

И. А. Харченко

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПОЛУТОНОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Рассмотрены вопросы разработки и совершенствования теоретических методов анализа алгоритмического обеспечения сбора и обработки исходной видовой информации в целях повышения информативности, достоверности и сокращения сроков представления выходной информации, формируемой при инженерной разведке и использовании метода рекуррентно-поискового оценивания, объединяющего способ калмановской фильтрации и теорию проверки гипотез.

Ключевые слова: видовой информация, информативность, достоверность, инженерная разведка, калмановская фильтрация.

В современных условиях при подготовке и ведении операций по устранению опасности, порождаемой минами и неразорвавшимися боеприпасами (гуманитарному разминированию), включая техническую (инженерную) разведку, все большую значимость приобретает воздушное фотографирование в ходе выполнения воздушной инженерной разведки, цель которой — получение информации о минной обстановке в районах бывших боевых действий и контртеррористических операций. Основными преимуществами ведения воздушной инженерной разведки являются высокая производительность, возможность использования датчиков, работающих в разных диапазонах электромагнитного спектра длин волн, отсутствие риска для персонала, выполняющего работы по обнаружению минных полей, и возможность автоматической и/или автоматизированной обработки получаемой в масштабе времени видовой (иконической) информации, близком к реальному.

Большой объем видовой информации, получаемый с борта воздушного носителя, требует использования для ее фотограмметрической обработки значительного числа дешифровщиков высокой квалификации. Эта операция требует максимальной автоматизации, чтобы оставить за оператором право принятия решения на заключительном этапе обработки [1, 2]. В связи с этим представляет интерес перенос процесса определения координат вскрытых объектов с этапа фотограмметрической обработки на этап предварительной обработки материалов воздушного фотографирования. В этом случае дешифровщику предъявляется снимок в виде пространственной полутоновой модели местности, на котором известны координаты каждого элемента разрешения (пиксела) [3, 4].

Пространственная полутоновая модель местности, т.е. компьютерное отображение местности в виде сочетания модели рельефа и по-

лутоновой модели ландшафта и объектов на нем [5], обеспечит возможность измерений в пространстве модели (координат, высот, углов наклона местности, площадей и других величин).

Такой подход позволит сократить время полной обработки материалов воздушного фотографирования [6], снизит нагрузку на дешифровщика и, как следствие, сократит сроки представления данных, повысит их достоверность.

Алгоритмы восстановления пространственных характеристик сцены по стереопаре изображений и создания пространственных полутоновых моделей местности могут быть получены на основе локальной корреляции участков изображений, совмещения точечных признаков и границ, динамического программирования, теории рекуррентно-поискового оценивания и алгоритмов восстановления, использующих информацию о поверхностях [7, 8].

Алгоритмы восстановления, основанные на теории рекуррентно-поискового оценивания, использующие геофизические поля (оптическое, тепловое и поле рельефа), имеют ряд достоинств, которые позволяют говорить о перспективности их применения при автоматизации процесса определения координат объектов разведки [9–14]. К основным преимуществам стоит отнести высокую точность, помехоустойчивость, сходимость, независимость от временной нестабильности оптических полей, использование в качестве априорной информации карт рельефа местности, а также возможность параллельных вычислений.

По методу определения отклонения от экстремума такие алгоритмы подразделяются на беспойсковые, поисковые и комбинированные [15].

Оптимальные (субоптимальные) беспойсковые алгоритмы ведут свое происхождение от фильтра Калмана, примененного к специфической задаче наблюдения нерегулярного и не поддающегося аналитическому описанию навигационного поля. Известны два строгих теоретических подхода к синтезу таких алгоритмов: нелинейная калмановская фильтрация [16, 17] и нелинейная фильтрация Стратоновича [18, 19]. Главным недостатком дифференциального беспойскового алгоритма является потеря работоспособности системой при начальных рассогласованиях, превышающих радиус корреляции поля [20], а также при нестационарности поля по дисперсии, математическому ожиданию и спектру. Беспойсковыми алгоритмами могут быть ликвидированы начальные отклонения, не превышающие первого экстремума — минимума корреляционной функции.

Концепция поисковых алгоритмов строится на основе теории статистических решений [11–13, 21]. Особенностью глобальных поисковых алгоритмов, связанных со сплошным перебором всех вариантов,

является отсутствие ограничений на значения начальных ошибок навигационной системы. Однако реализация данных алгоритмов, особенно в случае многопараметрического оценивания, требует значительной производительности ЭВМ. В задаче многопараметрического оценивания навигационных параметров по наблюдениям геофизических полей отделяется часть, связанная с нелинейной зависимостью геофизических полей от позиционных координат (для этой части параметров сохраняется сплошной перебор вариантов для решения проблемы ликвидации больших начальных отклонений), а по отношению к другим параметрам отказываются от сплошного перебора и используют методы фильтрации. Теоретической основой такого подхода является метод рекуррентно-поискового оценивания [22] и его непрерывный аналог [14], объединяющие идеи калмановской фильтрации и теории проверки гипотез. Однако поисковые алгоритмы требуют больших вычислительных затрат, обусловленных полным перебором гипотез.

Для решения задач многопараметрического оценивания при больших начальных ошибках навигационной системы предлагается использовать комбинированные алгоритмы оценивания, базирующиеся на совместном оптимальном оценивании и проверке статистических гипотез (так называемом рекуррентно-поисковом оценивании) и сочетающие в себе идеи поиска и фильтрации. Комбинированные алгоритмы представляют собой сочетание поисковых и беспоисковых алгоритмов, полученных как на основе строгого решения задачи оптимизации [22], так и на основе инженерной интуиции и опыта. Они не имеют ограничений на значения начальных ошибок рассогласования и в ряде случаев не предъявляют особых требований к ЭВМ при своей реализации.

Таким образом, цель настоящей работы — обоснование и разработка методики формирования в автоматическом режиме пространственной полутоновой модели местности, создаваемой по материалам воздушного фотографирования, для решения задачи повышения информативности, достоверности и сокращения сроков представления формируемой при инженерной разведке выходной видовой разведывательной информации.

Теоретические предпосылки. Априори известна математическая модель технического средства получения видовой информации для конкретных условий полета (высоты полета, главного расстояния аэрофотоаппарата, положения главной точки аэроснимка и т.д.) [3, 4, 8], которая представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned}x &= p(X^S, Y^S, H^S, \psi, \vartheta, \gamma, X, Y, h(X, Y)); \\y &= q(X^S, Y^S, H^S, \psi, \vartheta, \gamma, X, Y, h(X, Y)); \\X &= P(X^S, H^S, \psi, \vartheta, \gamma, x, y, F, h(X, Y)); \\Y &= Q(Y^S, H^S, \psi, \vartheta, \gamma, x, y, F, h(X, Y)),\end{aligned}\tag{1}$$

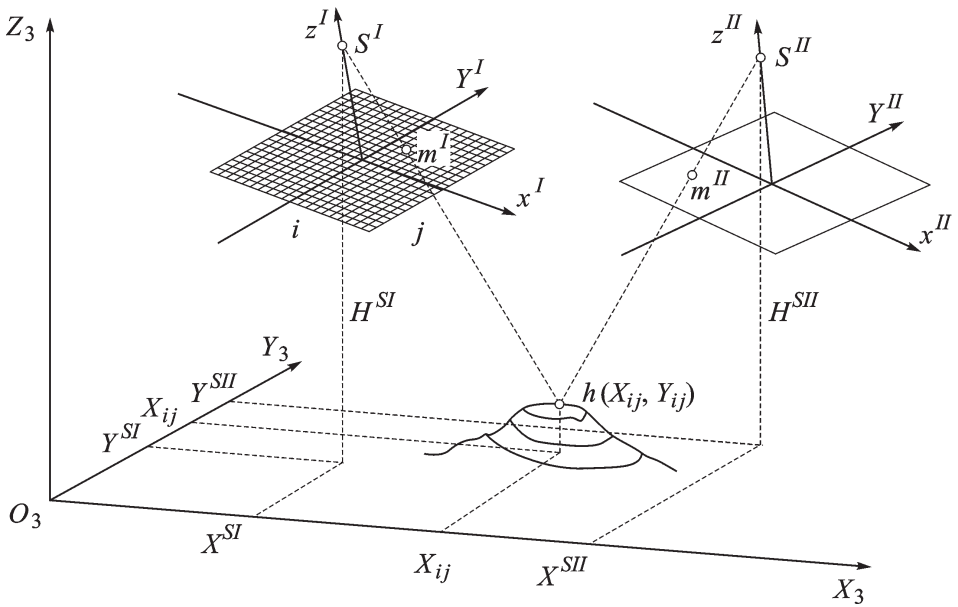


Рис. 1. Определение соответственных точек на изображениях стереопары

где $X^S, Y^S, H^S, \psi, \vartheta, \gamma$ — линейные (позиционные) и угловые элементы внешнего ориентирования аэроснимка; $X, Y, h(X, Y)$ — координаты произвольной наблюдаемой точки в земной системе координат; $h(X, Y)$ — высота рельефа; $(x, y, 0)$ — координаты наблюдаемой точки в системе координат, связанной с плоскостью изображения; F — фокусное расстояние иконической системы.

Рассмотрим стереопару (рис. 1), т.е. два изображения, имеющие общую область наблюдения W . В некоторой точке пространства S^I фотографируется земная поверхность ($X^{SI}, Y^{SI}, H^{SI}, \psi^I, \vartheta^I, \gamma^I$ — элементы внешнего ориентирования первого изображения стереопары); затем проводится повторное фотографирование в точке S^{II} земной поверхности таким образом, чтобы обеспечить перекрытие между снимками 60...70% ($X^{SII}, Y^{SII}, H^{SII}, \psi^{II}, \vartheta^{II}, \gamma^{II}$ — элементы внешнего ориентирования второго изображения стереопары). Элементы внутреннего ориентирования, определяющие положение центра проекции относительно аэрофотонегатива, считаются известными и постоянными для любой точки фотографирования, потому что фотографирование проводится одним и тем же средством.

Элементы внешнего ориентирования измеряются бортовой навигационной системой летательного аппарата. Максимальные линейные (позиционные) и угловые ошибки пилотажно-навигационной системы считаются постоянными:

$$\Delta^I X_{\max} = \Delta^I Y_{\max} = \Delta^I H_{\max} = \Delta^{II} X_{\max} = \Delta^{II} Y_{\max} = \Delta^{II} H_{\max} = \Delta_{\text{лин. макс}};$$

$$\Delta^I \psi_{\max} = \Delta^I \vartheta_{\max} = \Delta^I \gamma_{\max} = \Delta^{II} \psi_{\max} = \Delta^{II} \vartheta_{\max} = \Delta^{II} \gamma_{\max} = \Delta_{\text{угл. макс}}.$$

Уравнения наблюдения для стереопары имеют следующий вид:

$$Z = F(X^*, 0, h^k) + H(X^*, h^k)X + \delta Z;$$

$$F(X^*, 0, h^k) = (F_{1\alpha}(X^*, 0, h^k), \dots, F_{ij}(X^*, 0, h^k), \dots, F_{n\beta}(X^*, 0, h^k))^T;$$

$$H^T(X^*, h^k) = \begin{vmatrix} H_{1\alpha}^1 & \dots & H_{ij}^1 & \dots & H_{n\beta}^1 \\ H_{1\alpha}^2 & \dots & H_{ij}^2 & \dots & H_{n\beta}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{1\alpha}^8 & \dots & H_{ij}^8 & \dots & H_{n\beta}^8 \end{vmatrix},$$

$$H_{ij}^1 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta X} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}}; \quad H_{ij}^2 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta V_x} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}};$$

$$H_{ij}^3 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta H} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}}; \quad H_{ij}^4 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta \vartheta} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}};$$

$$H_{ij}^5 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta Y} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}}; \quad H_{ij}^6 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta V_y} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}};$$

$$H_{ij}^7 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta \psi} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}}; \quad H_{ij}^8 = \left. \frac{dF_{ij}(X^*, h)}{d\Delta \gamma} \right|_{\substack{h=h^k \\ X=0}},$$

где $F(X^*, 0, h^k)$ – вектор облученностей соответственных точек изображений стереопары; $X = (\Delta X, \Delta V_x, \Delta H, \Delta \vartheta, \Delta Y, \Delta V_y, \Delta \psi, \Delta \gamma)^T$ – вектор ошибок бортовой навигационной системы летательного аппарата; $X^* = (X^{*SII}, Y^{*SII}, H^{*SII}, \psi^{*II}, \vartheta^{*II}, \gamma^{*II}, X^{*SI}, Y^{*SI}, H^{*SI}, \psi^{*I}, \vartheta^{*I}, \gamma^{*I})^T$ – вектор измеренных значений элементов ориентирования изображений; $h = (h_{1\alpha}, h_{1\alpha+1}, \dots, h_{1\beta}; h_{2\alpha}, \dots, h_{2\beta}; \dots; h_{i\alpha}, \dots, h_{ij}, \dots, h_{i\beta}; \dots; h_{n\alpha}, \dots, h_{n\beta})^T$ – вектор значений высот рельефа в визируемых точках стереопары; $h^k = (h_{16}^k, h_{16+1}^k, \dots, h_{1\beta}^k; h_{26}^k, h_{26+1}^k, \dots, h_{2\beta}^k; \dots; h_{i6}^k, h_{i6+1}^k, \dots, h_{ij}^k, \dots, h_{i\beta}^k; \dots; h_{n6}^k, h_{n6+1}^k, \dots, h_{n\beta}^k)^T$ – вектор значений высот, извлекаемых из имеющейся цифровой карты рельефа.

Полученные изображения обрабатываются по следующему алгоритму в целях уточнения элементов внешнего ориентирования.

Назначаются доверительные “кубы” $2\Delta^I X_{\max} \times 2\Delta^I Y_{\max} \times 2\Delta^I H_{\max}$ и $2\Delta^{II} X_{\max} \times 2\Delta^{II} Y_{\max} \times 2\Delta^{II} H_{\max}$ для линейных координат и доверительные “сферические кубы” $2\Delta^I \psi_{\max} \times 2\Delta^I \vartheta_{\max} \times 2\Delta^I \gamma_{\max}$ и $2\Delta^{II} \psi_{\max} \times 2\Delta^{II} \vartheta_{\max} \times 2\Delta^{II} \gamma_{\max}$ для угловых координат с центрами в точках с элементами ориентирования $(X^{*SI}, Y^{*SI}, H^{*SI}, \psi^{*SI}, \vartheta^{*SI}, \gamma^{*SI})$ и $(X^{*SII}, Y^{*SII}, H^{*SII}, \psi^{*SII}, \vartheta^{*SII}, \gamma^{*SII})$ для первого и второго снимков стереопары соответственно.

Под гипотезой D_{pq} понимаем предположение, что условное математическое ожидание вектора ошибок навигационной системы $m \langle D_{pq} \rangle = \|m_X \langle D_{pq} \rangle, m_Y \langle D_{pq} \rangle, m_H \langle D_{pq} \rangle, m_{\vartheta} \langle D_{pq} \rangle, m_{\psi} \langle D_{pq} \rangle, m_{\gamma} \langle D_{pq} \rangle\|^T$ находится в кубе с центром в точке с координатами $\Delta X_{pN} = p_X L$, $\Delta Y_{pN} = p_Y L$, $\Delta H_{pN} = p_H L$, $\Delta \vartheta_q = q_{\vartheta} \varphi$, $\Delta \psi_q = q_{\psi} \varphi$, $\Delta \gamma_q = q_{\gamma} \varphi$.

Оптимальный алгоритм обработки стереоскопической информации вытекает из исходной постановки задачи рекуррентно-поискового оценивания и содержит три группы уравнений, которые решаются рекуррентно для $k = \overline{0, N}$:

$$\begin{aligned}\hat{X}_{pqk} &= \hat{X}_{pqk|k-1} + K_{pqk} \Delta_{pqk}; \\ \Delta_{pqk} &= Z_k - \tilde{F} \left(X_k^*, \hat{X}_{pqk|k-1}, h^k \right) - H_{pqk} \hat{X}_{pqk|k-1} = \\ &= Z_k - F \left(X_k^*, \hat{X}_{pqk|k-1}, h^k \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\hat{X}_{pqk+1|k} = A \hat{X}_{pqk}; \quad K_{pqk} = \Gamma_{pqk} H_{pqk}^T R^{-1}; \quad \hat{X}_{pq0|-1} = m_{pq}$$

— уравнения оценок;

$$\begin{aligned}\Gamma_{pqk} &= \Gamma_{pqk|k-1} - \\ &- \Gamma_{pqk|k-1} H_{pqk}^T \left(H_{pqk} \Gamma_{pqk|k-1} H_{pqk}^T + R \right)^{-1} H_{pqk} \Gamma_{pqk|k-1}; \quad (3) \\ \Gamma_{pqk|k+1} &= A \Gamma_{pqk} A^T; \quad \Gamma_{pq0|-1} = G\end{aligned}$$

— уравнения ковариаций;

$$\begin{aligned}I_{pqk} &= I_{pqk-1} + \|\Delta_{pqk}\|_{\Sigma_{pqk}^{-1}}^2 + \varepsilon_{pqk}; \\ \Sigma_{pqk}^{-1} &= R^{-1} - R^{-1} H_{pqk} \Gamma_{pqk} H_{pqk}^T R^{-1}; \quad (4) \\ \varepsilon_{pqk} &= \ln \frac{|\Gamma_{pqk|k-1}| |R|}{|\Gamma_{pqk-1}|}; \quad I_{pq-1} = 0; \quad |\Gamma_{pq-1}| = P_{pq}^2\end{aligned}$$

— уравнения функционалов.

После обработки информации определяются все функционалы I_{pqN} , и в качестве наиболее вероятной гипотезы $D_{\mu\nu}$ выбирается гипотеза, которой соответствует минимальное значение функционала $D_{\mu\nu} = \arg \min_{D_{pq}} I_{pqN}$.

Соответствующие выбранной гипотезе $D_{\mu\nu}$ оценки ошибок позиционных и угловых координат $\Delta \hat{X}_N = \mu_X L$, $\Delta \hat{Y}_N = \mu_Y L$, $\Delta \hat{H}_N = \mu_H L$, $\Delta \hat{\vartheta}_N = \nu_{\vartheta} \varphi$, $\Delta \hat{\psi}_N = \nu_{\psi} \varphi$, $\Delta \hat{\gamma}_N = \nu_{\gamma} \varphi$ используются для уточнения элементов внешнего ориентирования снимка:

$$\begin{aligned}\hat{X}_N^{SII} &= X_N^{*SII} - \Delta \hat{X}_N; & \hat{\vartheta}_N^{SII} &= \vartheta_N^{*SII} - \Delta \hat{\vartheta}_N; \\ \hat{Y}_N^{SII} &= Y_N^{*SII} - \Delta \hat{Y}_N; & \hat{\psi}_N^{SII} &= \psi_N^{*SII} - \Delta \hat{\psi}_N; \\ \hat{H}_N^{SII} &= H_N^{*SII} - \Delta \hat{H}_N; & \hat{\gamma}_N^{SII} &= \gamma_N^{*SII} - \Delta \hat{\gamma}_N.\end{aligned}$$

Измеряются координаты x, y каждого пиксела на одном из изображений и, при использовании соотношения (1), определяются координаты точек на местности, соответствующие каждому пикселу.

Методика формирования пространственной полутоновой модели местности включает ряд последовательных этапов. Блок-схема реализации двух этапов методики представлена на рис. 2:

1. Этап поиска минимального значения функционала $I_{\mu\nu}$ и соответствующей ему гипотезы $D_{\mu\nu}$, для которой имеется наилучшее совпадение облученностей первого и второго (гипотетического, для $D_{\mu\nu}$) изображений стереопары.

2. Этап расчета уточненных элементов внешнего ориентирования второго изображения стереопары и расчета по уравнениям наблюдения прямоугольных координат каждого пиксела изображения.

Этап 1. Блоки памяти I, II хранят информацию о стереопарах изображений. В некоторый момент времени блоком датчиков оптико-электронной системы фиксируется два изображения местности, имеющие значительную степень перекрытия. Множество значений $\{f_{ij}^I\}$ записываются в блок памяти I с шагом дискретизации δ . Второе изображение дискретизируется по координатам x, y с шагом гораздо более мелким, чем δ так, чтобы в дальнейшем можно было с необходимой точностью управлять считыванием со второго изображения в произвольной точке (x, y) . В блоке памяти II, хранящем информацию о втором изображении, записывается массив $\{f_{\xi\eta}^{II}\}$.

Автоматический оптимизатор выполняет две функции: генерирование проверяемых гипотез D_{pq} о возможном местоположении летательного аппарата; поиск минимума функционалов по возможным гипотезам.

Одновременно осуществляется настройка блока вычисления функционалов на генерируемую гипотезу путем расчета условного математического ожидания m_{pq} .

Навигационная система измеряет текущие значения элементов внешнего ориентирования летательного аппарата $X^*, Y^*, H^*, \psi^*, \vartheta^*, \gamma^*$, которые подаются в блок управления считыванием и автоматический оптимизатор. Генерирование гипотезы D_{pq} осуществляется с учетом измеренных значений элементов внешнего ориентирования, которые определяют центры “доверительного куба” и “доверительно-го сферического куба” для второго изображения.

Одновременно в навигационной системе формируются значения элементов условной ковариационной матрицы G ошибок корректируемой навигационной системы, которые подаются в блок вычисления функционалов.

В блоке карты рельефа местности содержится цифровая карта рельефа $h(x, y)$ в районе стереонаблюдений. После того как сформирована гипотеза D_{pq} , в соответствии с этой гипотезой из блока карты рельефа местности извлекается массив значений рельефа $\{h_{ijpq}\}$ в узловых точках местности X_{ijpq}, Y_{ijpq} , соответствующих узловым точкам изображения I. Этот массив подается в блок управления считыванием.

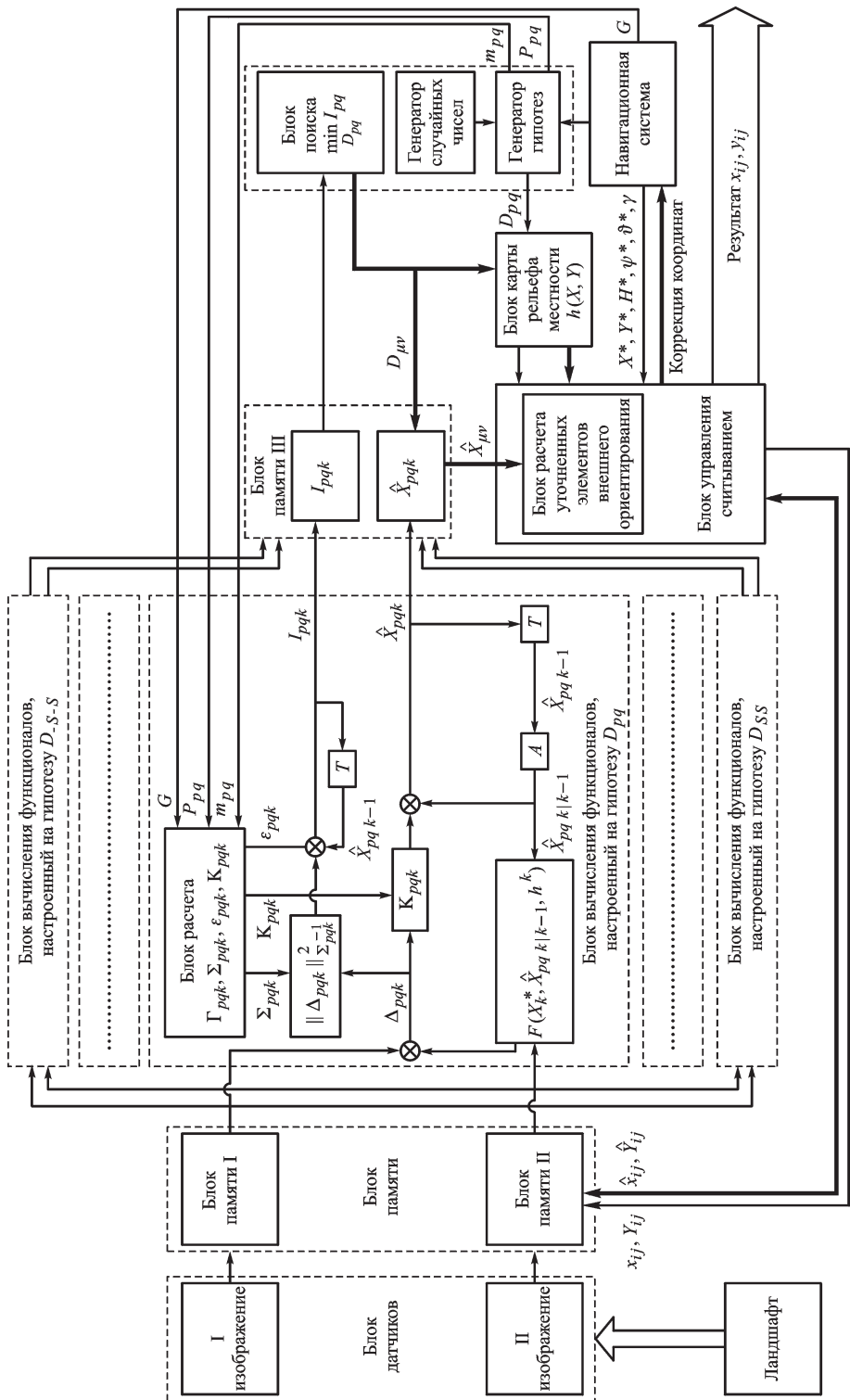


Рис. 2. Блок-схема алгоритма

При управлении считыванием используются зависимости (фотограмметрические формулы пересчета) и находится положение $(x_{ijpq}^{II}, y_{ijpq}^{II})$ соответствующих узловых точек на изображении II, соответствующие гипотезе D_{pq} . Именно в этих точках в блоке памяти II считываются гипотетические значения облученностей f_{ijpq}^{II} .

Блок вычисления функционалов настраивается на гипотезу D_{pq} путем ввода значений условного математического ожидания m_{pq} и априорной вероятности гипотезы P_{pq} , сформированных автоматическим оптимизатором.

В блок вычисления функционалов, настроенный на гипотезу D_{pq} , из блока памяти I поступает множество значений $\{f_{ij}^I\}$, а также для проверяемой гипотезы D_{pq} множество значений $\{f_{ijpq}^{II}\}$ из блока памяти II. Далее по формулам (2)–(4) рассчитываются значения функционала I_{pq} и оценивается вектор состояния (ошибок) \hat{X}_{pq} . Значение функционала I_{pq} представляет собой меру несовпадения для проверяемой гипотезы D_{pq} облученностей изображений I и II стереопары.

Рассчитанные значения I_{pq} и \hat{X}_{pq} поступают в блок памяти III и хранятся там до завершения этапа. Далее происходит генерирование новой гипотезы и рассчитываются соответствующие ей значения функционала I_{pq} и оценки вектора состояния (ошибок) \hat{X}_{pq} .

Этап II начинается после того, как набран необходимый объем выборки или, другими словами, проведено N циклов генерирования гипотез расчета функционалов и вектора состояния, которые хранятся в блоке памяти III. Там же хранятся все параметры, определяющие гипотезы. После формирования сигнала о завершении N циклов расчета из блока памяти III значения функционалов поступают в блок поиска минимального значения функционала I_{pq} на множестве гипотез D_{pq} . В блоке поиска определяется гипотеза $D_{\mu\nu}$, для которой функционал $I_{\mu\nu}$ принимает минимальное значение. На основе этой информации из блока памяти III извлекается оценка вектора состояния $\hat{X}_{\mu\nu}$, соответствующая гипотезе $D_{\mu\nu}$, а из блока карты рельефа — соответствующий массив значений рельефа $h_{\mu\nu}(X, Y)$. Извлеченные значения подаются в блок расчета уточненных элементов внешнего ориентирования, входящий в блок управления считыванием, т.е. находится положение $(x_{ij\mu\nu}^{II}, y_{ij\mu\nu}^{II})$ соответствующих узловых точек на втором изображении, соответствующие гипотезе $D_{\mu\nu}$. Именно в этих точках в блоке памяти II считываются гипотетические значения облученностей $f_{ij\mu\nu}^{II}$.

Таким образом, в результате обработки стереопары на втором изображении f_{ij}^{II} с использованием зависимостей (1) определяются координаты каждого пиксела изображения.

Одновременно с блока управления считыванием уточненные координаты вводятся в навигационную систему для ее корректировки. Следует полагать, что использование стереомножества изображений местности приведет к увеличению точности определения координат.

Экспериментальные исследования. Для оценки достижимой точности разработанной методики получения пространственной полутоновой модели местности стереоскопическим методом проведено экспериментальное статистическое моделирование.

С учетом погрешностей определения координат и измерения углового положения современных пилотажно-навигационных систем (ЛИНС-2000 и БИНС-СП) [15, 23] в эксперименте максимальные ошибки принимали значения: $\Delta_{\text{лин.маx}} = 50; 100; 200$ м, $\Delta_{\text{угл.маx}} = 0,001; 0,003; 0,009$ рад.

Расчеты проводились для всех комбинаций максимальных линейных и угловых ошибок пилотажно-навигационной системы для следующих чисел точек оцифрованных снимков стереопары:

$m_1 = 10^4$, 100×100 точек, разрешение на местности по оси X составило 19 м, по оси Y – 12 м;

$m_2 = 4 \cdot 10^4$, 200×200 точек, разрешение на местности по оси X составило 8 м, по оси Y – 6 м;

$m_3 = 20 \cdot 10^4$, 400×500 точек, разрешение на местности по оси X составило 4 м, по оси Y – 2 м.

На рис. 3 приведен характерный вид зависимости нормированных относительно соответствующих ошибок математических ожиданий $m(\Delta X_i)$, $m(\Delta Y_i)$ и $m(\Delta R_i)$ и среднеквадратических отклонений $\sigma(\Delta X_i)$, $\sigma(\Delta Y_i)$ и $\sigma(\Delta R_i)$ ошибок для всех вариантов моделирования от максимальной линейной ошибки. Аналогичные зависимости от максимальной угловой ошибки, от числа функционалов в выборке и числа точек оцифрованных снимков выглядят так же.

Анализ зависимости оценок математических ожиданий и среднеквадратических отклонений от максимальной линейной ошибки навигационной системы показал следующее:

– оценки математических ожиданий ошибок линейных координат составляют до 60 % максимальной линейной ошибки. Это означает, что начальная ошибка, вызванная ошибками навигационной системы, после обработки по разработанному алгоритму уменьшается минимум в 2 раза, соответственно точность определения координат улучшается в 2 раза;

– оценки среднеквадратических отклонений линейных координат составляют 6...16 % для $m_1 = 10^4$ и 4...13 % для $m_2 = 4 \cdot 10^4$ и практически не зависят от вариантов моделирования. Увеличение точек оцифрованных снимков ведет к уменьшению оценки среднеквадратических отклонений линейных координат;

– аналогичные зависимости присутствуют и для оценок радиальных ошибок. Для оценок среднеквадратических отклонений диапазон значений несколько меньше, чем для линейных координат и составляет 3...10 % для $m_1 = 10^4$ и 2...8 % для $m_2 = 4 \cdot 10^4$ и практически также не зависит от вариантов моделирования. Увеличение точек оцифрованных снимков ведет к уменьшению оценки среднеквадратических радиальных ошибок.

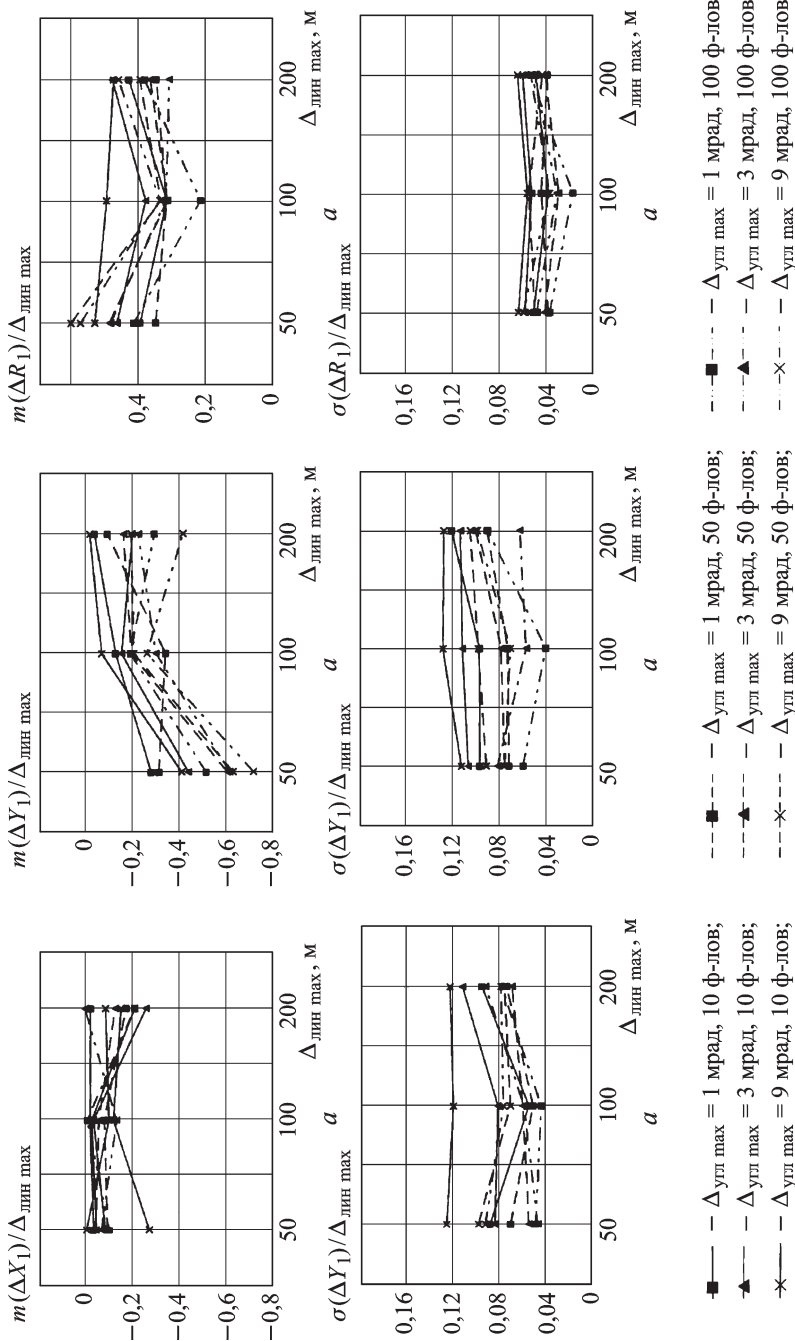


Рис. 3. Зависимость оценок математических ожиданий $m(\Delta X_1)$, $m(\Delta Y_1)$ и $m(\Delta R_1)$ и среднеквадратических отклонений $\sigma(\Delta X_1)$, $\sigma(\Delta Y_1)$ и $\sigma(\Delta R_1)$ от максимальной линейной ошибки ($m_2 = 4 \cdot 10^4$)

Анализ зависимости оценок математических ожиданий и среднеквадратических отклонений от максимальной угловой ошибки навигационной системы показал, что оценки математических ожиданий ошибок линейных координат также составляют до 60 % максимальной линейной ошибки. Это означает, что начальная линейная ошибка, вызванная угловыми ошибками навигационной системы, после обработки по разработанному алгоритму уменьшается минимум в 2 раза. Характер влияния угловых ошибок навигационной системы аналогичен влиянию линейных ошибок и принимает примерно такие же значения.

Анализ зависимости оценок математических ожиданий и среднеквадратических отклонений от числа функционалов в выборке показал следующее:

— оценки математических ожиданий ошибок линейных координат составляют до 40 % максимальной линейной ошибки;

— оценки среднеквадратических отклонений линейных координат составляют 5...16% для $m_1 = 10^4$ и 4...12% для $m_2 = 4 \cdot 10^4$. Увеличение точек оцифрованных снимков ведет к уменьшению оценки среднеквадратических отклонений линейных координат;

— следует отметить улучшение точности (уменьшение среднеквадратических отклонений) при увеличении числа функционалов в выборке. Так, увеличение числа функционалов в выборке с 10 до 100 приводит к снижению оценки с 11...12% до 4...8%, т.е. в 1,5...2 раза. Для числа точек оцифрованных снимков $m_2 = 4 \cdot 10^4$ эта зависимость приобретает практически линейный характер.

Увеличение числа точек оцифрованных снимков приводит к еще более существенному повышению точности оценки линейных координат.

При 10 функционалах в выборке максимальное значение математического ожидания составляет 14 % максимальной ошибки навигационной системы, среднеквадратические отклонения находятся в пределах 4 %. При увеличении числа функционалов в выборке до 50 точность увеличивается. Увеличение числа функционалов в выборке до 100 также приводит к уменьшению ошибки, однако в меньшей степени.

Таким образом, с увеличением числа точек оцифрованных снимков происходит уменьшение ошибок оценки линейных координат. В среднем ошибка не превышает 40 %, а точность — 10...12 %.

Выводы. В процессе проведения исследований разработана методика создания пространственной полутоновой модели местности стереоскопическим методом, позволяющая повысить информативность и достоверность данных воздушного фотографирования и одновременно сократить сроки их обработки. В методике используется комбинированный алгоритм, основанный на рекуррентно-поисковом оценивании.

В ходе выполнения экспериментальных исследований установлено, что разработанная методика получения полутоновой модели местности имеет высокие устойчивость и сходимость; при использовании

разработанной методики получения полутоновой модели местности в 2–3 раза повышается точность определения координат объектов воздушного фотографирования благодаря уменьшению начальной ошибки навигационной системы; ввиду зависимости точности разработанной методики получения полутоновой модели местности от числа точек оцифрованной стереопары разрешение на местности должно быть не менее 2 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров А. В. Моделирование на ЭВМ автоматического алгоритма распознавания изображения // Сб.: Науч.-метод. материалы. Автоматизация процессов сбора и обработки видеoinформации / Под ред. И.Н. Белоглазова. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1989.
2. Саакянц Ю. А., Степашкин В. Н. Численное исследование потенциальных возможностей автоматизированной системы обработки данных // Сб.: Науч.-метод. материалы. Автоматизация процессов сбора и обработки видеoinформации / Под ред. И.Н. Белоглазова. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1989.
3. Акимов В. Я., Кононыхин Б. Д., Харченко И. А. Автоматизация процесса определения координат объектов инженерной разведки в процессе предварительной обработки снимков // Материалы XIX Межвуз. ежегодной науч.-практич. конф. “Проблемы и перспективы совершенствования охраны Государственной границы”. – Калининград: КПИ ФСБ РФ, 2006.
4. Акимов В. Я., Харченко И. А. Автоматизация процесса формирования идентификационной пространственной полутоновой модели местности // В сб. науч. тр.: Средства инженерного вооружения. – Нахабино: ФГУП “15 ЦНИИ МО РФ”, 2006.
5. Дмитриев В. Г., Чирук Г. А. К вопросу создания пространственных полутоновых моделей местности как средстве топогеодезической информации // Науч. техн. сб. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева. – № 24. Ч. I. – 1997.
6. Харченко И. А. Расчет временной характеристики восприятия стереоизображений // Сб.: Науч.-метод. материалы. Автоматизация процессов сбора и обработки видеoinформации / Под ред. И.Н. Белоглазова. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1995.
7. Акимов В. Я., Кононыхин Б. Д., Харченко И. А. Обзор алгоритмов восстановления пространственных характеристик сцены по стереопаре изображений // Материалы XIX Межвуз. ежегодной науч.-практич. конф. “Проблемы и перспективы совершенствования охраны Государственной границы”. – Калининград: КПИ ФСБ РФ, 2006.
8. Колесник М. И. Автоматическое восстановление пространственных характеристик сцены по стереопаре изображений. Автореф. дис. . . канд. техн. наук. – М.: 1993.
9. Белоглазов И. Н., Вершинский А. В. Корреляционно-экстремальные и бесплатформенные системы навигации космических летательных аппаратов // Исследование космического пространства. – М.: ВИНТИ, 1972. – Т. 3.
10. Тарасенко В. П. Проблемы синтеза и анализа корреляционно-экстремальных систем. Т. 1 / В кн.: Адаптивные автоматические системы / Под ред. Г.А. Медведева. – М.: Сов. радио, 1972.
11. Белоглазов И. Н. Проблемы синтеза и анализа корреляционно-экстремальных систем. Т. 2 // В кн.: Адаптивные автоматические системы / Под ред. Г.А. Медведева. – М.: Сов. радио, 1972.

12. Белоглазов И. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы. – М.: Сов. радио, 1974.
13. Красовский А. А., Белоглазов И. Н., Чигин Г. П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. – М.: Наука, 1974.
14. Белоглазов И. Н., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1985.
15. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под ред. Е.А.Федосова. – М.: Дрофа, 2005.
16. Красовский А. А. Оптимальная фильтрация в теории корреляционно-экстремальных систем // Изв. АН СССР. Сер. “Техническая кибернетика”. – 1976. – № 3.
17. Белоглазов И. Н. Оптимальная фильтрация в корреляционно-экстремальных системах, использующих изображения местности // Изв. АН СССР. Сер. “Техническая кибернетика”. – 1977. – № 2.
18. Баклицкий В. К., Юрьев А. Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. – М.: Радио и связь, 1982.
19. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации пространственно-временных сигналов. – М.: Радио и связь, 1986.
20. Белоглазов И. Н. Ликвидация больших начальных отклонений в экстремальных корреляционных системах // В кн.: Поиск экстремума. – Томск: Изд-во ТГУ, 1969.
21. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Т.1. – М.: Сов. радио, 1961.
22. Белоглазов И. Н. Рекуррентно-поисковые алгоритмы оценивания. – ДАН СССР. – 1977. – Т.236. № 2.
23. Инерциальные навигационные системы // Науч.-техн. сб. № 5 (тематический). – М.: Изд-во ОВТИ 29 ЦНИИ МО РФ, 2003.

Статья поступила в редакцию 23.05.2007



Игорь Александрович Харченко родился в 1958 г., окончил Киевское высшее военное авиационное училище в 1981 г., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 1997 г. Канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника отдела ФГУ “15 Центральный научно-исследовательский испытательный институт им. Д.М. Карбышева” Минобороны России. Автор 26 научных работ в области обработки изображений и распознавания образов.

I.A. Kharchenko (b. 1958) graduated from the Kiev Higher Military Aviation School in 1981 and the Lomonosov Moscow State University in 1997. Ph. D. (Eng.), head of laboratory of 15th Central Research and Test Institute n.a. D.M. Karbyshev, RF

Ministry of Defense. Author of 26 publications in the field of image processing and identification.