

# Высокоточная юстировка магнитной структуры современного кольцевого ускорителя

Ю.И. Кирочкин

*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

Особенности высокоточной юстировки современных ускорителей связаны с их отличием от ускорителей предыдущих поколений. Современный ускоритель заряженных частиц отличается, прежде всего, большими геометрическими размерами. Радиус его орбиты может составлять десятки километров. Современный ускоритель включает в себя большое количество основного оборудования: элементов магнито–оптической структуры. Число элементов электромагнитной оптики (квадрупольных линз и дипольных магнитов) может достигать сотен и тысяч единиц, длина вакуумной камеры — до сотни километров.

Большое количество оборудования не компенсируется свободными допусками на точность его установки. Современный ускоритель, наоборот, характеризуется высокими требованиями к точности установки оборудования. Точность взаимного положения соседних квадрупольных линз может достигать 50 мкм по радиусу и по высоте при расстоянии между ними до 48 метров (пример УНК).

## 1. Геодезия строительства туннеля

Как правило, геодезическая наземная сеть, применяемая при строительстве туннеля, используется затем в качестве основы для юстировки оборудования ускорителя. Это понятно: теоретическая круговая орбита ускорителя должна вписаться в узкое пространство туннеля. Отсюда высокие требования к точности прокладки туннеля в теле Земли, в отличие от точности прокладки туннеля метро, где допуски определяются габаритами поезда. Наземная геодезическая сеть создается вдоль туннеля и сносится на его уровень специальными методами. Способы создания сети различны:

метод полигонометрии — ходы с измеренными углами и сторонами [1];

метод трилатерации — измерение сторон между пунктами;

метод триангуляции — измерение углов между пунктами.

В настоящее время может быть эффективно использован метод трилатерации (линейных геодезических засечек) с использованием космической навигационной системы типа GPS (Global Position System). Система GPS использует для определения координат точек земной поверхности около 40 искусственных спутников Земли. Она основана на радиодальномерных измерениях расстояний от антенны приемника, стоящей на определяемом пункте, до спутников с получением вероятнейшего результата. Как показали измерения наземной геодезической сети УНК с помощью GPS, точность определения положения пунктов, расположенных на расстоянии до 6 км друг от друга, характеризуется величиной порядка нескольких миллиметров [2].

## 2. Юстировка магнитной структуры ускорителя

Юстировка оборудования ускорителя предполагает прохождение следующих этапов:

1. Орбита ускорителя делится на примерно равные секции. Каждая секция устанавливается независимо от других. Это позволяет вести строительство туннеля и монтаж оборудования независимыми друг от друга участками. Границы каждой секции определяются

так называемыми базовыми квадруполями. Месторасположение границ секций совпадает с местоположением наземных знаков геодезической сети, координаты которых снесены на подземные геодезические пункты. В этих местах пункты подземной геодезической сети имеют наибольшую точность. От подземных геодезических пунктов устанавливаются базовые квадруполи.

- После установки базовых квадруполей они считаются стоящими на проекте. Базовые квадруполи служат основой для установки квадрупольных линз, расположенных внутри секций. Для этого определяется положение центров линз по радиусу и по высоте относительно проектной траектории орбиты, задаваемой базовыми квадруполями. С этой целью определяется положение центра каждого квадруполя относительно центров соседних квадруполей по радиусу  $r_i$  (см. рисунок). Затем определяются отклонения

$$\Delta_i = r_i - r_{i(\text{проект})},$$

где  $r_{i(\text{проект})}$  — проектное значение.

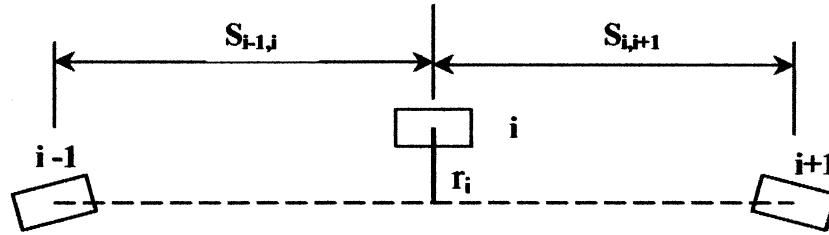


Рис. 1: Схема измерения взаимного положения центров квадрупольных линз.

Расстояния  $\delta$  от центров квадруполей до проектной траектории находятся из решения следующей системы уравнений:

$$\delta = A^{-1} \Delta,$$

где  $\delta$  — вектор неизвестных расстояний  $\delta_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $i$  — номер квадруполя;  $A^{-1}$  — обратная матрица коэффициентов уравнений связи величин  $\delta$  и  $\Delta$ :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{S_{0,1}}{S_{0,1}+S_{1,2}} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\frac{S_{2,3}}{S_{1,2}+S_{2,3}} & 1 & -\frac{S_{1,2}}{S_{1,2}+S_{2,3}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{S_{3,4}}{S_{2,3}+S_{3,4}} & 1 & -\frac{S_{2,3}}{S_{2,3}+S_{3,4}} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\frac{S_{n,n+1}}{S_{n-1,n}+S_{n,n+1}} & 1 \end{pmatrix}$$

где  $S_{i,j}$  — расстояние между центрами квадруполей с номерами  $i$  и  $j$  (квадруполи с номерами 0 и  $n+1$  — крайние (базовые) квадруполи). После получения значений  $\delta$  квадруполи, расположенные внутри секции, смещаются на величины, противоположные значениям  $\delta$ , и оказываются, таким образом, на проектной траектории.

Методика юстировки линз по высоте аналогична.

При юстировке секций независимо друг от друга на их стыках — базовых квадруполях — из-за разного накопления ошибок измерений могут возникнуть изломы. Они могут быть выравнены по методике, изложенной в [3]. Среднюю квадратическую погрешность измерения взаимного положения центров квадруполей 50 мкм при расстоянии между квадруполями до 50 метров обеспечивает струнно-оптическая прецизионная система, разработанная в ИФВЭ [4]. Для представления масштабов решаемой системой задачи можно

сказать, что величина 50 мкм соответствует толщине человеческого волоса, а соотношение этой величины с расстоянием в 48 метров, на котором она должна быть обеспечена, соответствует попаданию из Москвы в цель, расположенную в районе Сочи с точностью 1,5 метра.

3. Центры уже установленных квадрупольных линз служат опорными точками для юстировки дипольных магнитов.

От чего зависит длина секций? Подвижки квадруполь внутри секции должны быть в пределах диапазона работы юстировочных механизмов. В зависимости от количества квадруполь внутри каждой секции ожидаемое накопление ошибок измерений в середине секции может быть различным. Например, для УНК при количестве квадруполь внутри секции до 40 единиц и средней квадратической погрешности определения величины  $m_{\Delta} = \pm 50$  мкм ожидаемая средняя квадратическая погрешность определения положения среднего квадруполь относительно проектной траектории составит по радиусу величину в 3 мм. В то же время систематическая погрешность, равная 50 мкм, вызовет неопределенность в середине секции, равную 20 мм.

## Выводы

1. Предлагаемый метод позволяет устанавливать магнитную структуру кольцевого ускорителя с любой длиной орбиты.
2. При выборе длины секций необходимо руководствоваться величиной диапазона юстировочных приспособлений и заданной точностью юстировки квадрупольных линз.
3. В методике измерений должно быть обращено особое внимание на редуцирование величин систематических погрешностей.

## Список литературы

- [1] Кирочкин Ю.И., Журавлев И.А, Мухин Б.Л., Уланов В.А. Общие принципы геодезического обеспечения сооружения ускорительно-накопительного комплекса (УНК). Известия ВУЗОВ "Геодезия и аэрофотосъемка", вып.2 МИИГАИК. – Москва, 1992.
- [2] Кирочкин Ю.И. Маркузе М.Ю., Перский М.И., Прокопович В.А. Сухов А.Н. Создание геодезической основы для юстировки кольцевого ускорителя с помощью космической навигационной системы. Труды XVI совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998.
- [3] Kirochkin Ju, Mukhin B., Novgorodow A. Smoothing of the errors in the equipment alignment on the joints of the UNK sections. Proceedings of the second international workshop on accelerator alignment. FRG, Hamburg, DESY, 1990.
- [4] Kirochkin Ju. The wire-optical method for the high precision accelerator alignment. Proceedings of the XVII International Conference on High Energy Accelerators, Dubna, 1998.