

В.Г. Андронов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: vladia58@mail.ru)

Ю.Н. Волобуев, инженер-программист, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: mryura@bk.ru)

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ НА МАРШРУТЕ КОСМИЧЕСКОЙ СКАНЕРНОЙ СЪЁМКИ И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МАКЕТНЫХ СКАНЕРНЫХ СНИМКОВ

Рассмотрены задачи, связанные с предупреждением чрезвычайных ситуаций, оценкой и прогнозированием последствий стихийных бедствий. Показано, что эффективность решения этих задач в определяющей степени зависит от оперативности анализа сложившейся обстановки и текущего состояния объектов наблюдения на опасных территориях. При этом важнейшим источником информации для принятия решений являются космические снимки, прежде всего цифровые изображения, поскольку они могут быть переданы по высокоскоростным радиолиниям с борта космического аппарата на наземные пункты приёма космической информации сразу после съёмки. Среди них особую роль играют сканерные снимки, получаемые оптико-электронными сканирующими системами, поскольку последние наряду с высокой детальностью обеспечивают регистрацию обширных территорий.

В ходе наземной обработки снимков решаются две основные задачи, а именно, локализация объектов наблюдения на космических снимках, связанная с получением предварительных оценок и выдачей целеуказаний наземным силам и средствам для выполнения незамедлительных операций по ликвидации имеющихся угроз, и детальный анализ обстановки и текущего состояния объектов наблюдения с уточнением выданных ранее целеуказаний. При этом наиболее высокие требования по оперативности предъявляются к решению первой задачи. Они обусловлены необходимостью как можно быстрее найти расположение объектов наблюдения на обрабатываемых космических снимках.

Рассмотрены известные методы локализации объектов наблюдения на космических сканерных снимках, а именно, визуальные, фотограмметрические (прямые и итерационные), корреляционные и аппроксимационные. Показано, что в условиях огромного объёма поступающей на обработку видовой космической информации, с одной стороны, и ограниченных аппаратно-программных ресурсов наземных пунктов обработки космической информации, с другой стороны, наиболее приемлемы фотограмметрические методы локализации объектов наблюдения на маршруте съёмки. Известные фотограмметрические методы реализуются в интерактивном режиме и не требуют больших вычислительных ресурсов, поскольку они основаны на простых алгебраических вычислениях в каждой итерации для одной точки снимка. Вместе с тем, область применения метода критична к длительности обрабатываемого маршрута съёмки, поскольку наряду с технологическими операциями, выполняемыми в автоматическом режиме (выделение фрагментов изображения), содержит выполняемые оператором операции визуальной оценки наличия в них объектов наблюдения.

Для устранения отмеченных недостатков предложена и рассмотрена методика автоматической локализации объектов наблюдения на космических сканерных снимках обширных территорий путём организации их фотограмметрической обработки. Для проверки работоспособности методики и исследования её эффективности разработан алгоритм построения макетных сканерных снимков на поверхности общего земного эллипсоида.

Ключевые слова: оценка и прогнозирование последствий стихийных бедствий, локализация объектов наблюдения на космических снимках обширных территорий, оптико-электронные сканирующие системы, макетный сканерный снимок, фотограмметрическая обработка.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-2-60-71

Ссылка для цитирования: Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н. Методика автоматической локализации объектов наблюдения на маршруте космической сканерной съёмки и алгоритм построения макетных сканерных снимков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 60-71.

Введение

Для решения задач, связанных с предупреждением чрезвычайных ситуаций,

оценкой и прогнозированием последствий стихийных бедствий, важнейшим источником информации являются космические снимки, прежде всего цифро-

вые изображения, поскольку они могут быть переданы по высокоскоростным радиолиниям с борта космического аппарата на наземные пункты приёма космической информации сразу после съёмки. Среди них особую роль играют сканерные снимки, получаемые оптико-электронными сканирующими системами (ОЭСС), поскольку последние наряду с высокой детальностью обеспечивают регистрацию обширных территорий. В ходе наземной обработки снимков в первую очередь решается задача локализации объектов наблюдения на космических снимках и предварительной оценки обстановки и текущего состояния объектов наблюдения. При этом предъявляются очень жёсткие требования к оперативности, обусловленные необходимостью как можно быстрее найти расположение объектов наблюдения на обрабатываемых космических снимках. Для решения этой задачи в условиях огромного объёма поступающей на обработку видовой космической информации, с одной стороны, и ограниченных аппаратно-программных ресурсов наземных пунктов обработки кос-

мической информации, с другой, наиболее приемлемы фотограмметрические методы. Для сканерных снимков, получаемых ОЭСС, характерна большая протяжённость маршрута съёмки, вследствие чего задача математического описания автоматического позиционирования объекта наблюдения на маршруте съёмки по его известным пространственным координатам на земной поверхности, имеет важное прикладное значение.

Математическая постановка задачи

На борту космического аппарата (КА) в фокальной плоскости (ФП) оптико-электронной сканирующей системы (ОЭСС) расположены в два ряда в шахматном порядке матрицы ПЗС (рис.1), работающие во время включения съёмочной аппаратуры в режиме задержки и накопления (ВЗН) зарядовых пакетов [1-3].

Положим, что нечетный ряд * матриц находится впереди чётного **, а их порядковые номера $\lambda = \overline{1, \Lambda}$ возрастают слева направо, если смотреть по направлению полёта КА.

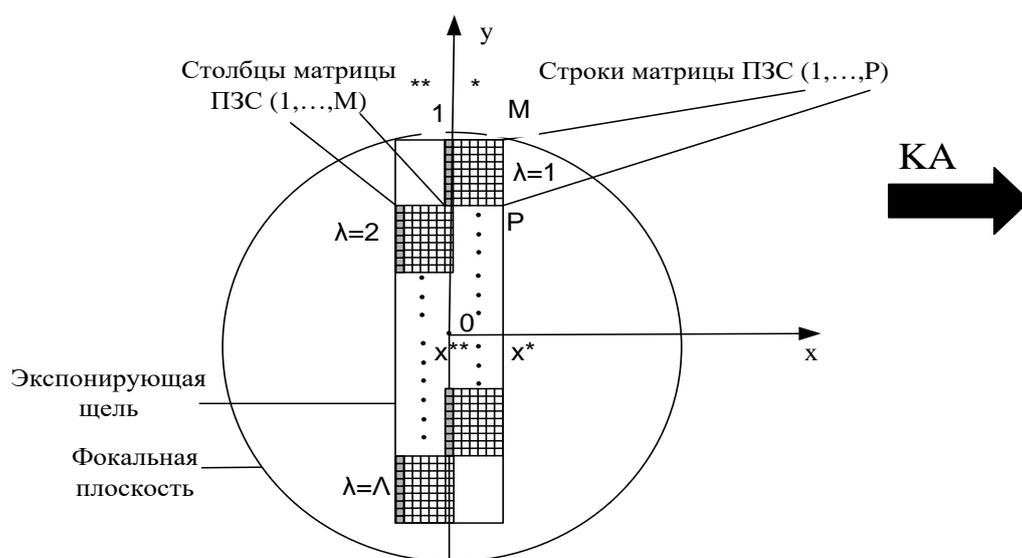


Рис. 1. Топология матриц ПЗС в ФП ОЭСС

Каждая матрица состоит из $p = \overline{1, P}$ строк и $m = \overline{1, M}$ столбцов датчиков ПЗС, которые имеют геометрические размеры $\Delta l_x, \Delta l_y$ и порядковые номера $n = \overline{1, N}$ вдоль ЭЩ, где $N = \Lambda \cdot P$. При этом геометрический центр экспонирующей щели (точка O) совпадает с главной точкой ФП и началом системы координат (СК) Oxy , ось Ox которой проходит через геометрические центры первых и последних столбцов датчиков ПЗС соответственно нечётного и чётного ряда матриц, и направлена в сторону первой матрицы.

Ось Ox проходит в направлении движения КА через геометрические центры датчиков ПЗС первой строки матрицы $\lambda = \Lambda/2 + 1$.

Положение датчиков ПЗС в СК Oxy описывается их плоскими координатами $\{x, y\}$, где $x \in (x^*, x^{**}), y \in (-N/2 \cdot \Delta l_y + \Delta l_y/2, N/2 \cdot \Delta l_y - \Delta l_y/2)$, $x^* = M \cdot \Delta l_x$, $x^{**} = 0$. Геометрическая структура цифрового изображения маршрута съёмки, как показано в работах [4-7], представляет собой упорядоченную матрицу пикселей (рис. 2).

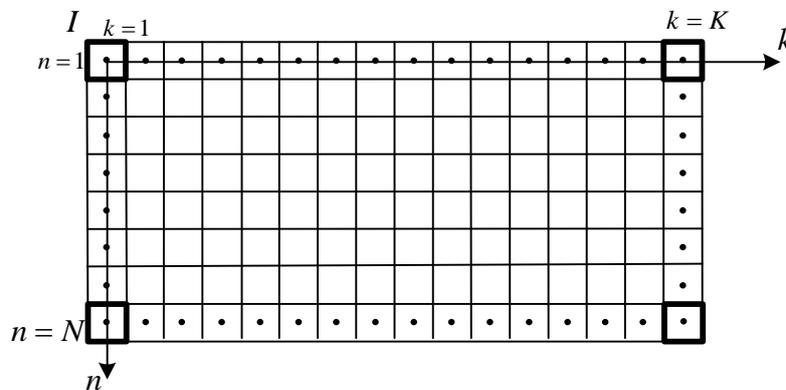


Рис. 2. Геометрическая структура маршрута сканерной съёмки

Положение пикселей в этой структуре определяется их порядковыми номерами $k = \overline{1, K}, n = \overline{1, N}$, где k -порядковый номер строки, содержащей пиксель, n -порядковый номер пикселя в строке, а размер – форматом $\Delta l_x \times \Delta l_y$ датчика ПЗС. Система координат маршрута съёмки Ikn называется пиксельной и является дискретной. Начало отсчёта I расположим в геометрическом центре первого пикселя первой строки изображения, ось Ik (ось отсчетов порядковых номеров строк) направим в сторону увеличения порядковых номеров строк изображения через геометрические центры их первых пикселей, ось In (ось отсчетов порядковых номеров пикселей в строке) – в сторону увеличения порядковых номеров

пикселей первой строки через их геометрические центры.

Математическую постановку задачи сформулируем следующим образом. Пусть известна векторно-матричная фотограмметрическая модель

$$R = R_S(t) + \mu(t) \cdot A(t) \cdot r(t), \quad (1)$$

которая в обратной схеме построения связи проектирующих лучей (СПЛ) для каждого фиксированного момента времени t формирования строк маршрута сканерной съёмки устанавливает функциональную связь между гринвичскими $R = (X, Y, Z)^T$ и плоскими $r(t) = (x(t), y(t), f)^T$ координатами точек пересечения линии визирования (ЛВ) соответственно с земной поверхностью и ФП ОЭСС, где f – фокусное расстояние ОЭСС, $R_S = (X_S(t), Y_S(t), Z_S(t))^T$

гринвичские координаты центра проекции S (центра масс КА), $A(t)$ -матрица направляющих косинусов, описывающих в момент времени t угловую ориентацию осей СК Оху относительно осей гринвичской СК, $\mu(t)$ -коэффициент пропорциональности. При этом, как было показано выше, $x(t), y(t)$ -плоские координаты датчика ПЗС, находящегося в момент времени t в точке пересечения ЛВ с ФП ОЭСС, а X, Y, Z -гринвичские координаты точки пересечения этой же ЛВ с земной поверхностью.

Будем считать, что известны следующие данные:

– гринвичские координаты X, Y, Z некой точки земной поверхности, находящейся в априорно неизвестном месте полосы захвата съёмочной аппаратуры;

– упорядоченная по времени на интервале съёмки (t_0, t_K) последовательность бортовых измерений значений гринвичских координат, скоростей КА и элементов матрицы направляющих косинусов $A(t)$

$$\left\{ \begin{array}{l} < t_h, X_S(t_h), Y_S(t_h), Z_S(t_h), \\ \dot{X}_S(t_h), \dot{Y}_S(t_h), \dot{Z}_S(t_h), a_{ij}(t_h) > \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $h = \overline{1, \mathcal{H}}$ - порядковый номер точки бортовых измерений; $t_h \in (t_0, t_K)$;

конструктивные характеристики ОЭСС: $\Delta l_x, \Delta l_y, K, N, M, P, f, \Lambda$.

Задачу автоматической локализации объекта наблюдения на маршруте космической сканерной съёмки сформулируем вербально как задачу нахождения порядковых номеров \bar{k}, \bar{n} пикселя изображения точки земной поверхности с известными пространственными координатами X, Y, Z , а математически – в виде задачи поиска функции отображения [8]

$$F: \{X, Y, Z\} \rightarrow \{\bar{k}, \bar{n}\}. \quad (3)$$

Методика локализации объекта наблюдения на маршруте космической сканерной съёмки

Для решения поставленной задачи воспользуемся фотограмметрической векторно-матричной моделью

$$\mathbf{r}(t) = \frac{1}{\mu(t)} \cdot A^T(t) \cdot (\mathbf{R} - \mathbf{R}_S(t)), \quad (4)$$

описывающей космическую сканерную съёмку в прямой схеме построения СПЛ [9,10]. Представим векторно-матричное уравнение (4) в координатной форме, выразим из третьего уравнения коэффициент $1/\mu(t)$ и, подставив найденное выражение в остальные уравнения, получим:

$$\begin{aligned} x(t) &= f \cdot \frac{a_{11}(t)(X - X_S(t)) + a_{21}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{31}(t)(Z - Z_S(t))}{a_{13}(t)(X - X_S(t)) + a_{23}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{33}(t)(Z - Z_S(t))}; \\ y(t) &= f \cdot \frac{a_{12}(t)(X - X_S(t)) + a_{22}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{32}(t)(Z - Z_S(t))}{a_{13}(t)(X - X_S(t)) + a_{23}(t)(Y - Y_S(t)) + a_{33}(t)(Z - Z_S(t))}. \end{aligned} \quad (5)$$

Введём следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \Phi_X(t) &= a_{11}^{\oplus} [X - X_S^{\oplus}] + a_{21}^{\oplus} [Y - Y_S^{\oplus}] + a_{31}^{\oplus} [Z - Z_S^{\oplus}]; \\ \Phi_Y(t) &= a_{12}^{\oplus} [X - X_S^{\oplus}] + a_{22}^{\oplus} [Y - Y_S^{\oplus}] + a_{32}^{\oplus} [Z - Z_S^{\oplus}]; \\ \Phi_Z(t) &= a_{13}^{\oplus} [X - X_S^{\oplus}] + a_{23}^{\oplus} (t) [Y - Y_S^{\oplus}] + a_{33}^{\oplus} [Z - Z_S^{\oplus}]. \end{aligned} \quad (6)$$

В системе уравнений (6) верхний индекс \oplus над параметрами обозначает, что они являются многочленами вида

$$E^{\oplus} = \xi_0 + \xi_1 \cdot t + \xi_2 \cdot t^2 + \dots + \xi_n \cdot t^n, \quad (7)$$

параметры которых $\{\xi_k | k = \overline{0, n}\}$ с заданной точностью аппроксимируют последовательности из известных по условиям задачи дискретных значений (2). Запишем это условие более подробно.

$$\begin{cases} X_S^{\oplus} \\ Y_S^{\oplus} \\ Z_S^{\oplus} \end{cases} = \begin{pmatrix} \xi_0^{(X)} \\ \xi_0^{(Y)} \\ \xi_0^{(Z)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi_1^{(X)} \\ \xi_1^{(Y)} \\ \xi_1^{(Z)} \end{pmatrix} \cdot t + \begin{pmatrix} \xi_2^{(X)} \\ \xi_2^{(Y)} \\ \xi_2^{(Z)} \end{pmatrix} \cdot t^2 + \dots \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{X}_S^{\oplus} \\ \dot{Y}_S^{\oplus} \\ \dot{Z}_S^{\oplus} \end{cases} = \begin{pmatrix} \xi_0^{(\dot{X})} \\ \xi_0^{(\dot{Y})} \\ \xi_0^{(\dot{Z})} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi_1^{(\dot{X})} \\ \xi_1^{(\dot{Y})} \\ \xi_1^{(\dot{Z})} \end{pmatrix} \cdot t + \begin{pmatrix} \xi_2^{(\dot{X})} \\ \xi_2^{(\dot{Y})} \\ \xi_2^{(\dot{Z})} \end{pmatrix} \cdot t^2 \dots \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} a_{11}^{\oplus} \\ a_{12}^{\oplus} \\ a_{13}^{\oplus} \\ a_{21}^{\oplus} \\ a_{22}^{\oplus} \\ a_{23}^{\oplus} \\ a_{31}^{\oplus} \\ a_{32}^{\oplus} \\ a_{33}^{\oplus} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_0^{(11)} & a_1^{(11)} & a_2^{(11)} & \dots \\ a_0^{(12)} & a_1^{(12)} & a_2^{(12)} & \dots \\ a_0^{(13)} & a_1^{(13)} & a_2^{(13)} & \dots \\ a_0^{(21)} & a_1^{(21)} & a_2^{(21)} & \dots \\ a_0^{(22)} & a_1^{(22)} & a_2^{(22)} & \dots \\ a_0^{(23)} & a_1^{(23)} & a_2^{(23)} & \dots \\ a_0^{(31)} & a_1^{(31)} & a_2^{(31)} & \dots \\ a_0^{(32)} & a_1^{(32)} & a_2^{(32)} & \dots \\ a_0^{(33)} & a_1^{(33)} & a_2^{(33)} & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t^0 \\ t^1 \\ t^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (10)$$

Поскольку параметры $x(t)$, $y(t)$ есть плоские координаты x , y датчика ПЗС в СК Оху и в зависимости от принадлежности датчика ПЗС к чётному или нечётному ряду матриц ПЗС координата x может принимать только два значения, а именно, $x = x^{**} = 0$ или $x = x^* = M \cdot \Delta l_x$, после несложных преобразований получим следующую систему уравнений [11-12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi(t) = \begin{cases} \Phi_x(t) = 0, \text{ если } \lambda \in \lambda^{**}; \\ M \cdot \Delta l_x \cdot \Phi_z(t) - f \cdot \Phi_x(t) = 0, \\ \text{если } \lambda \in \lambda^*; \end{cases} \\ y = f \cdot \frac{\Phi_y(t)}{\Phi_z(t)}; \\ \Phi_z(t) \neq 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

Первое уравнение системы (11) есть функционал $\Phi(t)$, который в зависимости

от принадлежности датчика ПЗС к чётному или нечётному ряду матриц ПЗС описывается первым или вторым уравнением. При этом, как видно из (6) - (10), многочлены $a_{ij}^{\oplus}(t)$ и $X_S^{\oplus}(t)$, $Y_S^{\oplus}(t)$, $Z_S^{\oplus}(t)$ зависят только от времени. В этих условиях функции $\Phi_x(t)$, $\Phi_y(t)$, $\Phi_z(t)$ и сам функционал $\Phi(t)$ монотонны и дифференцируемы на всём интервале съёмки. В таком случае оба уравнения для $\Phi(t)$ имеют единственное решение, и оно может быть получено любым известным вычислительным методом, например, деления отрезка пополам, касательной, хорд и т.д. [13-14].

Основная проблема решения системы уравнений (11) состоит в неопределённости вида функционала $\Phi(t)$, поскольку априорно неизвестен ряд матриц ПЗС, в котором расположен датчик ПЗС,

сформировавший в момент времени t изображение точки земной поверхности с координатами X, Y, Z , а значит априорно неизвестно, какое значение имеет координата x в (11). Учитывая изложенное,

особенностью предлагаемой методики решения задачи является проведение гипотез о положении зарядовых пакетов в матрицах ПЗС в момент формирования изображений этих точек (рис. 3).

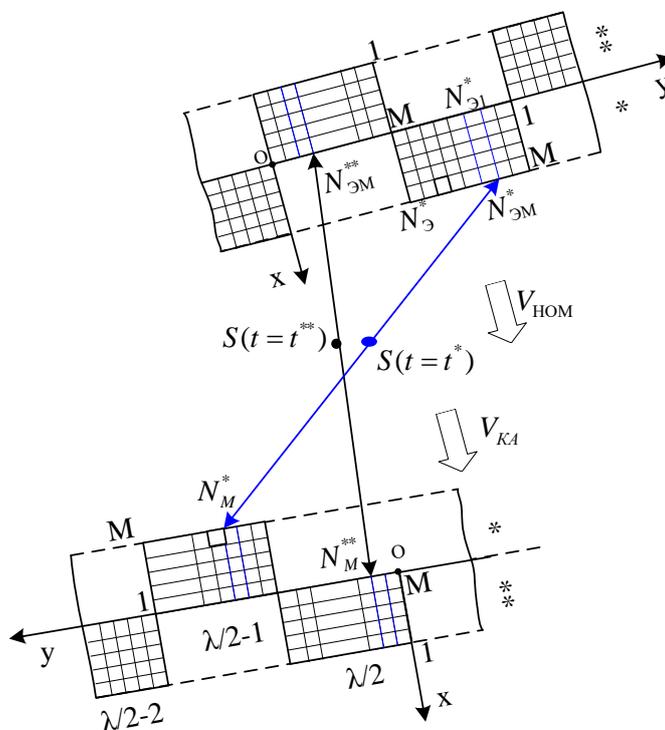


Рис. 3. Геометрическая иллюстрация проведения гипотез

Поскольку мы имеем дело с уже сформировавшимся маршрутом изображения, момент времени t формирования некоторой точки N земной поверхности в матрицах ПЗС может быть связан только с геометрическими центрами последних столбцов нечётного или чётного ряда матриц ПЗС. При этом, если это нечётный ряд, то координата x в первом уравнении для $\Phi(t)$ в системе (11) должна быть равна $M \cdot \Delta l_x$, а если чётный – то нулю. В соответствии с этим положим, что изображение некоторой точки N земной поверхности с известными гринвичскими координатами X, Y, Z сформировано в одной из матриц ПЗС чётного ряда, например в матрице $\lambda = \Lambda/2$. Тогда в соответствии с физикой процесса ВЗН зарядовых

пакетов в момент времени t окончания цикла ВЗН и формирования изображения точки земной поверхности N_M^{**} зарядовые пакеты должны находиться в точке $N_{ЭМ}^{**}$ формирующего края чётного ряда матриц ПЗС, т.е. в датчике ПЗС столбца M с абсциссой $x = x^{**} = 0$.

Для проверки выполнения гипотезы выбирается условие $x=0$ и из решения первого для $\Phi(t)$ уравнения определяется время $t = \bar{t}$, а из второго уравнения системы (7) – ордината $y = \bar{y}$ датчика ПЗС. После этого по формуле

$$n = \bar{E} \left[N/2 - y / \Delta l_y + 0,5 \right], \quad (12)$$

вычисляется значение $n = \bar{n}$, где \bar{E} – оператор округления числа в большую сторону, если мантисса числа больше 0,5, и в

меньшую сторону, если мантисса меньше 0,5. Если найденное значение \bar{n} таково, что рассчитанный в соответствии с формулой

$$\lambda = \begin{cases} \ell + 1, & \text{если } n / P = \ell + \Delta\ell; \\ \ell, & \text{если } n / P = \ell \end{cases} \quad (13)$$

порядковый номер λ матрицы ПЗС является чётным, т.е. $\lambda \in \lambda^{**}$, то гипотеза считается подтверждённой и искомым параметрам присваиваются полученные выше значения, где ℓ – целая часть числа, $\Delta\ell$ – мантисса числа,

В противном случае считается, что зарядовые пакеты находятся в начале цикла ВЗН в нечётном ряду матриц ПЗС, например в точке $N_{Э1}^*$ первого столбца матрицы ПЗС $\lambda = \frac{\Lambda}{2} - 1$ с абсциссой $x = x^* = M \cdot \Delta l_x$. Тогда время $t = t^*$ находится из решения второго для $\Phi(t)$ уравнения. После этого из второго уравнения системы (11) определяют новое значение $y(t^*) = y_M^*$, а затем по формуле (12) – значение $n_M = n^*$. Проверка: вычисленный по формуле (13) порядковый номер матрицы ПЗС должен быть нечётным, т.е. $\lambda \in \lambda^*$.

Рассмотрим более подробно порядок решения уравнений для $\Phi(t)$. Функционалы $\Phi_X(t), \Phi_Y(t), \Phi_Z(t)$, как показано выше, зависят только от времени, непрерывны и дифференцируемы на всём интервале времени съёмки (t_0, t_K) , поскольку все входящие в него многочлены непрерывно дифференцируемы по этой переменной. Тогда в соответствии со следствием из первой теоремы Больцано-Коши значения функционала $F(t) = 0$ в начале $F(t_0)$ и в конце $F(t_K)$ интервала съёмки будут иметь противоположные знаки, а оба уравнения для $F(t)$ – единственное решение.

Учитывая изложенное, оба уравнения для $F(t)$ в системе (11) решаются с любой наперёд заданной точностью $|\Delta t_k|$ методом хорд [15-17]. С учётом того, что максимальная точность позиционирования точки на изображении ограничивается размером половины элемента изображения, в качестве величины $|\Delta t_k|$ целесообразно принять величину, соответствующую половине тактового времени τ_T накопления заряда в матрице ПЗС. В данном случае значение $|\Delta t_k|$ для рассматриваемого типа ОЭСС составит величину порядка $1 \cdot 10^{-5}$ секунды. Формула для расчёта значения t_k в каждой итерации имеет следующий вид [18]:

$$t_k = \frac{t_0 \cdot F(t_K) - t_K \cdot F(t_0)}{F(t_K) - F(t_0)},$$

где t_0, t_K – известные по условиям задачи значения аргумента функционала $F(t)$ на левом и правом концах отрезка, содержащего корень; $F(t_0), F(t_K)$ – значения функционала $F(t)$ соответственно при аргументах t_0 и t_K , найденные в соответствии с выражениями (6)-(11).

В качестве начальных приближений при расчёте t_k принимают значения времени включения t_0 и времени выключения t_K съёмочной аппаратуры, которым соответствуют значения функционала $F(t_0)$ и $F(t_K)$. Результатом решения уравнения является момент времени t^* или t^{**} , который с точностью $1 \cdot 10^{-5}$ секунды соответствует значению t_k .

Для проверки работоспособности и исследования эффективности предлагаемой методики разработан алгоритм построения макетного сканерного снимка

маршрута съёмки. Он включает в себя следующие шесть основных операций.

1. По известным на момент прохождения КА экватора Земли элементам кеплеровской орбиты $\{a, e, i, \Omega, \omega_{II}, \vartheta(t_0)\}$, выбранную дату съёмки и заданным геодезическим координатам B_E, L_E точки E на поверхности общего земного эллипсоида, находят такие значения долготы восходящего узла Ω_E , истинной аномалии орбиты $\vartheta(t_E)$, истинного звёздного S_E и московского времени t_E включения съёмочной аппаратуры, которые должны обеспечить совпадение точки E с подспутниковой точкой КА. Эта процедура называется прокладкой трассы КА через заданную точку земной поверхности и подробно описана в работе авторов [18].

2. По элементам кеплеровской орбиты $\{a, e, i, \Omega_E, \omega_{II}, \vartheta(t_E)\}$ рассчитываются гринвичские координаты и составляющие скорости движения КА $X_S(t_0), Y_S(t_0), Z_S(t_0), \dot{X}_S(t_0), \dot{Y}_S(t_0), \dot{Z}_S(t_0)$ на момент времени включения съёмочной аппаратуры $t_0 = t_E$.

3. Далее задаётся режим, начальный ракурс $\alpha(t_0), \beta(t_0)$ и азимут съёмки $\chi(t_0)$. Например, режим с постоянным ракурсом съёмки, при котором $\alpha(t_0) = \alpha(t_K) = \text{const}$, $\beta(t_0) = \beta(t_K) = \text{const}$, $\chi(t_0) = \chi(t_K) = \text{const}$, после чего вычисляются значения элементов $a_{ij}(t_0)$ матрицы направляющих косинусов $A(t_0)$, направляющие косинусы центральной линии визирования

$L^0_{\langle 3 \rangle}(t_0) = (L^0_x(t_0), L^0_y(t_0), L^0_z(t_0))$ при $n=N/2$, $\lambda = \Lambda/2$ и линий визирования $L^n_{\langle 3 \rangle}(t_0)$ с датчиков ПЗС $n = 1$ и $n=N$, расположенных в крайних матрицах с номерами $\lambda = 1$ ($x = M \cdot \Delta l_x$) и $\lambda = \Lambda$ ($x = 0$).

4. После этого моделируются бортовые измерения параметров съёмки, для чего на интервале съёмки (t_0, t_K) формируется множество точек $h = \overline{1, H}$, для которых задаются значения $t_h \in (t_0, t_K)$ и рассчитываются значения параметров

$$\left\{ \begin{array}{l} < t_h, X_S(t_h), Y_S(t_h), Z_S(t_h), \\ \dot{X}_S(t_h), \dot{Y}_S(t_h), \dot{Z}_S(t_h), a_{ij}(t_h) > \end{array} \right\}.$$

5. По методу наименьших квадратов рассчитываются значения коэффициентов многочленов замещающих моделей (8) - (10) линейных и угловых ЭВО маршрута съёмки.

6. Задаётся множество порядковых номеров $\{k_i, n_j\}$ пикселей сканерного снимка маршрута съёмки, где $i = h$, для которых по формулам, приведенным в работах авторов [1-5], вычисляются геодезические и гринвичские координаты на поверхности общего земного эллипсоида.

Предлагаемый алгоритм построения макетного сканерного снимка в отличие от известных не требует использования цифровых моделей местности и инвариантен к выбору района расположения тестового участка в пределах всей поверхности Земли, что может иметь важное значение при моделировании ряда задач, связанных с фотограмметрической обработкой космических сканерных снимков.

Список литературы

1. Волобуев Ю.Н., Заичко В.А., Андронов В.Г. Модель дрейфа связки проектирующих лучей в фокальной плоскости оптико-электронной сканирующей системы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. №1. С.166-170.

2. Андронов В.Г., Заичко В.А., Волобуев Ю.Н. Формирование связки проектирующих лучей в космической оптико-электронной сканирующей системе // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. №1. С.15-19.

3. Андронов В.Г. Орбитальный метод планово-высотной координатной привязки одиночных космических изображений // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка: сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2009. № 2-2. С. 211-215.

4. Андронов В.Г. Построение макетных снимков местности в режимах маршрутной космической съёмки // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 5. С. 56-62.

5. Андронов В.Г., Клочков И.А. Фотограмметрическая модель космических сканерных изображений // Известия высших учебных заведений Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. №2. С.56-63.

6. Андронов В.Г. Координатно-временная аппроксимация фотограмметрических моделей космических сканерных изображений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. №1. С.147-151.

7. Координатно-временная модель формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, И.А. Клочков, Ю.Н. Волобуев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011. Т.54. №.9. С. 83-85.

8. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н. Общая постановка и решение обратной фотограмметрической задачи для космических сканерных изображений // Известия

высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 4. С. 53-58.

9. Андронов В.Г. Геометрическая модель построения связки проектирующих лучей в оптико-электронной сканирующей системе // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 1. С. 242-245.

10. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н., Шутяев А.С. Определение начального ракурса космической сканерной съёмки в задачах планирования дистанционного зондирования земли // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч. Курск, 2016. С. 203-207.

11. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н., Фисенко Е.М. Построение замещающих моделей элементов внешнего ориентирования космических сканерных снимков в режиме с постоянным ракурсом съёмки // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч. Курск, 2016. С. 214-219.

12. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н., Дремова С.О. Построение замещающих моделей элементов внешнего ориентирования космических сканерных снимков в режиме с изменяющимся азимутом съёмки // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч. Курск, 2016. С. 207-214.

13. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н., Фрундин А.Г. Построение замещающих моделей элементов внешнего ориентиро-

вания космических сканерных снимков в режиме с фиксированным азимутом съёмки // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч. Курск, 2016. С. 219-225.

14. Андронов В.Г., Емельянов С.Г. Автономное определение элементов внешнего ориентирования космических снимков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2 (19). С. 77-87.

15. Андронов В.Г. Априорная оценка качества космической оптико-электронной съёмки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, ин-

форматика. Медицинское приборостроение. 2014. № 1. С. 36-40.

16. Андронов В.Г. Технология априорной оценки качества сканерных изображений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. № 3 (54). С. 8-12.

17. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н. Метод аппроксимирующих функций в задачах фотограмметрической обработки космических сканерных изображений высокого разрешения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 5 (50). С. 251-259.

18. Андронов В.Г., Волобуев Ю.Н. Прокладка трассы космического аппарата через заданную точку земной поверхности // Научные технологии. 2012. Т. 13. № 9. С. 31-33.

Поступила в редакцию 06.02.17

UDC 528.72; 528.721.1

V.G. Andronov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: vladia58@mail.ru)

Y.N. Volobujev, Engineer, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: mryura@bk.ru)

A TECHNIQUE OF AUTOMATIC LOCALIZATION OF SURVEILLANCE OBJECTS ON THE ROUTE OF SPACE SCANNER SURVEY AND THE ALGORITHM OF CONSTRUCTING PROTOTYPE SCANNER IMAGES

The article considers the tasks related to the prevention of emergency situations and the assessment and prediction of the consequences of natural disasters. It is shown that the effectiveness of these problems solution depends to a high degree on the efficiency of the analysis of the existing situation and the current state of the objects of surveillance in hazardous areas. At the same time, the most important source of information for decision-making are space images, primarily digital images, since they can be transmitted over high-speed radio-frequency transmission lines from the spacecraft to ground space information receiving points immediately after the survey. Scanner images obtained by optoelectronic scanning systems are among them and of special importance, since optoelectronic scanning systems ensure the registration of vast territories with high detail.

During the ground images processing, two main tasks are solved, namely, the localization of surveillance objects in satellite imagery, connected with obtaining preliminary assessments and issuing target designations to ground forces and facilities for performing immediate operations aimed at eliminating existing threats, and detailed analysis of the situation and the current state of the surveillance objects with the clarification of previously issued target designations. In this case, the highest requirements for operational response are imposed on the solution of the first task. They are caused by the need to find the location of surveillance objects on the space imagery being processed as soon as possible.

The known techniques of the localization of surveillance objects on space scanner images, namely, visual, photogrammetric (direct and iterative), correlation and approximation ones are considered. It is shown that on the one hand, in conditions of a huge amount of incoming for processing specific space information, and limited hardware and software resources of ground stations for processing space information, on the other hand, photogrammetric techniques for localizing surveillance objects on the survey route are the most acceptable ones. The known photogrammetric techniques are applied in the interactive mode and do not require large computational resources, since they are based on simple algebraic calculations in each iteration for a single point of an image. At the same time, the scope of the technique is critical to the duration of the survey route being processed, since along with the technological operations performed in the automatic mode (selection of image fragments) it contains the operations of the operator performing a visual assessment of the presence of surveillance objects in images.

To eliminate the identified shortcomings, a technique for automatic localization of surveillance objects in space scanner images of vast territories by organizing their photogrammetric processing was proposed and considered. To test the efficiency of the technique and to study its effectiveness, an algorithm for constructing prototype scanner images on the surface of a common terrestrial ellipsoid has been developed.

Key words: assessment and prediction of the consequences of natural disasters, localization of surveillance objects in space images of vast territories, optoelectronic scanning systems, prototype scanner image, photogrammetric processing.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-2-60-71

For citation: Andronov V.G., Volobuev Y.N. A Technique of Automatic Localization of Surveillance Objects on the Route of Space Scanner Survey and the Algorithm of Constructing Prototype Scanner Images, Proceeding of Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 2(71), pp. 60-71 (in Russ.).

Reference

1. Volobuev Ju.N., Zaichko V.A., Andronov V.G. Model' dreyfa svjazki proektirujushhijh luchej v fokal'noj ploskosti optiko-jelektronnoj skanirujushhej sistemy // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2013. №1. S.166-170.
2. Andronov V.G., Zaichko V.A., Volobuev Ju.N. Formirovanie svjazki proektirujushhijh luchej v kosmicheskoy optiko-jelektronnoj skanirujushhej sisteme // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2013. №1. S.15-19.
3. Andronov V.G. Orbital'nyj metod planovo-vysotnoj koordinatnoj privjazki odinochnyh kosmicheskikh izobrazhenij // Prilozhenie k zhurnalu Izvestija vuzov. Geodezija i ajerofotos#emka: sbornik statej po itogam nauchno-tehnicheskoy konferencii. 2009. № 2-2. S. 211-215.
4. Andronov V.G. Postroenie maketnyh snimkov mestnosti v rezhimah marshrutnoj kosmicheskoy s#jomki // Izvestija vysshijh uchebnyh zavedenij. Geodezija i ajerofotosemka. 2013. № 5. S. 56-62.
5. Andronov V.G., Klochkov I.A. Fotogrammetricheskaja model' kosmicheskikh skanernyh izobrazhenij // Izvestija vysshijh uchebnyh zavedenij Ser. Geodezija i ajerofotosjomka. 2010. №2. S.56-63.
6. Andronov V.G. Koordinatno-vremennaja approksimacija fotogrammetricheskikh modelej kosmicheskikh skanernyh izobrazhenij // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2013. №1. S.147-151.
7. Koordinatno-vremennaja model' formirovanija kosmicheskikh skanernyh izobrazhenij linejkami matric PZS / V.G. Andronov, S.V. Degtjar'ov, I.A. Klochkov, Ju.N. Volobuev // Izvestija vysshijh uchebnyh zavedenij. Priborostroenie. 2011. T.54. №.9. S. 83-85.

8. Andronov V.G., Volobuev Ju.N. Obshhaja postanovka i reshenie obratnoj fotogrammetricheskoj zadachi dlja kosmicheskikh skanernyh izobrazhenij // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geodezija i ajerofotosemka. 2011. № 4. S. 53-58.

9. Andronov V.G. Geometricheskaja model' postroenija svjazki proektirujushhijh luchej v optiko-jelektronnoj skanirujushhej sisteme // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2013. № 1. S. 242-245.

10. Andronov V.G., Volobuev Ju.N., Shutjaev A.S. Opredelenie nachal'nogo rakursa kosmicheskoi skanernej s#jomki v zadachah planirovanija distancionnogo zondirovanija zemli // Infokommunikacii i informacionnaja bezopasnost': sostojanie, problemy i puti reshenija: sbornik nauchnyh statej po materialam III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii: v 2 ch. Kursk, 2016. S. 203-207.

11. Andronov V.G., Volobuev Ju.N., Fisenko E.M. Postroenie zameshhajushhijh modelej jelementov vneshnego orientirovanija kosmicheskikh skanernyh snimkov v rezhime s postojannym rakursom s#jomki // Infokommunikacii i informacionnaja bezopasnost': sostojanie, problemy i puti reshenija: sbornik nauchnyh statej po materialam III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii: v 2 ch. Kursk, 2016. S. 214-219.

12. Andronov V.G., Volobuev Ju.N., Dremova S.O. Postroenie zameshhajushhijh modelej jelementov vneshnego orientirovanija kosmicheskikh skanernyh snimkov v rezhime s izmenjajushhimsja azimutom s#jomki // Infokommunikacii i informacionnaja bezopasnost': sostojanie, problemy i puti reshenija: sbornik nauchnyh statej po

materialam III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii: v 2 ch. Kursk, 2016. S. 207-214.

13. Andronov V.G., Volobuev Ju.N., Frundin A.G. Postroenie zameshhajushhijh modelej jelementov vneshnego orientirovanija kosmicheskikh skanernyh snimkov v rezhime s fiksirovannym azimutom s#jomki // Infokommunikacii i informacionnaja bezopasnost': sostojanie, problemy i puti reshenija: sbornik nauchnyh statej po materialam III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii: v 2 ch. Kursk, 2016. S. 219-225.

14. Andronov V.G., Emel'janov S.G. Avtonomnoe opredelenie jelementov vneshnego orientirovanija kosmicheskikh snimkov // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2016. № 2 (19). S. 77-87.

15. Andronov V.G. Apriornaja ocenka kachestva kosmicheskoi optiko-jelektronnoj s#jomki // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie. 2014. № 1. S. 36-40.

16. Andronov V.G. Tehnologija apriornoj ocenki kachestva skanernyh izobrazhenij // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. № 3 (54). S. 8-12.

17. Andronov V.G., Volobuev Ju.N. Metod approksimirujushhijh funkcij v zadachah fotogrammetricheskoi obrabotki kosmicheskikh skanernyh izobrazhenij vysokogo razreshenija // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. № 5 (50). S. 251-259.

18. Andronov V.G., Volobuev Ju.N. Prokladka trassy kosmicheskogo apparata cherez zadannuju tochku zemnoj poverhnosti // Naukoemkie tehnologii. 2012. T. 13. № 9. S. 31-33.