

© Кукушкин С.С., Гулый Н.Н.  
Kukushkin S.S., Gooluy N.N.

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ВИДЕОКАМЕР ПРИ ВЫРОЖДЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ГРУППИРОВКИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В ПЛОСКОСТЬ

### NEW METHODS AND TECHNOLOGIES OF IDENTIFICATION OF OPTICAL MEASUREMENTS OF VIDEOCAMERAS AT DEGENERATION OF A SPATIAL ARRANGEMENT OF GROUPING OF CONTROLLABLE OBJECTS IN A PLANE

**Аннотация.** Статья посвящена разработке методов и технологий идентификация оптических измерений видеокамер при вырождении пространственного расположения группировки контролируемых объектов в плоскость.

**Annotation.** Article is devoted working out of new methods and technologies of identification of optical measurements of video cameras at degeneration of a spatial arrangement of grouping of controllable objects in a plane.

**Ключевые слова.** Натурные испытания нескольких сложных технических систем, новых методов и технологий обработки оптической информации, видеоизображения.

**Key words.** Natural tests of several complicated technical systems, new methods and technologies of processing of the optical information, video images.

Во время проведения испытаний сложных технических систем (СТС) стоит задача одновременного определения координат и высот не одного, а нескольких объектов испытаний с использованием оптических систем измерений. Основные особенности испытаний контролируемых объектов состоят в следующем:

- наблюдения происходят в течение короткого промежутка времени и примерно на одной высоте;
- контролируемые явления, связанные с объектами испытаний, сопровождаются яркими свечениями, размеры которых сопоставимы или превышают расстояния между объектами;
- натурные испытания проходят в полевых районах, не оборудованных штатными стационарными траекторными измерительными средствами;
- для проведения измерений используется комплекс видеосъемки, обработки и анализа траекторной информации на базе видеокамер;

- переносные посты видеосъемки или просто видеокамеры располагаются на поверхности Земли в опасной зоне, не обслуживаются и ориентированы на экспонирование области проведения испытаний;

- проблема обработки получаемой измерительной информации заключается в том, что идентификация измерений и контролируемых явлений, полученных различными видеокамерами, должна производиться при вырождении пространственного расположения группировки контролируемых объектов в плоскую горизонтальную плоскость.

Пример видеоизображений при натурных испытаниях сложных технических систем приведен на рис. 1.

Задача условной межприборной идентификации измерительной информации видеокамер заключается в том, чтобы установить однозначные соответствия между трассами измерений разных видеокамер.

При этом процедура межприборной идентифика-

---

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ Министерства обороны РФ, тел. 515-19-82,

Гулый Николай Николаевич – начальник отдела 4 ГЦМП Министерства обороны РФ, тел. 727-43-87.

Kukushkin Sergej Sergeevich – Dr. Sci. Tech., the professor conducting the scientific employee, 4 CNIИ the Ministries of Defense, tel. 515-19-82, Gooluy Nikolaj Nikolaevich – the chief of division of 4 GCMP the Ministries of Defense, tel. 727-43-87.



Рис. 1. Пример видеоизображений при натурных испытаниях сложных технических систем

ции состоит в присвоении каждой трассе, зарегистрированной видеокамерами, условного номера объекта, породившего эту трассу.

Переход от единичных измерений явлений объектов к трассам измерений явлений обусловлен тем, что необходим учет помех от световых пятен большого размера, которые сопровождают контролируемые явления, например, поражение мишеней при испытаниях СТС.

Появляющиеся световые пятна могут быть причиной отсутствия измерений следующих по времени явлений других объектов. Поэтому, помимо угловых координат контролируемых явлений и их среднеквадратического отклонения (СКО) на определенный момент времени, в каждое измерение трассы входит пространственный угол свечения явления объекта. Значение этого угла уменьшается от измерения к измерению во время полета по трассе, что вызвано физическим процессом затухания свечения с течением времени.

Поэтому для каждой видеокамеры трассы полета объектов заранее определяются так, чтобы сопровождающие их свечения гарантировано не могли быть причиной отсутствия измерения других контролируемых явлений.

Допускается лишь увеличение угла свечения явления объекта при втором пространственно разнесенном измерении трассы полета контролируемого объекта. Од-

нако это возможно только при условии, что момент начала контролируемого явления приходится на окончание интервала экспонирования видеокадра, соответствующего первому измерению трассы. Значения самих же угловых координат измерений в трассе полета объекта изменяются мало. При этом значения СКО угловых координат также уменьшаются с течением времени, как и величина угла свечения явления.

Все это приводит к необходимости применения адаптивной процедуры оптических измерений, которая требует предварительного планирования результатов испытаний СТС и оптимизации как пространственного размещения видеокамер, так и режимов их работы. В этом заключена основная цель проведенного экспериментального исследования.

Практические предложения по адаптации оптического комплекса измерений, основу которого составляют видеокамеры, заключаются в следующем.

Для определения координат контролируемого явления используются только значения первичных измерений трасс полета объектов, остальные измерения трасс используются для расчета областей отсутствия видимости видеокамер с целью их учета при идентификации трасс следующих по времени явлений объектов.

При этом самая сложная проблема, относящаяся в

последующей идентификации явлений, связана с эффектом вырождения пространственного расположения группировки явлений в плоскую горизонтальную область. Это приводит к следующему негативному результату при идентификации измерений: полученная видеокамерой одна пара измерений двух явлений, произошедших в один момент времени, и другая пара измерений другой видеокамеры этих же явлений дают одновременно две истинные и две ложные точки реализации наблюдаемых явлений.

В соответствии с классической теорией идентификации эти ложные точки являются ложными точками первого типа (ошибками первого рода). Их пример представлен на рис. 2.

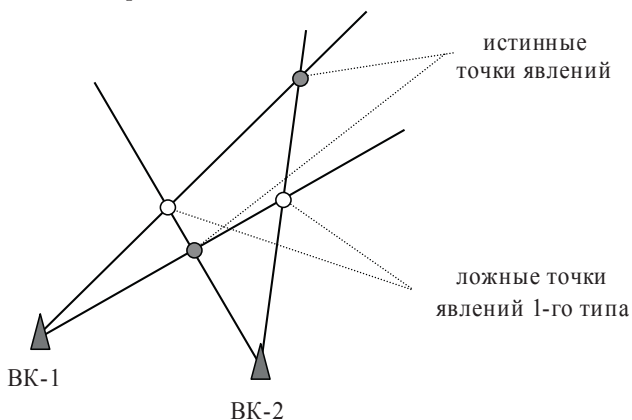


Рис. 2. Ложные точки 1-го типа

Для установки истинности полученных точек явлений необходимы измерения третьей видеокамеры.

Однако для раскрытия структурно-параметрической неопределенности, заключающейся в вырождении измерений по двум явлениям в одно измерение, трех видеокамер также недостаточно. Это связано с возможностью появления ложных точек второго типа (ошибок второго рода). Пример таких точек представлен на рис. 3.

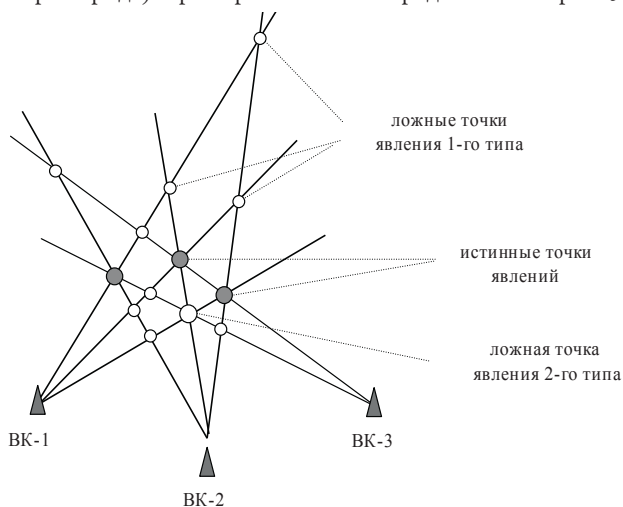


Рис. 3. Ложные точки 2-го типа

Для их устранения необходима совместная обработка измерений одновременно не менее четырех видеокамер.

Общим подходом к решению задачи условной идентификации трасс является последовательная обработка измерений объектов одновременно всех видеокамер с течением времени и с учетом их несинхронной регистрации.

Если отсутствует точная привязка измерений к системе единого времени (СЕВ) и измерения условно привязаны к сигналам СЕВ по времени первого явления, то необходимым этапом предварительной обработки является установление порядка следования видеокамер по очередности времени регистрации первого явления.

Первым кадром у всех видеокамер считается кадр, на котором экспонировано первое явление, представляющее для разработчиков и испытателей наибольший интерес в соответствии с поставленными целями и задачами испытаний СТС. Процесс идентификации начинается с обработки всех имеющихся измерений у всех видеокамер на первых кадрах. Далее исключаются из обработки измерения первого кадра видеокамеры, у которой интервал регистрации ранее интервалов регистрации кадров других видеокамер. Вместо этих измерений в обработку поступают измерения следующего кадра этой видеокамеры. Затем исключаются из обработки измерения кадра очередной видеокамеры, интервал регистрации которой предшествовал регистрации кадров других видеокамер. Исключенные данные регистрации заменяются измерениями следующего кадра этой видеокамеры.

Этот процесс последовательной обработки зарегистрированных кадров изображений будет продолжен до тех пор, пока не будут обработаны все измерения всех видеокамер.

Процесс исключения из обработки измерений одного кадра и их замена измерениями другого кадра одной из видеокамер назовем идентификацией со сдвигом по времени. При этом видеокамера, измерения которой после текущего цикла обработки будут заменяться, будет считаться опорной.

Следовательно, предлагаемый процесс адаптации будет определяться новым свойством системы измерений, при котором вместе со сдвигом по времени изменяется и опорная видеокамера. В результате реализации такого подхода количество циклов обработки будет равно произведению количества видеокамер и количества временных сечений, начиная от первого интересующего явления и заканчивая последним. При этом каждый цикл обработки получаемой оптической информации может быть связан (засинхронизирован) со временем оконча-



ния интервала регистрации кадра опорной видеокамеры.

В каждом цикле обработки происходит формирование списка возможных точек интересующих явлений. Перебираются все возможные пары видеокамер, такие видеокамеры назовем образующими возможную точку. Для каждой из пар видеокамер перебираются все первые измерения явлений объектов (измерения, относящиеся к началу процесса обнаружения интересующих явлений контролируемого объекта). Далее по этим измерениям (угловым координатам и оценкам их СКО) рассчитываются координаты возможной точки и ее корреляционная матрица ошибок. Для всех остальных видеокамер, не являющихся образующими, определяют текущую возможную точку по этим уже полученным данным. С этой целью выполняются следующие операции:

- производится проверка факта выхода текущей возможной точки за пределы поля зрения видеокамеры;
- производится проверка на попадание текущей возможной точки в область отсутствия видимости видеокамеры, появляющейся как результат воздействия последствий световых пятен предыдущих явлений (для устранения появляющейся неопределенности используются измерения явлений объектов, которые не относятся к разряду первых в идентифицируемых трассах измерений);
- производится проверка, имеющая целью отождествление одного из измерений видеокамеры (первого в трассе измерений объекта) с текущей возможной точкой по специальному критерию, учитывающему целеуказания на текущую возможную точку и их СКО, а также измерения видеокамер и их СКО получаемых результатов.

В случае отождествления измерения одной из видеокамер расчет координат возможной точки повторяется, но уже с учетом измерений образующих видеокамер и отождествленных измерений видеокамер, не являющихся образующими по отношению к текущей возможной точке. Аналогичные действия производятся и по отношению к остальным видеокамерам.

В результате этого формируется список возможных точек на рассматриваемый момент времени цикла обработки.

Далее из всех возможных точек выбираются в первую очередь точки, которые подтверждены измерениями всех видеокамер. Причем одна из образующих эту точку видеокамер должна быть опорной. Полученные точки считаются достоверными (претендентами на истинные точки). Ввиду того что возможные точки образовывались исходя из всех возможных пар видеокамер, среди них имеется множество дублирующих. Дублирующие точки исключаются из списка возможных точек.

Далее с учетом того, что одна из образующих эту точку видеокамер должна быть опорной, выбираются точки, для которых все видеокамеры либо имеют подтверждающие измерения, либо имеют расчетные объяснения на отсутствие таких измерений из-за попадания их в области отсутствия видимости видеокамер. Эти точки также считаются претендентами на истинные точки. Вновь появившиеся дублирующие точки также исключаются из списка возможных точек.

После выбора претендентов на истинные точки производится их анализ. Если среди них есть точки, подтвержденные одними и теми же измерениями видеокамер, то в первую очередь исключаются из претендентов те точки, которые подтверждены меньшим количеством измерений, а во вторую (в случае равного количества подтверждающих измерений), у которых величина, характеризующая точность расчета координат явлений с учетом ошибок измерений видеокамер, больше. Оставшиеся среди претендентов считаются истинными точками, а измерения, породившие эти точки, идентифицированными.

Перейдем к более детальному описанию процесса условной идентификации угловых координат явлений между видеокамерами. Процесс условной идентификации состоит из циклов обработки. Цикл обработки – это совместная обработка измерений кадров заданного момента времени (конец интервала регистрации кадра опорной видеокамеры) всех имеющихся видеокамер. Таким образом, цикл обработки отождествляется с обработкой только тех кадров, в интервал регистрации которых попадает заданный момент времени.

Формализованное представление и методика обработки оптической информации видеокамер может быть представлены в следующем виде.

1. В начале цикла обработки видеокамеры перенумеровываются по времени возрастания конца интервала регистрации обрабатываемых кадров  $l=1, L$ . Первой идет опорная видеокамера.

Каждая видеокамера в кадре заданного момента времени в общем случае имеет  $N_l$  измерений, из них  $M_l^*$  измерений начал явлений объектов и  $M_l^\#$  измерений последствий явлений ( $N_l = M_l^* + M_l^\#$ ).

2. По измерениям начал явлений происходит формирование списка возможных точек явлений. Для чего методом перебора всех возможных пар видеокамер  $p$  и  $q$  ( $p=1, L; q=1, L; p \neq q$ ) и перебором всех измерений начал явлений  $i$  и  $j$  ( $i=1, M_i^*; j=1, M_j^*$ ) получается одна возможная точка явления  $T_{ij}^{pq}$ :

$$x^{pq}_{ij}, y^{pq}_{ij}, z^{pq}_{ij}, K^{pq}_{ij}, S_0^{pq}_{ij}, cbar^{pq}_{ij}, \quad (1)$$

где  $p$  и  $q$  – номера видеокамер, образующих возможную

точку явлений;

$x^{pq}_{ij}, y^{pq}_{ij}, z^{pq}_{ij}$  – координаты возможной точки явлений;

$K^{pq}_{ij}$  – корреляционная матрица ошибок расчета координат возможной точки явлений;

$S_0^{pq}_{ij}$  – оценка единицы веса ошибок измерений видеокamer (величина, характеризующая точность расчета координат явлений объекта, отношение СКО по «невязкам» и потенциальных СКО координат явления, рассчитанных по СКО измерений);

$char^{pq}_{ij}$  – характеристики участия видеокamer при формировании точки.

3. Осуществляется детальный расчет данных возможной точки явления по измерениям двух образующих видеокamer. Предварительно проверяется угол между двумя измерениями, он должен быть больше (или равен) минимально допустимого угла базы измерений  $\gamma_{min}$

$$\arccos \frac{l_1 \cdot l_2 + m_1 \cdot m_2 + n_1 \cdot n_2}{\sqrt{(l_1^2 + m_1^2 + n_1^2) \cdot (l_2^2 + m_2^2 + n_2^2)}} \geq \gamma_{min}, \quad (2)$$

где  $l_1, m_1, n_1$  – направляющие косинусы визирной линии измерения первой в паре видеокamer;

$l_2, m_2, n_2$  – направляющие косинусы визирной линии измерения второй в паре видеокamer.

4. После этого рассчитывается начальное приближение координат возможной точки. В качестве начального приближения координат берутся координаты середины наименьшего отрезка между визирными линиями измерений

$$\begin{aligned} \bar{R}_0 &= (x_0, y_0, z_0)^T; \\ x_0 &= \frac{x_{01} + x_{02}}{2}; \quad y_0 = \frac{y_{01} + y_{02}}{2}; \quad z_0 = \frac{z_{01} + z_{02}}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} y_{01} &= \frac{C_2 \cdot B_1 - C_1 \cdot B_2}{A_1 \cdot B_2 - A_2 \cdot B_1}; & y_{02} &= \frac{A_2 \cdot C_1 - A_1 \cdot C_2}{A_1 \cdot B_2 - A_2 \cdot B_1}; \\ x_{01} &= x_{11} - l_1 \cdot \frac{y_{11} - y_{01}}{m_1}; & x_{02} &= x_{22} - l_2 \cdot \frac{y_{22} - y_{02}}{m_2}; \\ z_{01} &= z_{11} - n_1 \cdot \frac{y_{11} - y_{01}}{m_1}; & z_{02} &= z_{22} - n_2 \cdot \frac{y_{22} - y_{02}}{m_2}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{1}{m_1}; \quad B_1 = -m_1 - \frac{l_1 \cdot l_2 - n_1 \cdot n_2}{m_2}; \quad C_1 = l_1 \cdot D_1 + n_1 \cdot D_1;$$

$$A_2 = m_2 + \frac{l_1 \cdot l_2 + n_1 \cdot n_2}{m_1}; \quad B_2 = -\frac{1}{m_2}; \quad C_2 = l_2 \cdot D_2 + n_2 \cdot D_2;$$

$$D_1 = x_{11} - x_{22} - l_1 \cdot \frac{y_{11}}{m_1} + l_2 \cdot \frac{y_{22}}{m_2};$$

$$D_2 = z_{11} - z_{22} - n_1 \cdot \frac{y_{11}}{m_1} + n_2 \cdot \frac{y_{22}}{m_2},$$

где  $x_{11}, y_{11}, z_{11}$  – координаты первой в паре видеокamer в расчетной системе координат;

$x_{22}, y_{22}, z_{22}$  – координаты второй в паре видеокamer

в расчетной системе координат.

5. Затем методом последовательных приближений рассчитываются координаты, корреляционная матрица ошибок координат и оценка единицы веса ошибок измерений.

Исходными данными для расчета являются измеренные значения угловых координат явлений объектов и оценки их СКО, полученные после первичной обработки:

$\bar{Q}$  – вектор, состоящий из  $k$  измеренных угловых координат явлений объектов (два и более)

$$\bar{Q} = \begin{pmatrix} \bar{q}_1 \\ \dots \\ \bar{q}_j \\ \dots \\ \bar{q}_k \end{pmatrix}; \quad \bar{q}_j = \begin{pmatrix} \lambda_j \\ \beta_j \end{pmatrix}. \quad (5)$$

$\bar{S}_Q$  – вектор, состоящий из  $k$  оценок СКО измеренных угловых координат явлений объектов (два и более)

$$\bar{S}_Q = \begin{pmatrix} S_{q1} \\ \dots \\ S_{qj} \\ \dots \\ S_{qk} \end{pmatrix}; \quad S_{qj} = \begin{pmatrix} S_{\lambda j} \\ S_{\beta j} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Пространственные координаты явления объекта в расчетной системе координат представляются вектором  $\bar{R} = (x, y, z)^T$ .

Процесс уточнения данного вектора имеет итерационный характер. Поправка к координатам явлений на каждом шаге вычисляется следующим образом:

$$\Delta \bar{R} = B^{-1} \cdot A^T \cdot W \cdot (\bar{Q} - \bar{H}); \quad B = A^T \cdot W \cdot A, \quad (8)$$

где  $A$  – полная матрица частных производных

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ \dots \\ A_j \\ \dots \\ A_k \end{pmatrix}; \quad A_j = \frac{\partial q_j^p}{\partial R} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \lambda_j^p}{\partial x} & \frac{\partial \lambda_j^p}{\partial y} & \frac{\partial \lambda_j^p}{\partial z} \\ \frac{\partial \beta_j^p}{\partial x} & \frac{\partial \beta_j^p}{\partial y} & \frac{\partial \beta_j^p}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где  $A_j$  – матрица частных производных угловых координат  $j$ -й видеокamer по координатам явлений;

$W$  – диагональная матрица весов измеренных угловых координат (диагональные элементы этой матрицы равны обратной величине квадрата оценки СКО угловых координат видеокamer)

$$W = \begin{pmatrix} W_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & W_k \end{pmatrix}; \quad W_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_{\lambda i}^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_{\beta i}^2} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $\bar{H}$  – вектор, состоящий из  $k$  расчетных угловых координат явления

$$\bar{H} = \begin{pmatrix} \bar{h}_1^P \\ \dots \\ \bar{h}_j^P \\ \dots \\ \bar{h}_k^P \end{pmatrix}; \quad \bar{h}_j^P = \begin{pmatrix} \lambda_j^P \\ \beta_j^P \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Приведем формулы расчетных угловых координат явлений:

$$\lambda = \arctan\left(\frac{z_M}{x_M}\right); \quad \beta = \arctan\left(\frac{y_M}{\sqrt{x_M^2 + z_M^2}}\right). \quad (12)$$

Найди поправку  $\Delta\bar{R}_i$ , производим уточнение вектора координат явления

$$\bar{R}_i = \bar{R}_{i-1} + \Delta\bar{R}_i. \quad (13)$$

Процесс уточнения завершается после выполнения условия

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} < \varepsilon_R, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_R$  – значение критерия останова процесса последовательных приближений.

Используя результаты последнего приближения, рассчитываем корреляционную матрицу ошибок определения вектора  $\bar{R}$

$$W_R = S_0^2 \cdot B^{-1};$$

$$S_0^2 = \frac{\sum_{q=1}^{2k} (Q_q - H_q)^2 \cdot \frac{1}{S_{\lambda\beta q}^2}}{2k - 3}. \quad (15)$$

В результате выполнения перечисленных операций могут быть определены координаты возможной точки явления по измерениям двух образующих эту точку видеокамер.

Процесс уточнения данных возможной точки явления по измерениям всех имеющихся видеокамер аналитически может быть представлен следующим образом.

1. По координатам возможной точки и корреляционной матрице ошибок ее определения производится расчет целеуказаний угловых координат  $\lambda^l, \beta^l$  и СКО их определения  $S_{\lambda^l}, S_{\beta^l}$  для всех остальных не образующих данную возможную точку видеокамер  $l$  ( $l = 1, L; l \neq p; l \neq q$ ):

$$\lambda^l = \arctg\left(\frac{z_M^l}{x_M^l}\right); \quad \beta^l = \arctg\left(\frac{y_M^l}{\sqrt{x_M^l{}^2 + z_M^l{}^2}}\right), \quad (16)$$

где  $\lambda^l, \beta^l$  – целеуказания азимута и угла места с  $l$ -й видеокамеры на возможную точку явления;

$\bar{R}_M^l = (x_M^l, y_M^l, z_M^l)^T$  – вектор координат явления в местной системе координат  $l$ -й видеокамеры.

2. Производится расчет СКО целеуказаний угловых координат в соответствии со следующей методической схемой:

2.1. Рассчитываются возмущенные векторы целеуказаний угловых координат  $l$ -й видеокамеры. Обозначим этот расчет функционалом

$$\bar{U}^l = \begin{pmatrix} \lambda^l \\ \beta^l \end{pmatrix} = F^l(\bar{R}) = \begin{pmatrix} F_{\lambda}^l(\bar{R}) \\ F_{\beta}^l(\bar{R}) \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Возмущенные векторы угловых координат определяются следующим образом:

$$\bar{U}_i^l = \begin{pmatrix} \lambda_i^l \\ \beta_i^l \end{pmatrix} = F^l(\bar{R}_i), i = 1..3, \quad (18)$$

где

$$\bar{R}_1 = (x + \partial x, y, z)^T;$$

$$\bar{R}_2 = (x, y + \partial y, z)^T;$$

$$\bar{R}_3 = (x, y, z + \partial z)^T. \quad (19)$$

2.2. Численным образом рассчитывается матрица частных производных

$$A^{lT} = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_1^l - \lambda^l}{\partial x} & \frac{\lambda_2^l - \lambda^l}{\partial y} & \frac{\lambda_3^l - \lambda^l}{\partial z} \\ \frac{\beta_1^l - \beta^l}{\partial x} & \frac{\beta_2^l - \beta^l}{\partial y} & \frac{\beta_3^l - \beta^l}{\partial z} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

2.3. Рассчитывается корреляционная матрица ошибок целеуказаний угловых координат

$$C^l = \begin{pmatrix} c_{11}^l & c_{12}^l \\ c_{21}^l & c_{22}^l \end{pmatrix} = A^{lT} \cdot K_R \cdot A^l, \quad (21)$$

где  $K_R$  – корреляционная матрица ошибок определения координат возможной точки в расчетной системе координат;

2.4. Расчет СКО целеуказаний угловых координат с  $l$ -й видеокамеры на возможную точку явления:

$$S_{\lambda^l} = \sqrt{C_{11}^l}; \quad S_{\beta^l} = \sqrt{C_{22}^l}. \quad (22)$$

Для каждой  $l$ -й видеокамеры по целеуказаниям с видеокамеры на возможную точку явления, осуществляется проверка ухода возможной точки за пределы зоны видимости видеокамеры. Предварительно рассчитываются левый и правый азимуты зоны видимости для каждого кадра видеокамеры  $\lambda_n^l, \lambda_n^l$  с использованием элементов ориентирования кадров и в качестве картинных координат беря для координаты  $x$  минимально и максимально возможные координаты. Ввиду того, что значение азимута может лежать в интервале  $(0, 2\pi)$ , проверка осуществляется следующим образом:

$$C_1 = \lambda^l - \lambda_n^l; \quad C_2 = \lambda^l - \lambda_n^l; \quad C = \frac{C_1 + C_2}{2}. \quad (23)$$

Если  $\lambda_n^l > \lambda_n^l$  и  $(\lambda^l > \lambda_n^l$  или  $\lambda^l > \lambda_n^l)$ , то азимут  $\lambda^l$  попадает в поле зрения кадра видеокамеры.

Если  $\lambda_n^l > \lambda_n^l$  и  $(\lambda^l > \lambda_n^l$  и  $\lambda^l < \lambda_n^l)$ , то азимут  $\lambda^l$  не попадает в поле зрения кадра видеокамеры. Если  $C < 0$ , то азимут  $\lambda^l$  ушел вправо, если  $C > 0$ , то азимут  $\lambda^l$  ушел влево.

Если  $\lambda_n^l < \lambda_n^l$  и  $(\lambda^l > \lambda_n^l$  и  $\lambda^l < \lambda_n^l)$ , то азимут  $\lambda^l$  попадает в поле зрения кадра видеокамеры.

Если  $\lambda_n^l < \lambda_n^l$  и ( $\lambda^l < \lambda_n^l$  или  $\lambda^l > \lambda_n^l$ ), то азимут  $\lambda^l$  не попадает в поле зрения кадра видеокамеры. Если ( $C_1 > 0$  и  $C_2 > 0$ ) и если  $C < \pi$ , то азимут  $\lambda^l$  ушел вправо, иначе азимут  $\lambda^l$  ушел бы влево. Если ( $C_1 < 0$  и  $C_2 < 0$ ) и если  $C > -\pi$ , то азимут  $\lambda^l$  ушел влево, иначе азимут  $\lambda^l$  ушел бы вправо.

По измерениям последствий от явлений объектов, произошедших на ранних кадрах видеокамер, рассчитываются области отсутствия видимости для каждой видеокамеры от световых пятен явлений. По целеуказаниям видеокамер на возможную точку подрыва и областям отсутствия видимости видеокамер осуществляется проверка на попадание текущей возможной точки в область отсутствия видимости видеокамер от последствий световых пятен предыдущих явлений. Эта задача решается с использованием следующих формул:

1. Целеуказания угловых координат с  $l$ -й видеокамеры на текущую возможную точку явления  $\lambda^l, \beta^l$  и их СКО  $S_{\lambda^l}, S_{\beta^l}$  пересчитываются в направляющие косинусы визирной линии  $l, m^l, n^l$  и их СКО  $S_l, S_{m^l}, S_{n^l}$  по следующим формулам:

$$\begin{aligned} l^l &= \cos \lambda^l \cdot \cos \beta^l; \\ m^l &= \sin \beta^l; \\ n^l &= \sin \lambda^l \cdot \cos \beta^l; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} S_l &= \sqrt{\sin^2 \lambda^l \cdot \cos^2 \beta^l \cdot S_{\lambda^l}^2 + \cos^2 \lambda^l \cdot \sin^2 \beta^l \cdot S_{\beta^l}^2}; \\ S_{m^l} &= |\cos \beta^l| \cdot S_{\beta^l}; \\ S_{n^l} &= \sqrt{\cos^2 \lambda^l \cdot \cos^2 \beta^l \cdot S_{\lambda^l}^2 + \sin^2 \lambda^l \cdot \sin^2 \beta^l \cdot S_{\beta^l}^2}. \end{aligned}$$

2. Угловые координаты последствий от явлений  $l$ -й видеокамеры и их СКО  $\lambda_i^l, \beta_i^l; S_{\lambda_i^l}, S_{\beta_i^l}; (i = 1, M_l^{\#})$  также пересчитываются в направляющие косинусы визирной линии и их СКО  $l_i^l, m_i^l, n_i^l, S_{l_i^l}, S_{m_i^l}, S_{n_i^l}$ .

3. Для каждого последствия от явления рассчитывается угол между двумя визирными линиями: визирной линией на последствие от явления и визирной линией на текущую возможную точку явления  $\psi_i^l$  и их СКО  $S_{\psi_i^l}$  по формулам

$$\begin{aligned} \psi &= \arccos \frac{p}{r}; \\ S_{\psi} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \psi}{\partial l_1}\right)^2 \cdot S_{l_1}^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial m_1}\right)^2 \cdot S_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial n_1}\right)^2 \cdot S_{n_1}^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial l_2}\right)^2 \cdot S_{l_2}^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial m_2}\right)^2 \cdot S_{m_2}^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial n_2}\right)^2 \cdot S_{n_2}^2}}{\sin \gamma}, \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} p &= l_1 \cdot l_2 + m_1 \cdot m_2 + n_1 \cdot n_2; \\ q_1 &= l_1^2 + m_1^2 + n_1^2; \\ q_2 &= l_2^2 + m_2^2 + n_2^2; \end{aligned}$$

$$r = \sqrt{q_1 \cdot q_2}.$$

4. Проверяются значения углов между визирной линией на текущую возможную точку явления и визирными линиями на последствия от явлений. Если хотя бы одно из условий выполняется

$$\psi_i^l - K_{\gamma} \cdot S_{\psi_i^l} < \frac{\gamma_i^l}{2}, \quad i = 1, M_l^{\#}, \quad (26)$$

где  $\gamma_i^l$  – угол свечения  $i$ -го последствия явления  $l$ -й видеокамеры;

$K_{\gamma}$  – коэффициент, характеризующий максимально возможный разброс ошибок измерений (находится в пределах  $1,0 \div 3,0$  и определяется пользователем в зависимости от качества имеющейся измерительной информации),

то считается, что текущая возможная точка попала в область отсутствия видимости видеокамеры от последствий световых пятен предыдущих явлений.

Если возможная точка явления объекта не ушла с зоны видимости  $l$ -й видеокамеры и не попала в область отсутствия видимости видеокамеры от последствий световых пятен предыдущих явлений, то осуществляется проверка на подтверждение текущей возможной точки явления объекта одним из имеющихся измерением начал явлений объектов. Должно выполняться два условия

$$\begin{aligned} |\Delta \lambda_j^l| &< K_S \cdot S_{\Delta \lambda_j^l}; \\ |\Delta \beta_j^l| &< K_S \cdot K_{\Delta \lambda \beta} \cdot S_{\Delta \beta_j^l}, \quad j = 1, M_j^*, \end{aligned} \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_j^l &= \lambda^l - \lambda_j^l; \quad S_{\Delta \lambda_j^l} = \sqrt{S_{\lambda^l}^2 + S_{\lambda_j^l}^2}; \\ \Delta \beta_j^l &= \beta^l - \beta_j^l; \quad S_{\Delta \beta_j^l} = \sqrt{S_{\beta^l}^2 + S_{\beta_j^l}^2}; \end{aligned}$$

$\lambda^l, \beta^l, S_{\lambda^l}, S_{\beta^l}$  – целеуказания угловых координат с  $l$ -й видеокамеры на текущую возможную точку явления и их СКО;

$\lambda_i^l, \beta_i^l, S_{\lambda_i^l}, S_{\beta_i^l}$  – угловые координаты  $l$ -й видеокамеры на  $i$ -е последствие явления объекта;

$K_S$  – коэффициент, характеризующий максимально возможный разброс ошибок измерений (находится в пределах  $1,0 \div 3,0$  и определяется пользователем в зависимости от качества имеющейся измерительной информации);

$K_{\Delta \lambda \beta}$  – коэффициент соотношения ошибок измерений по углу места и азимуту (находится в пределах  $0,5 \div 2,0$  и определяется пользователем в зависимости от качества имеющейся измерительной информации и результатов первичной обработки).

В случае отождествления измерения одной из видеокамер с текущей возможной точкой явления производится уточняющий расчет координат и других данных двух образующих видеокамер и по отождествленным измерениям других видеокамер.

Процесс уточнение данных возможной точки по измерениям всех имеющихся видеокамер повторяется каждый раз, пока появляется очередное отождествленное измерение с текущей возможной точкой явления.

Следующий этап – обработка списка возможных точек на рассматриваемый момент времени.

В сформированном списке возможных точек на рассматриваемый момент времени цикла обработки есть характеристики участия видеокамер при формировании каждой возможной точки. По каждой полученной возможной точке для каждой видеокамеры имеется характеристика участия видеокамеры  $char_{ij}^{pq}$  при формировании возможной точки, которая представляет собой либо ссылку на измерение начала явления объекта, либо признак отсутствия измерения.

Могут быть следующие значения признака отсутствия измерения:

"<" – уход возможной точки с зоны видимости видеокамеры влево;

">" – уход возможной точки с зоны видимости видеокамеры вправо;

"#" – попадание возможной точки в область отсутствия видимости видеокамеры от последствий световых пятен предыдущих явлений;

"0" – нет причин для отсутствия измерения у видеокамеры.

По характеристикам участия видеокамер при формировании возможных точек и некоторым другим данным производится формирование и обработка списка претендентов на истинные точки с использованием следующих операций:

1. В число претендентов на истинную точку включаются возможные точки, которые подтверждены изме-

рениями всех имеющихся видеокамер. Одной из образующих эту точку видеокамер должна быть опорная видеокамера ( $p=1$  или  $q=1$ ). В случае обнаружения такой точки, она переносится в список претендентов на истинную точку. Из списка возможных точек она исключается, также исключаются дублирующие ее точки. Наличие дублирующих точек объясняется формированием возможных точек исходя из всех возможных пар видеокамер.

2. В число претендентов на истинную точку включаются возможные точки, для которых все видеокамеры либо имеют подтверждающие измерения, либо имеют значение признака отсутствия измерения, не равного "0". Одной из образующих эту точку видеокамер должна быть опорная видеокамера ( $p=1$  или  $q=1$ ). В случае обнаружения такой точки она переносится в список претендентов на истинную точку. Из списка возможных точек она исключается, также исключаются дублирующие ее точки.

3. Обработка списка претендентов на истинные точки. Если среди них есть точки, подтверждающие одними и теми же измерениями видеокамер, то в первую очередь исключаются из претендентов те точки, которые подтверждены меньшим количеством измерений, а во вторую (в случае равного количества подтверждающих измерений), у которых величина  $S_{0ij}^{pq}$ , характеризующая точность расчета координат явлений с учетом ошибок измерений видеокамер, больше. Оставшиеся среди претендентов считаются истинными точками, а измерения, породившие эти точки, идентифицированными.

**Выводы.** Рассмотрена новая технология определения траекторий полета контролируемых объектов и идентификации явлений, интересующих разработчика и испытателя СТС, на основе использования системы видеокамер. Показана необходимость разработки и использования адаптивных процедур обработки получаемых данных измерений, обосновано минимальное количество видеокамер, обеспечивающее раскрытие неопределенностей различного рода.

#### Литература

1. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстротекающих процессов. – М: Наука, 1973.
2. Новицкий П.В., Зофграб И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л: Энергоатомиздат, 1985.
3. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. – М: Недра, 1983.
4. Жданюк Б.Р. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М: Советское радио, 1978.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1984.
6. Машимов М.М. Теоретическая геодезия. – М: Недра, 1991.
7. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика /Т.1 Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. М.: МО РФ, 2003. – 284с.
8. Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем М.: МО РФ, 2008. – 328с.

Материал поступил в редакцию 30. 04. 2009 г.