

индекс 3624

**ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ**  
**ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

ЕФИ-336(61)-78

А.С.АЛЕКСАНЯН, О.Л.АРУТЮНЯН,

А.О. ГАСПАРЯН, Р.Н.ПИХТЕЛЕВ

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ С СИСТЕМЫ  
ОПТИЧЕСКИХ ИСКРОВЫХ КАМЕР



В настоящее время все большее число экспериментальных установок оснащаются регистрирующей аппаратурой с автоматическим съёмом информации ("на линию" с ЭВМ), в то время как оптические искровые камеры с их высокими угловыми точностями, простотой изготовления и доступностью для любой лаборатории остаются основными узлами многих установок в физическом эксперименте. Обработка оптической (фильмовой) информации с системы искровых камер не представляет значительных трудностей по сравнению, например, с пузырьковыми камерами<sup>[1-3]</sup>. Тем не менее, для получения соответствующих точностей в определении пространственных координат системы фоторегистраторов, положение в пространстве искровых камер и реперных крестов требуют тщательной юстировки (определение направлений оптических осей аппаратов, координат оптических центров, стереобазы, удаления от объекта и т.д.). Данные геодезической юстировки входят в программы восстановления пространственной картины в качестве констант<sup>[4, 5]</sup>. С другой стороны, любая программа должна быть проверена на реальных объектах ("струны", тестовые сетки), помещенных в фотографируемый объём. Координаты тестовых объектов должны быть в своем

очередь точно измерены геодезическими методами [6].

В настоящей работе рассмотрен способ получения оптических констант и восстановления пространственной картины событий с искровых камер, не требующий дополнительной калибровки ни аппаратов, ни взаимного расположения реперных меток и тестовых "струн" в объеме фотографирования. Сущность метода заключается в фотографировании реперной сетки в нескольких положениях совместно с реперными крестами (расположенными произвольно) и координатных "струн" с вертикальными отвесами, которые определяют систему координат в пространстве. Эта информация на фото-пленках позволяет получить все оптические контакты для восстановления пространственного события относительно системы координатных "струн" (система "лучка"). Вычисленные константы автоматически учитывают оптические искажения объективов и всей системы в целом (параллельность оптических осей стереоаппаратов, дисторсию, неперпендикулярность осей к начальному положению тестовой сетки и т.д.) Как показано ниже, связь независимых систем искровых камер, разнесенных на значительное расстояние друг от друга (сдвиг координат), может быть осуществлена измерением одного расстояния между двумя "отвесами" — вертикальными "струнами".

Рассмотрим основные этапы восстановления пространственной картины, не вписывая громоздких формул аналитической геометрии в пространстве.

Для восстановления пространственных координат объекта достаточно определить для каждого аппарата направление одного главного луча, проходящего через центр объектива и точку в

пространстве (рис. I). Изображение точки на пленке определяет один луч в пространстве. Если известно соответствие координат на пленке  $(x, y)$  координатам проекции главного луча на две произвольные фиксированные плоскости в пространстве  $[A_1(x, y, z), A_2(x, y, z)]$  и  $A_1'(x, y, z), A_2'(x, y, z)$ , то задача нахождения координат точки  $A(x, y, z)$  в объеме будет решена. Аналогично линия  $AB$  в пространстве определяется по пересечению двух плоскостей, проходящих через линии  $A_1, B_1$ ,  $A_2, B_2$  и  $A_1', B_1', A_2', B_2'$ . Координаты любой точки (например, точки  $A$ ), могут быть также определены по пересечению линий  $O_1, A_1'$  и  $O_2, A_2'$  и соответственно линия  $AB$  — по пересечению плоскостей  $O_1, A_1', B_1'$  и  $O_2, A_2', B_2'$ .

Поскольку в первом случае необходимы дополнительные геодезические измерения взаимного расположения пространственно удаленных координатных систем (пл. I и пл. II на рис. I), поэтому мы применим метод определения проекции точки на фиксированной плоскости и определения координат оптических центров стереоаппаратов в системе, связанной с фиксированной плоскостью.

Таким образом, задача восстановления пространственной картины сводится к определению координат оптических центров аппаратов  $O_1, O_2$  и нахождению зависимости  $(X, Y) = F(x, y)$ , где  $(x, y)$  — координаты точки на пленке, а  $(X, Y)$  — координаты точки пересечения главного луча с фиксированной плоскостью в пространстве.

#### 1. Определение проекции точки на плоскости

Для определения проекции точки на фиксированной плоскости и координат оптических центров фотообъективов. использовалась

оптическая сетка из оргстекла, на поверхности которой нанесены взаимноперпендикулярные линии толщиной  $\pm 0,5$  мм и с шагом 100 мм, которые подсвечивались системой лампочек, вставленных сбоку в оргстекло. Координаты  $(X_i, Y_i)$  центров пересечения линий в плоскости сетки (всего 28 точек на сетке) определены с точностью  $\approx 0,1$  мм. Сетка могла вращаться вокруг одной из линий (ось  $X$ -ов в системе сетки) в интервале углов  $\pm 60^\circ$ , при этом смещение любой точки "оси  $X$ " в пространстве было менее  $\pm 20$  мкм.

Для восстановления проекции точек (центров пересечений линий) на плоскости сетка помещается в рабочий объем, фиксируется в плоскости, примерно перпендикулярной к оптическим осям объективов, и фотографируется обоими фотоаппаратами совместно с реперными крестами, расположенными произвольно в объеме. Изображение сетки на пленке каждого аппарата, измерялось на полуавтоматическом измерителе "ПУСС-1". Реперные кресты используются для перехода координат точки из системы измерителя  $(\xi_i, \eta_i)$  в систему реперных крестов  $(x_i, y_i)$  - координатную систему на пленке. Зависимость между координатами точек  $(X_i, Y_i)$  в плоскости и координатами соответствующих точек в системе реперных крестов на пленке  $(x_i, y_i)$  вычислялось с помощью степенного ряда:

$$\begin{aligned} X_i &= a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + \dots \\ Y_i &= b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + \dots \end{aligned} \quad (I)$$

где  $a_i, b_i$  - константы, зависящие только от фотоаппарата и

от расположения сетки относительно оптических осей. Следует заметить, что если оптические оси стереоаппаратов взаимно параллельны и одновременно перпендикулярны к плоскости "Z=0" (в дальнейшем плоскость сетки будем называть плоскостью "Z=0"), то в разложении (I) можно ограничиться линейными членами по  $x_i$  и  $y_i$ .

Поскольку в данном методе ни стереоаппарат, ни плоскость сетки специально не калибруются, то учет остальных нелинейных членов в разложении (I) является необходимым условием для получения достаточной точности восстановления пространственных координат.

Коэффициенты  $a_i, b_i$  в формуле (I) находятся методом наименьших квадратов, отдельно для каждого аппарата, используя все точки на сетке.

В дальнейшем все результаты приводятся для двух независимых пространственно удаленных оптических систем: система I - стереобаза аппаратов  $B \approx 200$  мм, расстояние до искровых камер  $\sim 1000$  мм;

Система II -  $B = 300$  мм, расстояние до искровых камер  $\sim 2000$  мм.

Расчеты, сделанные на ЭВМ БЭСМ-6 с помощью библиотечной подпрограммы "PSI1", показали, что если в разложении (I) ограничиться членами второго порядка включительно, то они дают возможность по измеренным точкам на пленке определить координаты точек  $(X_i, Y_i)$  в плоскости "Z=0" с среднеквадратичной ошибкой  $\Delta X \approx \Delta Y = 0,25$  мм для первой системы и  $\Delta X \approx \Delta Y = 0,35$  мм для второй системы.

Вклад квадратичных членов в разложении (I), усредненный по всем аппаратам, составляет ~1%, что означает в нашем случае малость отклонения оптических осей фотоаппаратов от перпендикулярности к плоскости "  $Z = 0$  ". Учет последующих членов в разложении (I) не приводит к уменьшению ошибок восстановления из-за реальных ошибок измерительного аппарата "ЦУОС-1" (~8 мкм на плёнке) и ошибок в измерении перекрестий сетки (~0,1 мм в объеме).

## 2. Определение оптических центров фотоаппаратов

Для определения оптических центров сетка фотографируется стереоаппаратами в положении, повернутом на определенный угол ( $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ) относительно плоскости "  $Z = 0$  ", где определялись оптические константы.

После поворота сетки на угол  $\varphi$  координаты сетки  $(X_i, Y_i)$  проецируются на плоскость "  $Z = 0$  ", в системе отчета которой они принимают новые значения  $(X'_i, Y'_i)$  (рис.2). Измеряя новые положения точек на плёнке ( $x'_i, y'_i$ ) и используя уже вычисленные значения  $a_i, b_i$ , по формуле (I) вычисляются координаты  $(X''_i, Y''_i)$  на плоскости "  $Z = 0$  ". Оптический центр аппарата определяется как средняя точка наикратчайшего расстояния между линиями  $B'B''$  и  $A'A''$ , которые проходят через точки  $A', B'$  и их проекции на фиксированную плоскость. Координаты точек  $A'$  и  $B'$  в пространстве определяются из угла поворота  $\varphi$  при условии, что все  $Z_i = 0$  при  $\varphi = 0^\circ$ .

Для уменьшения ошибки определения оптического центра вычисляются пересечения всех попарно возможных линий из всех точек на сетке, кроме точек на оси  $X$ . Аналогичным образом

определяется оптический центр другого аппарата.

Распределение координат оптического центра для одного аппарата приведено на рис.3. Средние значения координат оптических центров вычисляются с ошибкой  $\Delta X_0 = 0,35$  мм,  $\Delta Y_0 = 0,35$  мм  $\Delta Z_0 = 3$  мм для I-ой системы и  $\Delta X_0 = 0,5$  мм,  $\Delta Y_0 = 0,5$  мм и  $\Delta Z_0 = 4$  мм для II-ой системы.

Следует заметить, что точность определения оптических центров объективов существенным образом зависит от числа комбинаций пар линий (число точек на сетке) и может быть значительно меньше указанной величины, так как большие отклонения от среднего значения получаются от измерения соседних точек на сетке.

Таким образом, оптические центры аппаратов определяются в системе координат, в которой оси  $X$ -ов и  $Y$ -ов находятся в плоскости положения сетки "  $Z = 0$  ", а ось  $Z$  перпендикулярна этой плоскости.

## 3. Определение координат точки в пространстве

Координаты точки в пространстве, как описано выше, определяются по пересечению двух линий, проходящих соответственно через оптические центры стереоаппаратов и через проекции её по отношению к стереоаппаратам на плоскости "  $Z = 0$  ". Проекция точки на плоскости "  $Z = 0$  " для каждого аппарата вычисляется по формуле (I) из координат в системе изображения на измерительном проекторе.

Точка пересечения двух линий в пространстве определяется как средняя точка наикратчайшего расстояния между этими прямыми.

Для оценки ошибки измерения координат в пространстве восстанавливались координаты всех точек на сетке при повороте её на произвольный угол  $\varphi$  по стереофотограммам и сравнивались с расчетными значениями  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  для определенного угла  $\varphi$ . Среднеквадратичные ошибки восстановления координат точки в пространстве, усредненные по всему рабочему объёму, составляют

$\Delta X \approx \Delta Y = 0,3$  мм,  $\Delta Z = 2,5$  мм для I-ой системы стереоаппаратов и  $\Delta X \approx \Delta Y = 0,4$  мм,  $\Delta Z = 3,5$  мм для II-ой системы.

#### 4. Определение параметров линии в пространстве

Если не искать соответствующие точки на линии для каждой проекции обычным методом итераций, то линию в пространстве можно определить, как линию пересечения двух плоскостей, проходящих через оптические центры аппаратов и через проекции данной линии на плоскость " $Z=0$ " (плоскости "А" и "В" на рис.1). Параметры проекций линии вычисляются методом наименьших квадратов по измерению 10 + 15 точек на каждой стереопроекции. Направляющие косинусы линии в пространстве однозначно определяются параметрами линий на двух стереопроециях по обычным формулам аналитической геометрии. А точка на линии как её пересечение с любой плоскостью.

Как известно, с помощью данного метода не может быть восстановлена линия в пространстве, если она лежит в плоскости, проходящей через оба оптических центра стереоаппарата. Поэтому в экспе-

риментальных установках ось стереоаппарата располагается соответствующим образом к направлению треков в искровых камерах.

Для оценки угловых точностей вычислялись параметры всех линий на сетке при разных углах  $\varphi$ , а также отвесные "струны" расположенные в рабочем объёме.

При измерении линии длиной в среднем ~30 см угловые среднеквадратичные ошибки составляют  $\Delta \theta_x \approx \Delta \theta_y = 0,15^\circ$ ,  $\Delta \theta_z = 0,2^\circ$  для I-ой системы стереоаппаратов и  $\Delta \theta_x \approx \Delta \theta_y = 0,25^\circ$ ,  $\Delta \theta_z = 0,3^\circ$  для II-ой системы стереоаппаратов. Эти угловые точности остаются также и для кривых треков, поскольку толщина тестовых линий на сетке и отвесных струн примерно одинаковы с толщиной искрового трека.

#### 5. Связь двух оптических систем и переход в систему "пучка"

Из вышеизложенного ясно, что до сих пор все вычисления проводились в координатной системе сетки в положении " $Z=0$ ". В реальном физическом эксперименте часто возникает необходимость связать пространственно удаленные координатные системы и в конечном итоге перейти в единую систему отсчета (систему "пучка").

Связь координатных систем и переход в систему "пучка" осуществляется следующим образом. Если для каждой системы стереоаппаратов из системы "сетки" в отдельности перейти в систему пучка, декартовы координатные оси которых соответственно параллельны (при этом ось  $X$  для обеих систем совпадает с осью пучка), то дополнительным измерением расстояния между

Для оценки ошибки измерения координат в пространстве восстанавливались координаты всех точек на сетке при повороте её на произвольный угол  $\varphi$  по стереофотограммам и сравнивались с расчетными значениями  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$  для определенного угла  $\varphi$ . Среднеквадратичные ошибки восстановления координат точки в пространстве, усредненные по всему рабочему объёму, составляют

$\Delta X \approx \Delta Y = 0,3$  мм,  $\Delta Z = 2,5$  мм для I-ой системы стереоаппаратов и  $\Delta X \approx \Delta Y = 0,4$  мм,  $\Delta Z = 3,5$  мм для II-ой системы.

#### 4. Определение параметров линии в пространстве

Если не искать соответствующим образом точки на линии для каждой проекции обычным методом итераций, то линию в пространстве можно определить, как линию пересечения двух плоскостей, проходящих через оптические центры аппаратов и через проекции данной линии на плоскость " $Z=0$ " (плоскости "А" и "В" на рис.1). Параметры проекций линии вычисляются методом наименьших квадратов по измерению 10 + 15 точек на каждой стереопроекции. Направляющие косинусы линии в пространстве однозначно определяются параметрами линий на двух стереопроециях по обычным формулам аналитической геометрии. А точка на линии как её пересечение с любой плоскостью.

Как известно, с помощью данного метода не может быть восстановлена линия в пространстве, если она лежит в плоскости, проходящей через оба оптических центра стереоаппарата. Поэтому в экспе-

риментальных установках ось стереоаппарата располагается соответствующим образом к направлению треков в искровых камерах.

Для оценки угловых точностей вычислялись параметры всех линий на сетке при разных углах  $\varphi$ , а также отвесные "струны" расположенные в рабочем объёме.

При измерении линии длиной в среднем ~30 см угловые среднеквадратичные ошибки составляют  $\Delta \theta_x \approx \Delta \theta_y = 0,15^\circ$ ,  $\Delta \theta_z = 0,2^\circ$  для I-ой системы стереоаппаратов и  $\Delta \theta_x \approx \Delta \theta_y = 0,25^\circ$ ,  $\Delta \theta_z = 0,3^\circ$  для II-ой системы стереоаппаратов. Эти угловые точности остаются также и для осевых треков, поскольку толщина тестовых линий на сетке и отвесных струн примерно одинаковы с толщиной искрового трека.

#### 5. Связь двух оптических систем и переход в систему "пучка"

Из вышеизложенного ясно, что до сих пор все вычисления проводились в координатной системе сетки в положении " $Z=0$ ".

В реальном физическом эксперименте часто возникает необходимость связать пространственно удаленные координатные системы и в конечном итоге перейти в единую систему отсчета (систему "пучка").

Связь координатных систем и переход в систему "пучка" осуществляется следующим образом. Если для каждой системы стереоаппаратов из системы "сетки" в отдельности перейти в систему пучка, декартовы координатные оси которых соответственно параллельны (при этом ось  $X$  для обеих систем совпадает с осью пучка), то дополнительным измерением расстояния между

началом отсчета выбранных координатных систем осуществляется переход из одной системы координат в другую.

Эта задача осуществляется путем фотографирования "струны", протянутой вдоль центра пучка, проходящей через обе системы и натянутых в каждой системе отвесных "струн". Совершенно аналогичным методом, как было описано в п.4, вычисляются косинусы всех линий для обеих систем стереоаппаратов.

Ось  $X$  для обеих систем выбирается по оси "пучка", а ось  $Z$  определяется векторным произведением  $\vec{Z} = [\vec{X} \times \vec{Y} \text{ ("отвес")}]$  после чего ось  $Y$  определяется как  $\vec{Y} = [\vec{Z} \times \vec{X}]$ . Можно легко убедиться, что выбранные координатные системы являются декартовыми прямоугольными системами, соответствующие оси которых параллельны друг другу в пределах ошибок, поскольку "отвесные" линии заведомо параллельны.

#### 6. Тесты проверки программы и угловые точности "сшивки" координатных систем

Для проверки программы восстановления пространственных событий, а также для получения угловых точностей "сшивки" координатных систем фотографировались натянутые струны проходящие через обе системы (тестовые линии).

Вычисляя параметры тестовых линий для каждой системы фотографирования и перехода в отдельности в систему "пучка" (см. п.5), сравнивались соответствующие углы для каждой линии, которые в области ошибок должны быть одинаковыми. Обмер и вычисление пяти таких тестовых линий, показали, что максимальные

угловые отклонения после "сшивки" координатных систем составляют

$$\Delta \theta_x \approx \Delta \theta_y = 0,35^\circ \quad \text{и} \quad \Delta \theta_z = 0,4^\circ.$$

#### 7. Блок-схема программы восстановления пространственной картины события

После отладки программы в целом все оптические константы, необходимые для полного восстановления картины события в единой системе координат (система "пучка"), вычисляются по фотографиям оптической сетки в двух положениях и координатных "струн".

В дальнейшем, вычисленные однажды величины, входят в качестве констант в программу геометрической реконструкции событий.

Для контроля случайного изменения расположения аппаратов, углов оптических осей, реперных крестов и т.п. в процессе длительной работы достаточно измерить одну тестовую "струну", натянутую произвольно через обе системы.

На рис.4 схематически показана блок-схема программы геометрической реконструкции событий с искровых камер. Измеренные координаты ( $\xi_i, \eta_i$ ) изображения трека в двух фотоаппаратах переводятся в систему сетки на пленке, после чего вычисляются проекции точки на плоскости " $Z = 0$ ".

Для линии дополнительно вычисляются параметры проекции на пл. " $Z = 0$ ". Используя аналогические расчеты для  $N$ -ой проекции определяются координаты точек и параметры линий в пространстве. В последнем блоке программы происходит переход всех данных в систему "пучка".

В итоге вычисляются направляющие косинусы всех треков и координаты точек на линии в общей системе, которые затем используются для физической обработки эксперимента.

В заключение авторы выражают благодарность Цогосяну В.С. за помощь в процессе написания программ и многочисленные консультации при их отладке на БЭСМ-6, а также Асатиани Т.Л., Иванову В.А., Меграбяну Г.К. за полезные замечания при обсуждении работы.

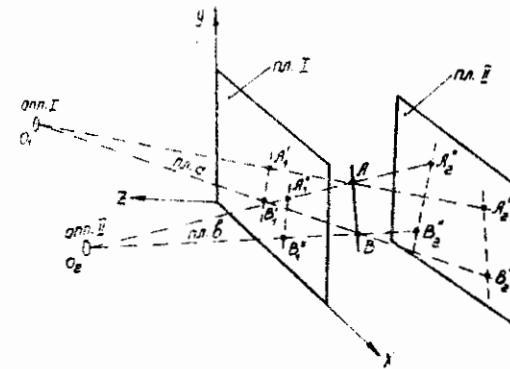


Рис. I

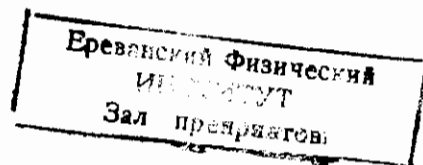




ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.А.Александров, Г.С.Воронов и др. Пузырьковые камеры.  
Госатомииздат М.1963 ,176.
2. В.Б.Виноградов и др. ИТЭФ-503, 1967.
3. С.Я.Никитин. ИТЭФ-5, 1978.
4. В.П.Дроняев. ИТЭФ-85I, 195I.
5. А.П.Гришин, Ю.П.Шкуренко. ИТЭФ-956, 1977.
6. А.У.Абдурахимов и др. ОИЯИ IO-II323, Дубна 1978.

Рукопись поступила I-го ноября 1978 г.



Редактор Л.П.Мукаян

Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ469

ВФ- 03515

Тираж 299

Препринт ЕФМ

Формат издания 60x84/16

Подписано к печати 29/ХП-78г. 1,5 уч.изд.л.ц.10 к.

Издано Отделом научно-технической информации  
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркаряна 2