

## Создание геодезической основы для юстировки кольцевого ускорителя с помощью космической навигационной системы

Ю.И. Кирочкин (*ИФВЭ, Протвино, Россия*)  
М.Ю. Маркузе, М.И. Перский, В.А. Прокопович, А.Н. Сухов (*ГУЗ*)

Юстировка квадрупольных магнитов ускорительно-накопительного комплекса УНК в соответствии с физическим обоснованием [1] устанавливает точность их взаимного положения в средних квадратических величинах  $\pm 50$  мкм по радиусу и  $\pm 60$  мкм по высоте. Юстировка УНК-600, длина орбиты которого превышает 20 км, предусматривает следующую технологию [2]:

1. От пунктов подземной геодезической сети, развитой в период проходки туннеля, устанавливаются на проектное положение так называемые базовые квадруполи. Они делят магнитную структуру УНК на 12 примерно равных секций по 30-40 квадруполей в каждой.

2. В отдельно взятой секции квадруполи устанавливаются на проектную траекторию орбиты, проходящую через центры двух базовых квадруполей.

3. От установленных квадруполей юстируются диполи, ионопровод и другое оборудование.

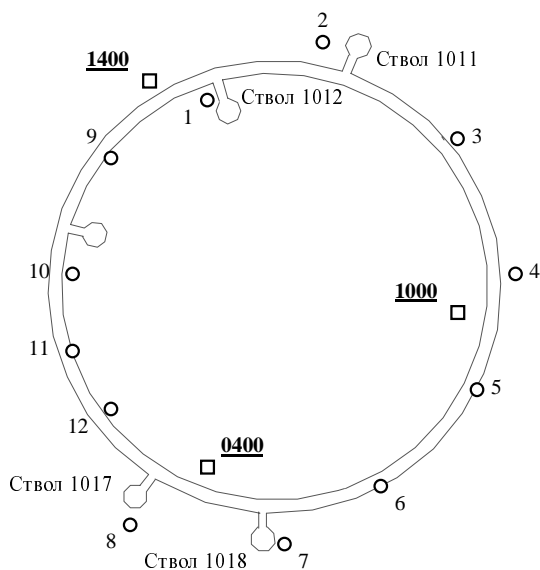
Базовые квадруполи устанавливаются от пунктов подземной геодезической сети, которые закладывались и наблюдались в процессе проходки туннеля. Технология проходки предусматривала контрольное нагнетание бетона под давлением за собранную оболочку туннеля. Однако для ускорения строительно-проходческих работ производство контрольного нагнетания было отложено на более поздние сроки. Между тем из опыта маркшейдерских работ контрольное нагнетание бетона может вызвать смещение туннеля в поперечном направлении на величину до 40-50 мм. Соответственно и пункты подземной геодезической сети вместе с туннелем могли быть сдвинуты на ту же величину. Это обстоятельство, а также большой срок, прошедший с момента определения координат многих пунктов подземной сети (более 10 лет), требовали обновить координаты геодезической сети, прежде чем использовать ее в качестве основы для юстировки.

Повторное определение координат подземных пунктов потребовало прежде всего перенаблюдения наземной геодезической сети. Ранее сеть создавалась методом полигонометрии. Сеть включала в себя около 50 пунктов с большим объемом измерений углов, линий и астрономических азимутов. Точность измерений обеспечивала взаимное положение соседних пунктов сети с ошибкой не хуже  $\pm 9$  мм на расстоянии до 1600 метров. Однако повторить эти измерения не представлялось возможным ни по экономическим, ни по техническим соображениям. За прошедшие годы сильно изменилась ситуация в районе строительства: заросли просеки, обеспечивающие прямую видимость между пунктами, ее закрыли новые здания и сооружения, при строительных работах был уничтожен ряд пунктов сети. Повторное наблюдение наземной сети обычными геодезическими методами представляло собой, таким образом, трудоемкую и дорогостоящую операцию. Поэтому для определения координат наземных пунктов был выбран современный, более экономичный метод с использованием космической навигационной системы GPS (Global Position System).

Для измерений было заложено 12 пунктов новой наземной сети (рис.1). Каждый пункт располагался в непосредственной близости от вертикального ствола или кабельной шахты, через которые можно было передать координаты на пункт подземной сети, находящийся непосредственно около базового квадруполя. Для привязки новых наземных пунктов к системе координат УНК в новую сеть в качестве исходных были включены 3 пункта старой наземной сети. При выборе местоположения всех 15 пунктов стремились к максимальной открытости неба над ними, от чего в значительной мере зависит точность работы навигационной системы.

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.

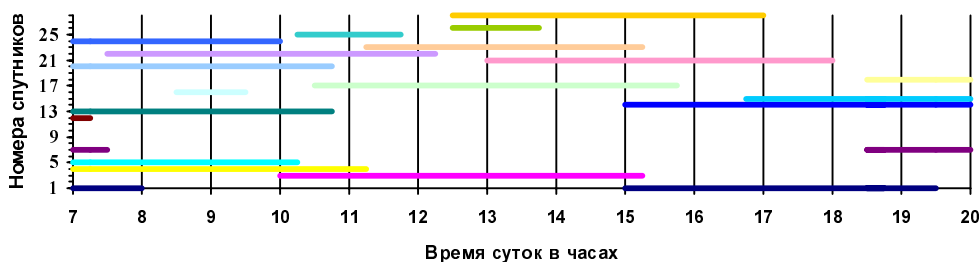


**Рис. 1. Схема новой наземной геодезической сети УНК.**

В соответствии с общими требованиями на выполнение наблюдений в зоне работ должно находиться не менее четырех ИСЗ. При этом геометрия расположения искусственных спутников по отношению к определяемому пункту должна обеспечивать значение так называемого геометрического фактора (PDOP) меньше пяти.

С целью определения количества и фактического положения ИСЗ в районе работ на момент выполнения наблюдений было выполнено планирование работ. Планирование выполнялось на фирменном лицензированном в России программном пакете PRISM (USA, Ashtech).

На рис. 2 для пункта с геодезическими координатами  $B = 54^{\circ} 23'$  и  $L = 37^{\circ} 19'$  представлено количество ИСЗ на предполагаемый момент выполнения работ. Из приведенных данных следует, что необходимое количество спутников (четыре) можно наблюдать практически в течение всего отрезка наблюдений.



**Рис. 2. Наблюдаемые спутники в районе работ на 16.06.97.**

Возможное значение геометрического фактора на ту же дату представлено на рис. 3. Хорошо видно, на каких временных отрезках PDOP меньше 5. Именно они были выбраны для наблюдений.

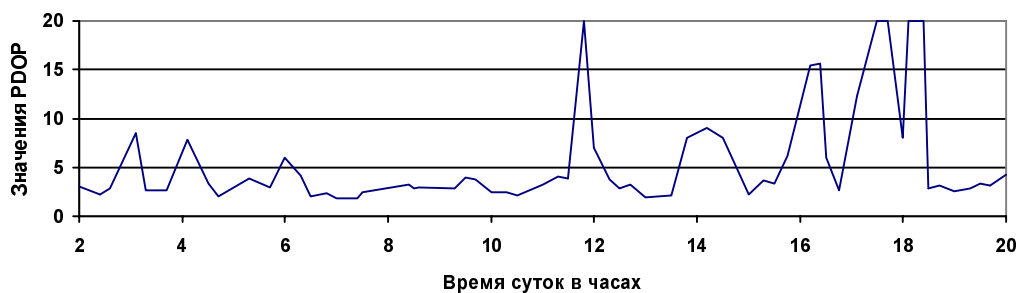


Рис. 3. Ожидаемые значения геометрического фактора PDOP на 16.06.97.

Полевые измерения производились комплектом спутниковых приемников американской фирмы Ashtech. Основные технические характеристики аппаратуры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики аппаратуры.

Характеристики	Тип приемника	
	Dimension	Z-12
Число каналов	12	12
Частоты	L1	L1 и L2
Точность определения абсолютного местоположения в статическом режиме, в метрах	5-10	5-10
Точность определения относительного положения в статическом режиме, в метрах	0,002 (наблюдения не менее 20 минут с 20-секундным интервалом)	
Объем памяти, Мгб	1	2

Работа на станции (на наблюдаемом пункте) проводилась в соответствии с указаниями по эксплуатации приборов, записанными в руководстве пользователя приемной аппаратуры.

- центрирование антенны приемника над центром определяемого пункта с помощью оптического отвеса (средняя квадратическая ошибка 0,5 мм);
- измерение высоты антенны над центром пункта (до целых миллиметров);
- ввод в память приемника значения угла отсечки (15 градусов);
- ввод в память приемника значения дискретности измерений (20 секунд);
- контроль значения в процессе измерений величины геометрического фактора ( $PDOP < 5$ );
- наблюдения продолжительностью 30-40 минут.

Взаимное положение пунктов определялось в рамках статического метода. Работы проводились в 2 этапа в июне и в сентябре 1997 года. В процессе измерений на 1 этапе один приемник непрерывно работал на исходном пункте 1400. Второй приемник в то же самое время измерял последовательно на всех 12 определяемых и 2 исходных пунктах. На 2 этапе неподвижный приемник стоял на исходном пункте 1000.

Математическая обработка на программном пакете PRISM (Ashtech) позволяет получить координаты всех измеренных пунктов в американской системе координат WGS-84. Далее координаты перевычисляются в государственную систему координат России. Для этого координаты хотя бы 2 исходных пунктов сети УНК должны быть известны в государственной системе. Однако координаты всех пунктов наземной сети определены только в системе УНК. В основу системы координат УНК положена местная система координат, преобразованная так, чтобы при строительстве не было необходимости вводить поправки в измеренные на земной поверхности углы и линии. В установлении связи между системой УНК и государственной системой координат необходимости не было. К тому же связь эта настолько сложна, что установление ее

представляет собой трудноразрешимую задачу. Поэтому получить координаты 12 определяемых пунктов в системе координат УНК отработанным путем не представилось возможным.

Для вычисления координат были использованы расстояния между исходными и определяемыми пунктами, которые вычисляются пакетом PRISM наряду с координатами. Таким образом, были получены расстояния (длины векторов) от пунктов 1000 и 1400 до каждого пункта новой сети. Далее координаты всех пунктов новой сети были вычислены от исходных пунктов 1000 и 1400 методом линейной засечки. Точность определения расстояний из протокола обработки измерений характеризуется средней квадратической ошибкой менее 0,007 м. Сравнение значений измеренных линий между исходными пунктами с их значениями, вычисленными по координатам исходных пунктов (таблица 2), показало хорошую сходимость.

**Таблица 2. Сравнение измеренных линий с исходными значениями.**

Между пунктами	Горизонтальные расстояния, м	Исходные величины, м	Невязка, м
<b>Июнь 1997 г.</b>			
1000 1400	5606,702	5606,706	-0,004
0400 1000	5377,380	5377,375	0,005
<b>Сентябрь 1997 г.</b>			
1000 1400	5606,702	5606,706	-0,004
0400 1000	5377,368	5377,375	-0,007

**Таблица 3. Результаты привязки отвесов к пунктам “новой” наземной и “старой” подземной сети.**

№№ пунктов	Невязки, (м)			
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta R$	$\Delta A$
10	-0,014	-0,015	-0,010	-0,018
11	-0,076	0,007	-0,022	-0,074
12	0,013	-0,021	-0,005	0,024

Результаты говорят об удовлетворительном качестве измерений, а также о хорошей устойчивости центров исходных пунктов, заложенных более 10 лет назад.

Для определения координат подземных пунктов теперь необходимо с помощью отвеса, опущенного в шахту через кабельные скважины или ближайшие шахтные стволы, перенести координаты с наземных пунктов на горизонт туннеля. Эта работа уже выполнена на пунктах 10,11,12. На этих пунктах для сопоставления “старых” и “новых” координат были определены координаты одной и той же точки - опущенного в кабельную скважину нитяного отвеса - от пунктов подземной сети со старыми не уточненными координатами и от новых наземных пунктов. Результаты сведены в таблицу 3, где невязки по координатным осям  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  трансформированы в невязки в радиальном  $\Delta R$  и азимутальном  $\Delta A$  (продольном) направлениях.

Как видим, все невязки находятся в пределах точности измерений, поскольку продольное положение пунктов подземной сети характеризуется величиной порядка 20 мм на 100 м. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что измерения космической навигационной системой обеспечили необходимую точность получения координат новой геодезической сети и могут быть рекомендованы для выполнения точных геодезических работ по юстировке больших ускорителей.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ (Физическое обоснование). ИФВЭ 93-97 ОУНК Протвино 1993.
2. Кирочкин Ю.И., Журавлев И.А., Мухин Б.Л., Уланов В.А. Общие принципы геодезического обеспечения сооружения ускорительно-накопительного комплекса (УНК). Препринт ИФВЭ 91-19. Протвино, 1991.