобки означают 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) усредненный 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) нетрудно получить формулу для итерационного обновления коэффициента R_0 :

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

Для диффузного излучателя $k_{B1} = k_{B2} = 0$ и $\rho(\theta|\vec{k}) = 1$. В этом случае $M = 1$ и $w_4[m_{kn}] = 1$, т.е. система уравнений (8) разделяется на совокупность N независимых подсистем, каждая из которых содержит $\sum_{k=1}^K \delta_k[n]$ уравнений с двумя неизвестными $w_1[n]$ и $\text{Ln}(w_3[n])$.

Параметр $w_1[n]$ представляет собой полусферический коэффициент отражения (n_1, n_2) -го элемента поверхности объекта. Параметр $w_3[n]$ характеризует яркость, излученную (n_1, n_2) -м 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 $\text{Ln}(w_3[n])$ ($n = 1, \dots, N$) 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 приведенной методикой исследовали влияние формы нормированной индикатрисы $\rho(\theta)$ и эффекта переотражения на статистические характеристики синтезированного тепловизионного изображения танка Т-72. В вычислительном эксперименте спектральную и температурную зависимости коэффициента теплового излучения в направлении нормали $\varepsilon_{\lambda N}(T_S)$ аппроксимировали моделью Хагена–Рубенса [1] для металлической поверхности объекта локации. Расчеты проводили для спектрального диапазона 7...14 мкм. Распределение температуры по поверхности цели задавали в рамках кусочно-аналитической модели геометрического образа объекта (рис. 2), представленной в работе [5]. В качестве моделей $\rho(\theta)$ анализировали нормированные диффузную и направленную индикатрисы с параметрами, приведенными в табл. 1. Решение линеаризованной СУЭБ для мало-ракурсного 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 исследовали математическое ожидание (МО), среднеквадратическое отклонение (СКО) и медиану одномерного распределения для уровня яркости

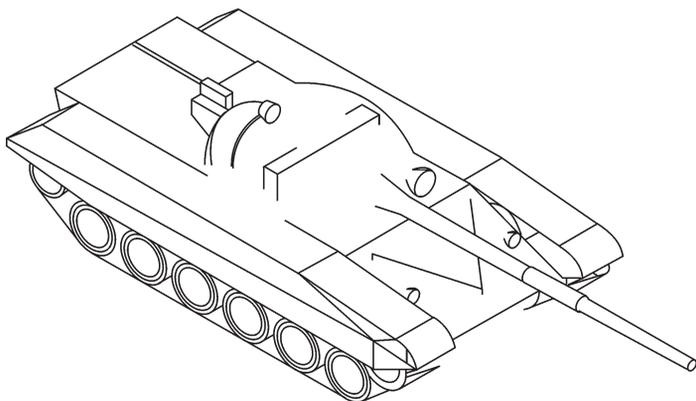


Рис. 2. Геометрический образ танка

**Параметры модели нормированной индикатрисы
излучения**

Индикатриса	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

изображения. Кроме того, анализировали гистограмму оценки распределения, как наиболее важную характеристику 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, 4. Оценки основных статистик модельных изображений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистики модельных изображений танка Т-72

Индикатриса	Отражение	МО	Медиана	СКО
Диффузная	Нет	187,03	193	20,30
	Да	155,30	193	96,89
Направленная	Нет	148,80	160	91,01
	Да	154,85	154	36,13

Выводы. 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.

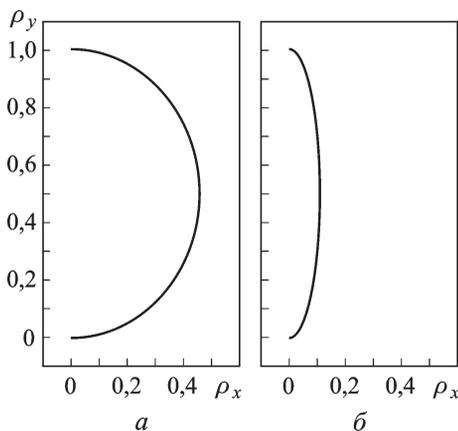


Рис. 3. Нормированная индикатриса $\rho(\theta)$ степени черноты:
а — диффузная; б — направленная

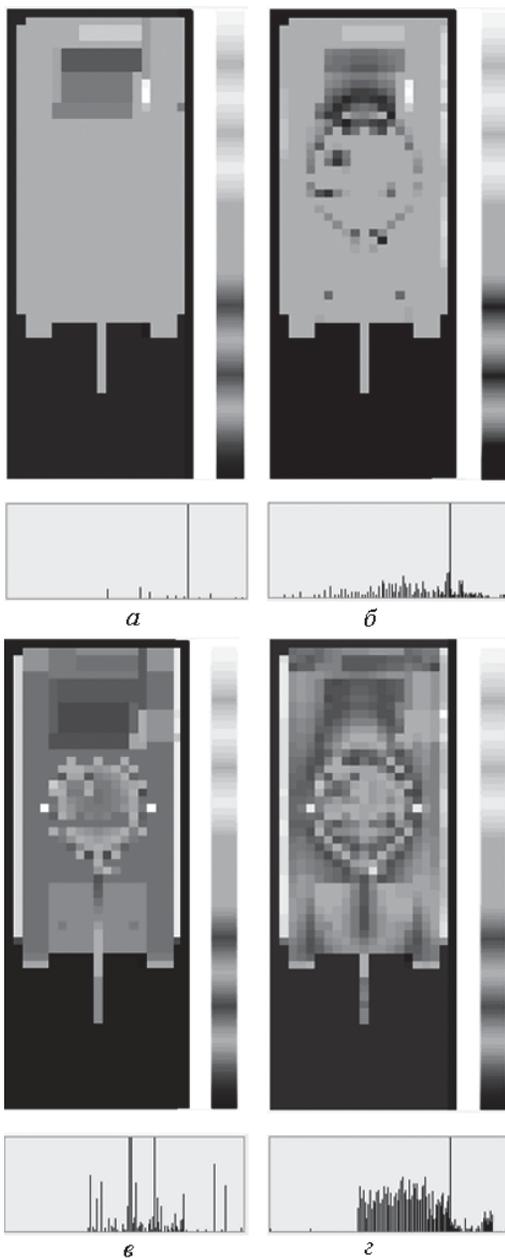


Рис. 4. Синтезированное изображение танка Т-72 и его гистограмма для диффузной (*а*, *б*) и направленной (*в*, *г*) индикатрис степени черноты:

а, *в* — без учета отражения; *б*, *г* — с учетом отражения

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 данных. Значение СКО яркости экспери-

ментального изображения танка Т-72 от модельного не превышает 12 % 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 локации // 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: Учеб. пособ. – 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. – Vol. 12. No. 3. – P. 600–609.

Статья поступила в редакцию 28.10.2009

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

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 location systems, statistical radio engineering, theory of image identification, neuro-network and fuzzy-logic methods of data processing, expert systems.

Александр Владимирович Попов родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Магистр техники и технологии по направлению “Автоматизация и управление”, аспирант кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области цифрового моделирования входных сигналов локационных систем, статистической радиотехники, эффективных вычислительных алгоритмов.

A.V. Popov (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Master of engineering and technology in the field of automation and control, post-graduate of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of digital simulation of input signals of location systems, statistical radio engineering, efficient computational algorithms.