

УДК 528.425

А.Л. Тригер

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ СКАНИРУЮЩЕЙ ТАХЕОМЕТРИИ**

Семинар № 2

Традиционные методы маркшейдерских съемок, такие как тахеометрическая, фототопографическая и другие, как правило, выполняются на объектах, находящихся в статическом положении. Однако, в связи с развитием новых технических средств и методов, в частности лазерной и сканирующей тахеометрией, появилась возможность решения ряда задач связанных с одновременными съемками множества объектов, находящихся в движении или меняющих свои параметры.

Сканирующая тахеометрия и традиционные методы съемок, по сути, реализуют две отличные идеологии сбора пространственных данных. Так, например, в традиционных методах съемок плотность расстановки пикетов определяется масштабом топографической съемки и характером объекта. На практике плотность ограничена производительностью съемочной бригады, которая, как правило, составляет несколько сотен пикетов в день. В то же время реальная плотность при выполнении съемок методами сканирующей тахеометрии может достигнуть 50–100 тысяч измерений в сек. (3–5 точек на 1 мх2 земной поверхности). Сканирующая тахеометрия основана на сканировании местности лазерным излучением. Сам термин "сканирование" взят из радиолокации и обозначает изменение положения в пространстве главного лепестка излучения. Преимущественное использо-

вание в сканирующей тахеометрии лазерного излучения объясняется тем, что луч лазера когерентен, имеет малую угловую расходимость и достаточную мощность. Малая расходимость лазерного луча позволяет определять, угловые координаты с высокой точностью и на значительном удалении объекта от точки стояния прибора.

Процессы измерения угловых и линейных величин в сканирующей тахеометрии сводятся, в основном, к измерению временных интервалов, поэтому информация может быть представлена в цифровой форме простыми техническими средствами.

Известные способы [1] определения направлений и расстояний, заключающиеся в том, что развертывание луча осуществляют в плоскости горизонтальной и вертикальной, причем в качестве начала отсчета времени используют сигнал, вырабатываемый внутри системы измерения. В результате такого сканирования получают информацию о горизонтальном направлении и расстоянии или о вертикальном направлении и расстоянии.

Для одновременного определения горизонтальных, вертикальных направлений и расстояний до объекта предлагается способ [2] сущность которого заключается в том, что луч лазера преобразуется в две световые плоскости в форме секторов, расходящихся от опорной точки под определенным углом и имеющих одинаковый, но противоположный наклон к

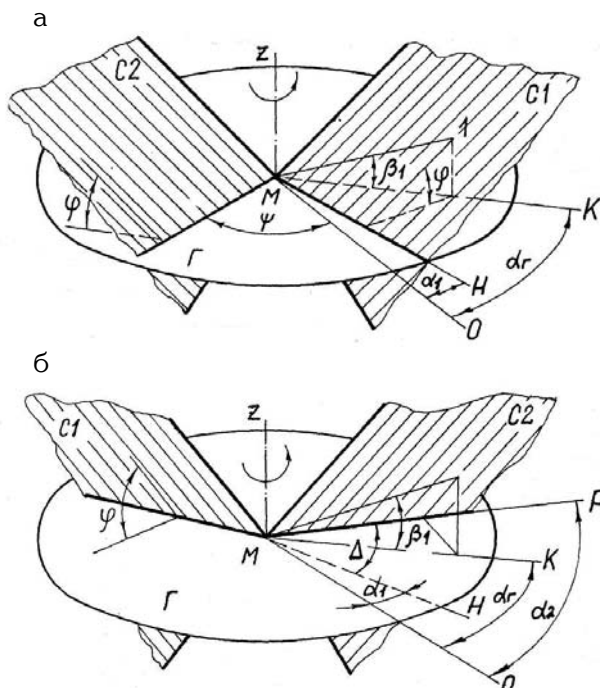


Рис. 1. Способ определения координат двумя наклонными плоскостями

пересечение объекта световой плоскостью C1, рис. 1, б – плоскостью C2; на рис. 2 показана развертка одного оборота системы световых плоскостей.

Так как сформированные световые плоскости имеют одинаковый, но противоположный наклон φ к горизонтальной плоскости, то если объект I находится выше горизонтальной плоскости Γ , проходящей через опорную точку M, наклонная световая плоскость C1 при вращении вокруг вертикальной оси Z достигает объекта

горизонтальной плоскости. Вращают световые плоскости в прямом и обратном направлениях вокруг вертикальной оси, проходящей через опорную точку, сохраняя углы наклона и разворота неизменными. Измеряют интервалы времени между начальными сигналами, вырабатываемыми и датчиком нуля и конечными сигналами, отраженными от объекта и принятыми в опорной точке. По измеренным интервалам вычисляют координаты объекта. Световые плоскости жестко связаны между собой и имеют возможность вращаться вокруг вертикальной оси Z, проходящей через опорную точку, синхронно, сохраняя углы наклона к горизонтальной плоскости неизменными, а на объекте устанавливается отражатель, например, уголкового.

Способ поясняется чертежом, где на рис. 1 изображена схема определения координат: рис. 1, а показывает

раньше, чем линия MN пересечения горизонтальной и световой плоскостей достигает направления на объект – линия МК, т.е. отраженный от объекта I сигнал зафиксирует интервал времени τ_{α_1} , пропорциональный углу поворота α_1 (рис. 1, а), а световая плоскость C2 достигает объекта I позднее, чем ее линия MP пересечения с горизонтальной плоскостью Γ , и второй отраженный сигнал зафиксирует интервал времени τ_{α_2} , пропорциональный углу поворота α_2 , в то время как истинное горизонтальное направление на объект будет α_0 , (рис. 1, б).

Угол Δ , равный разности α_2 и α_1 , зависит от угла наклона световых плоскостей C1 и C2 и определяет вертикальное направление, т.к. связан с вертикальным углом β_1 превышения объекта над горизонтальной плоскостью зависимостью:

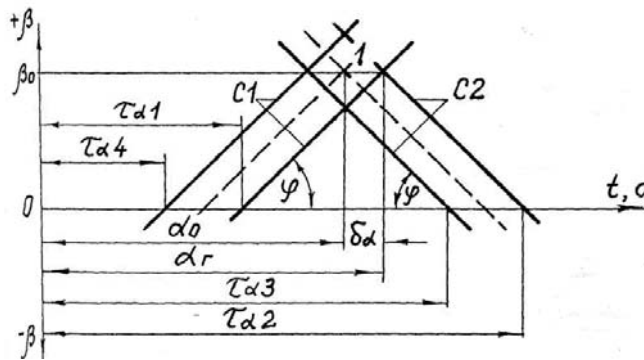


Рис. 2. Развертка одного оборота системы световых плоскостей

$$\beta_1 = k \frac{\Delta}{2} = k \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}, \quad (1)$$

где $k = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент, учитывающий наклон световых плоскостей C1 и C2.

В случае расположения объекта I ниже горизонтальной плоскости Г (на чертеже не показано) световая плоскость C1 при вращении вокруг оси Z достигает объекта I позднее, чем линия MN пересечения горизонтальной и световой плоскостей достигает направления на объект – линия МК, а световая плоскость C2 достигает объекта раньше, чем линия MP пересечения с горизонтальной плоскостью Г. Поэтому угол α_1 поворота световой плоскости C1 будет больше угла α_2 поворота плоскости C2 и разность α_1 и α_2 принимает отрицательное значение, следовательно величина β будет со знаком минус, что и является признаком расположения объекта I ниже горизонтальной плоскости Г. Если объект I расположен строго в горизонтальной плоскости Г, угол α_1 будет равен углу α_2 , в связи с чем вертикальное направление принимает нулевое значение.

Горизонтальное направление на объект определяется по формуле:

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}. \quad (2)$$

Следовательно, измерив за один оборот наклонных световых плоскостей два временных интервала, пропорциональных углам поворота световых плоскостей,

можно одновременно определить горизонтальное и вертикальное направления. Но величина угла, вычисленная по формуле (2) отличается от истинного горизонтального направления на величину δ_{α} , (рис. 2.), т.к. из-за конечной скорости распространения света сигнал, отраженный от объекта, будет зарегистрирован на опорной точке с задержкой на время τ_R :

$$\tau_R = \frac{2R}{V}, \quad (3)$$

где R – расстояния от опорной точки до объекта I; V – скорость распространения сигнала.

За это время световые плоскости повернутся на угол δ_{α} .

Для того чтобы определить истинное горизонтальное направление на объект, а также расстояние до него, световые плоскости вращают в обратном направлении. При этом отраженные от объекта сигналы зафиксируют интервал времени τ_{α_3} , пропорциональный углу поворота α_3 плоскости C2, и τ_{α_4} , пропорциональный α_4 плоскости C1. Истинное горизонтальное направление определяется по формуле:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2}. \quad (4)$$

Расстояние до объекта определяется на основании интервала времени $\Delta\tau$, равного разности интервалов τ_{α_1} и τ_{α_2} по формуле:

$$R = V \frac{\Delta\tau}{4} = V \frac{\tau_{\alpha_1} - \tau_{\alpha_4}}{4}. \quad (5)$$

В знаменателе формулы (5) стоит постоянная величина, равная 4, т.к. за время $\tau_{\alpha_1} - \tau_{\alpha_4}$ сигнал проходит расстояние R от опорной точки до объекта два раза туда и обратно.

Практически одновременно с измерением временных интервалов измеряют и период вращения T световых плоскостей, а координаты объекта вычисляют по формулам:

$$\alpha = \frac{\tau_{\alpha_2} + \tau_{\alpha_4}}{2T} - \text{горизонтальное направление;}$$

$\beta_0 = k \frac{\tau_{\alpha_2} - \tau_{\alpha_1}}{2T}$ – вертикальное направление;

$R = \frac{V(\tau_{\alpha_1} - \tau_{\alpha_4})}{4}$ – расстояние до объекта.

Таким образом, измерив четыре временных интервала (по два от каждой плоскости), можно определить три координаты объекта, не прибегая к помощи специальных механизмов для измерения углов. Наличие угла поворота плоскостей позволяет идентифицировать световые плоскости и исключить многозначность при определении вертикального направления. При этом исключается операция визирования, а процесс измерения не разделяется на операции измерения каждой координаты в отдельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицкий Д.В. Основные принципы цифрового картографирования местности. М. «Недра», 1988.

2. Тригер Л.М., Тригер А.Л. Способ определения координат объекта. а.с. №1681636. **ПАТ**

Коротко об авторе

Тригер А.Л. – аспирант кафедры маркшейдерского дела и геодезии Московского государственного горного университета.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2009». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Н. Попов.



УДК 528.425

А.Л. Тригер**ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКАНИРУЮЩИХ
ТАХЕОМЕТРОВ ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО
ОРИЕНТИРОВАНИЯ МНОЖЕСТВА ОБЪЕКТОВ**

Семинар № 2

При сооружении солнечных электростанций одной из актуальных задач является задача одновременного определения пространственного положения и ориентирования нескольких тысяч зеркал (гелиостатов).

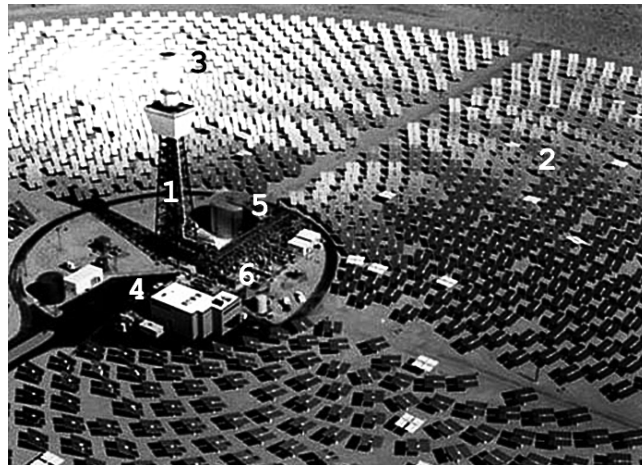
Принцип работы солнечной электростанции прост: поле из множества гелиостатов, отслеживающих движение Солнца, собирает свет и направляет его на вершину высокой башни (см. рис. 1), где яркий солнечный луч превращает воду в пар. Пар крутит турбины, соединенные с электрическими генераторами.

По аналогичной схеме создаются установки во многих странах. Крупным сооружением такого типа является и электростанция в пустыне Неgev. По заказу фирмы «Луз», осуществляющей это строительство, нами была разработана методика съемки и обработки результатов измерений положения гелиостатов с использованием сканирующего лазерного тахеометра Leica Scan Station 2, внешний вид которого приведен на рис. 2.

Сканирующий тахеометр устанавливают на искусственно созданном возвышении, и методом обратной засечки, по известным пунктам геодезической сети, закреплённым с помощью специальных марок определяют его местоположение.

Затем, сканируя поле зеркал, получаем облако точек. На рис. 3 представлена визуализация результатов трёхмерного лазерного сканирования группы зеркал.

Процесс разработки результатов измерений проводился по следующему алгоритму:



- 1 Центральная башня
- 2 Поле гелиостатов
- 3 Нагревательный элемент
- 4 Паровая турбина
- 5 Уранилище воды
- 6 Службные помещения

Рис 1. Основные элементы солнечной электростанции



Рис. 2. Leica Scan Station2

1. Группируем точки внутри окружности радиуса $R=1.4$ м вокруг центра каждого из зеркал

2. Разделяем полученные группы на подгруппы по направлению Z от верхней точки (отделение фона от гелиостата)

3. Разделяем полученные группы на подгруппы с размером, кратным плотности сканирования (≈ 5 см)

4. Сравниваем отдельные подгруппы, убирая те, у которых $Z_{\max} + \Delta$ значительно больше соседних

5. Из группы отфильтрованных точек находим уравнение наилучшей приближающей плоскости, используя метод наименьших квадратов.

Пусть задано уравнение плоскости $z = a + bx + cy$ (1). Для некоторой группы данных

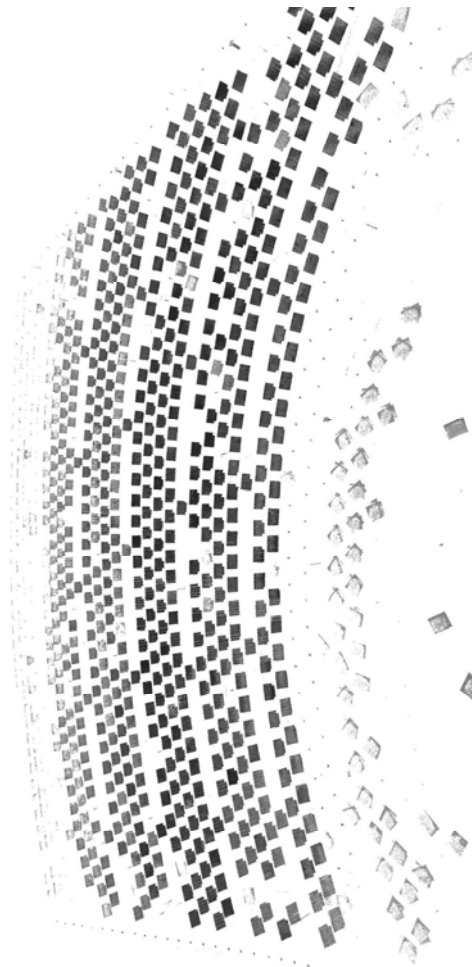


Рис. 3. Поле гелиостатов – результаты лазерного трёхмерного сканирования

$$(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n),$$

где $n \geq 3$, наилучшая приближающая плоскость $z = f(x, y)$, имеет среднеквадратичную ошибку

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [z_i - f(x_i, y_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [z_i - (a + bx_i + cy_i)]^2 = \min \quad (2)$$

где a, b и c - неизвестные коэффициенты, а точки x_i, y_i, z_i известны заранее. Для минимизации среднеквадратичной ошибки, коэффициенты a, b и

с должны обращать в ноль первые производные:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^k [z_i - (a + bx_i + cy_i)] = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^k x_i [z_i - (a + bx_i + cy_i)] = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^k y_i [z_i - (a + bx_i + cy_i)] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Решая следующую систему уравнений, получаем:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n z_i = a \sum_{i=1}^n 1 + b \sum_{i=1}^n x_i + c \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i = a \sum_{i=1}^n y_i + b \sum_{i=1}^n x_i y_i + c \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{cases} \quad (4)$$

Решением данной системы уравнений будут искомые коэффициенты плоскости a,b,c.

6. Проецируем исходную группу точек на горизонтальную плоскость

7. Находим приближение границ группы с помощью метода выпуклой оболочки

8. Находим минимальный прямоугольник, ограничивающий выпуклую оболочку

9. Вычисляем центр зеркала как пересечение диагоналей найденного прямоугольника

10. Находим корректирующие углы, как разницу между расчетным и истинным положением гелиостата относительно центральной башни.

В ходе проведения работ достигнута необходимая точность калибровки углов гелиостата в ± 0.0002 радиана и производительность съёмочных работ в 1500 гелиостатов (5-6 станций съёмки) за один рабочий день.

Коротко об авторе

Тригер А.Л. – аспирант кафедры маркшейдерского дела и геодезии Московского государственного горного университета.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2009». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Н. Попов.

