УДК 528.7;629.78;630.52:587/588(0.75.80)

Е.А.НЕСТЕРЕНКО, *канд.техн.наук, ассистент, eanes@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

E.A.NESTERENKO, *PhD in eng.sc., assistant lecturer, eanes@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Изложены расчеты и выводы о возможности оптимизации процесса лазерного сканирования объектов за счет определения числа станций сканирования и, соответственно, осуществления прогноза временны́х затрат на этапе планирования съемки, а также за счет выбора режима плотности сканирования на основании данных о размерах, форме объекта и необходимой точности результатов.

Ключевые слова: метод съемки, оптимизация, лазерный сканер.

EFFICIENT APPLICATION OF LASER SCANNING SYSTEM

Conclusions about an opportunity of laser scanner survey optimization at the expense of scanstations number determination and time spending forecasts are explicated in the article. Also there are some conclusions about survey optimization at the expense of scanning density rate for the reason of information about form, parameters of objects and the accuracy of survey.

Key words: method of survey, optimization, laser scanner.

Как известно, руководство любого горно-добывающего предприятия заинтересовано в уменьшении расходов и увеличении доходов, поэтому нежелание тратить значительные средства на решение поставленных маркшейдерской службой задач вполне понятно. Приобретение дорогостоящего оборудования, способного значительно оптимизировать работу маркшейдера (например, лазерно-сканирующей системы (ЛСС)) не дает предприятию прямого экономического эффекта, поэтому не рассматривается руководством в качестве приоритетного инвестиционного вложения.

В основном, маркшейдерские отделы горно-добывающих предприятий помимо оптико-механических приборов (теодолиты, нивелиры) располагают современными электронными тахеометрами. Производительность и точностные характеристики данных приборов позволяют решать практически все задачи, стоящие перед маркшейдерами. Необходимость в проведении съемки с более высокой степенью достоверности, детальности и плотности возникает не так часто. К тому же подобный вопрос встает чаще всего перед маркшейдерской службой на предприятиях, ведущих разработку месторождений открытым способом. И на карьерах, заинтересованных в указанном виде съемки, уже длительное время и успешно используются фотограмметрические технологии (как например, на Центральном руднике ОАО «Апатит», г.Кировск). Современное оборудование и программное обеспечение для фотограмметрии является дорогостоящим и, следовательно, покупка еще и ЛСС не является обоснованной. И это несмотря на то, что стоимость подобных систем постепенно снижается от 4500 до 980 тыс.руб. за счет появления сканеров, более легких и адаптированных по точности для съемки карьеров.

Необходимость в проведении детальной и точной съемки с быстрым получением результата в виде трехмерной модели объекта (карьера, отвала) возникает при полной утере горно-графической документации, при ограниченности времени, при неаккуратной и хаотичной отработке месторождения открытым способом. В этом случае технологии лазерного сканирования незаменимы. Воспользоваться данными технологиями маркшейдерская служба, не имеющая в активе лазерного сканера, может, обратившись в организацию, специализирующуюся на подобного вида съемках.

Организация функционирует следующим образом. Она приобретает несколько наземных лазерных сканеров для различного вида работ. Например, фазовый для более точной съемки (Imager 5006, FARO LS 880, Leica HDS 6000) и импульсный для съемки на расстоянии нескольких сотен метров (Leica HDS 8800, Leica ScanStation, Optech ILRIS-HD). Для того, чтобы окупить затраты и получить прибыль, подобной организации необходимо постоянно производить съемки и обрабатывать полученную информацию. Увеличение конкуренции на рынке предложений вынуждает снижать цены на соответствующие съемки и браться за любой объем работ. Это, в свою очередь, приводит к увеличению числа заказов. Грамотно распорядиться своим временем и оптимизировать работу позволяет использование методики, предложенной ниже.

Оптимизация по числу скан-позиций. Число станций сканирования (скан-позиций) должно быть достаточным для полного охвата снимаемого объекта, но при этом необходимо минимизировать их количество для уменьшения времени проведения съемки и количества измерительной информации о снимаемом объекте.

Если снимаемый объект (склад, отвал) имеет форму усеченного конуса, то расстановка скан-позиций вокруг него будет соответствовать рис.1, *а*.

Необходимо расположить точки установки сканера, во-первых, на расстоянии l, учитывающем охват съемкой по высоте и, во-вторых, так, чтобы дальности действия сканера (окружности радиуса r) соприкасались в точках пересечения окружностей радиусом r с внешним (нижним) контуром объекта, т.е. с окружностью радиуса R (точки A и B на рис.1, *б*).

Введем переменную

$$t_i = \arccos\frac{R_i^2 + (R_i + l)^2 - r^2}{2R_i(R_i + l)}.$$

Тогда количество станций n можно определить из решения геометрической задачи (схема на рис.1, *б*) с использованием теоремы косинусов по формуле

$$n = \frac{\pi}{t_i}. \qquad (1)$$

Областью определения функции является выражение $r_{\min} < l < r$, где $r_{\min}$ – минимальное расстояние, измеряемое лазерным сканером, что обосновывает приведенные выше допустимые значения данных переменных.

Для формирования зон перекрытия, в пределах которых во время съемки будут устанавливаться марки внешнего ориентирования, в формулу (1) необходимо подставить дальность сканирования r на 10 % меньше максимальной. Тогда при производстве съемки от точек соприкосновения уменьшенных радиусов сканирования (от точек A и B на рис.1, *б*) в обе стороны сформируются зоны перекрытия шириной $0{,}2r$, где устанавливаются марки внешнего ориентирования, которые и будут являться общими для соседних сканов. В результате можно будет решить задачу регистрации сканов в единой системе координат.

Формулы были выведены также для объектов следующих форм: призма с трапециевидным сечением, ограниченная с двух сторон усеченными конусами, и Г-образная призма (рис.2, *а*) соответственно

$$n = \frac{L}{\sqrt{r^2 - l^2}} + \frac{\pi}{t}; \qquad (2)$$

$$n' = \frac{L_1}{\sqrt{r^2 - l^2}} + \frac{L_2}{\sqrt{r^2 - l^2}} + \frac{\pi}{4t_2} + \frac{\pi}{t_1}. \qquad (3)$$

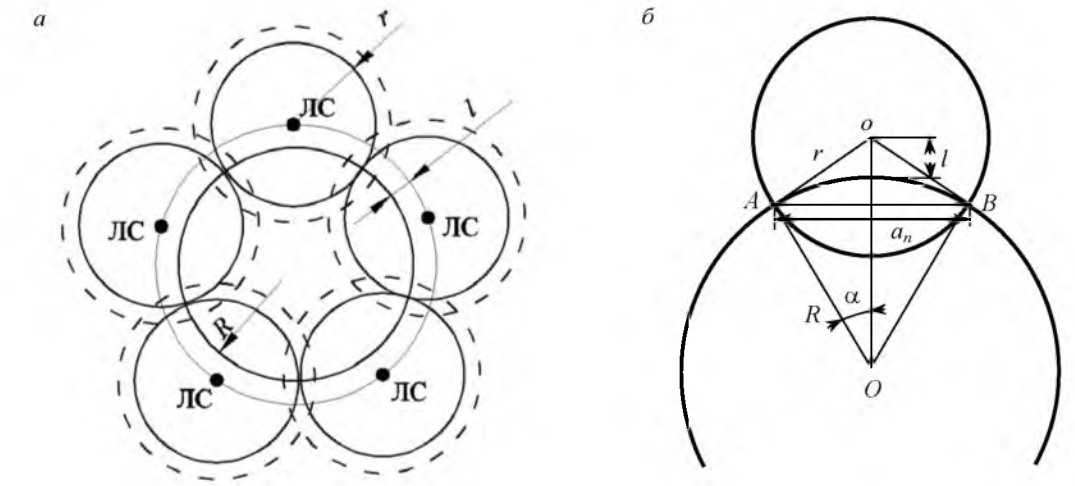


Рис.1. Расстановка сканерных станций вокруг объекта (*а*) и их взаимное расположение (*б*)
ЛС – лазерный сканер

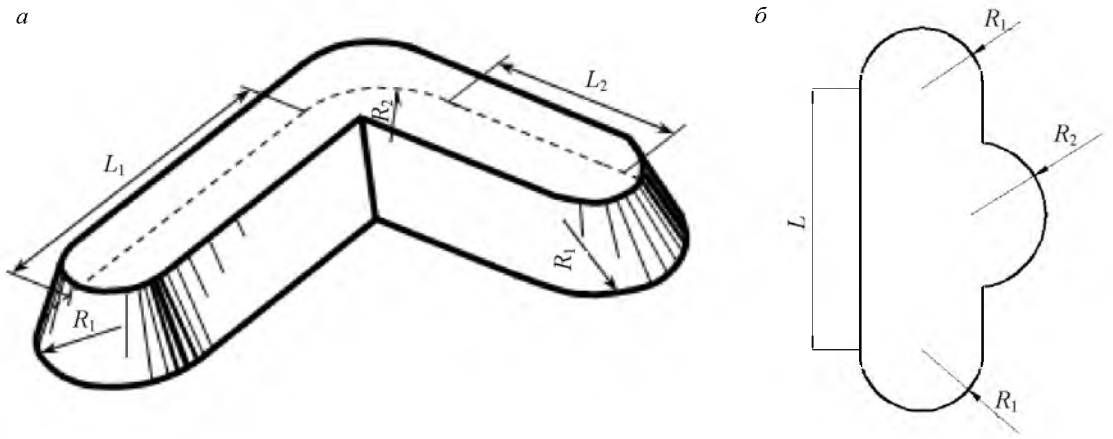


Рис.2. Нижняя граница изучаемой Г-образной призмы (*а*) и карьера (*б*)

Область определения функций (2), (3) идентична области определения функции (1), т.е. $r_{\min} < l < r$, где $r_{\min}$ – минимальное расстояние, измеряемое лазерным сканером.

В отношении расстановки станций при сканировании песчаных карьеров, имеющих один уступ, геометрически схема определения их количества остается прежней (см. рис.1, *б*). Соответственно, и формулы (1) и (2) не претерпевают изменений. Если карьер имеет сложную форму и его нижнюю границу можно условно разбить на прямоугольник и три полуокружности, как показано на рис.3, *б*, то формула (3) примет вид

$$n = \frac{L}{\sqrt{r^2 - l^2}} + \frac{\pi}{t} + \frac{\pi}{2t} - \frac{R}{\sqrt{r^2 - l^2}}. \qquad (4)$$

При выполнении контрольных съемок отдельных участков карьера, складов полезного ископаемого, а также при съемке геометрических параметров конструктивных элементов зданий, сооружений, архитектурно-исторических памятников возникает задача выполнения этих работ с более высокой и определенной точностью. Для лазерно-сканирующих систем фазового типа измерения дальности (Imager 5006, FARO LS 880, Leica HDS 6000) погрешность съемки m_c зависит от дальности (радиуса) сканирования r и свойств отражающей способности поверхности снимаемого объекта $I_{отр}$ – $m_c = f(r, I_{отр})$. Эта зависимость приведена в технических паспортах лазерных сканеров этого типа. Следовательно, задавая радиусы

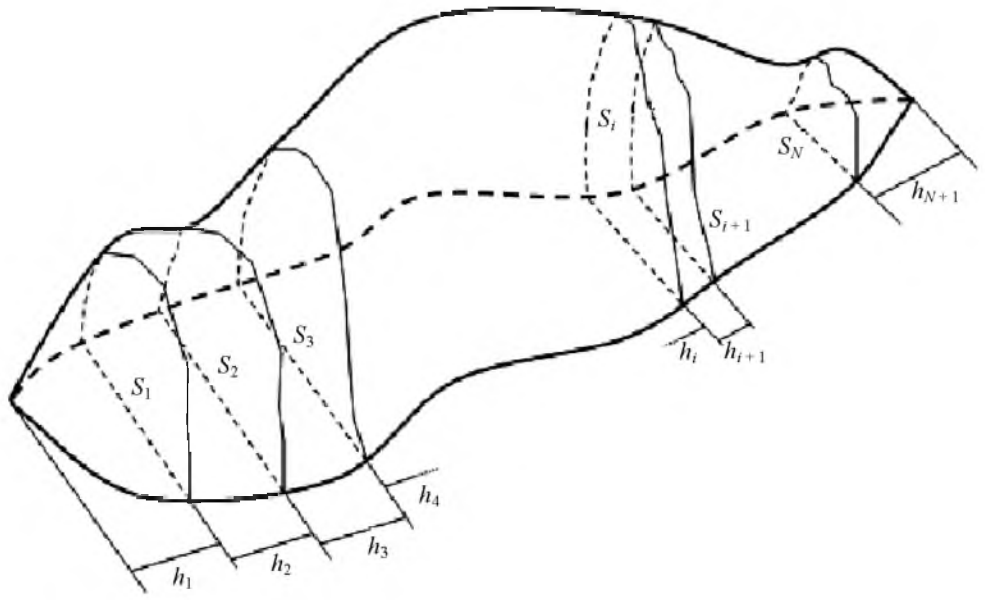


Рис.3. Схема определения объема склада полезного ископаемого способом вертикальных сечений S_i – площади сечений, $i = 1, 2, 3, \ldots, N$; h_i – расстояния от границ склада полезного ископаемого до ближайших сечений и между сечениями, $i = 1, 2, 3, \ldots, N + 1$

съемки при определенной отражающей способности поверхности снимаемого объекта, можно определить, какая им будет соответствовать погрешность съемки. Затем, используя выбранный радиус съемки, можно запланировать съемку упомянутых объектов с наперед заданной погрешностью.

Оптимизация процесса сканирования за счет выбора режима съемки. Предлагается также оптимизировать процесс сканирования за счет выбора режима съемки, позволяющего уменьшить погрешность последующего определения объема снимаемого тела (отвала пустой породы, склада полезного ископаемого, насыпи).

Режим съемки определяется плотностью сканирования, т.е. количеством точек лазерных отражений, получаемых при съемке. Эту величину, в свою очередь, задает число вертикальных сечений, представляющих собой движение лазерного луча по вертикали. Для определения данного числа была использована модель маркшейдерско-геодезических измерительных процессов традиционной съемки, с дискретным получением точек при съемке склада (отвала, насыпи) (рис.3). На представленной модели изучался процесс накопления погрешностей при съемке и зависимость погрешности определения объема тела от числа вертикальных сечений*.

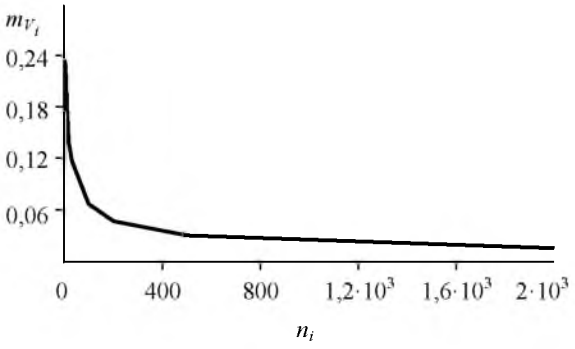


Рис.4. Зависимость относительной ошибки определения объема объекта изометрической формы m_{V_i} от числа вертикальных сечений n_i при длине объекта порядка десятков метров

* *Нестеренко Е.А.* Оптимизация съемки лазерными сканирующими системами за счет выбора режима сканирования // Состояние и перспективы развития маркшейдерского дела: Мат. Международ. научно-практической конференции / Уральский гос. горный ун-т. Екатеринбург, 2011. С.47-51.

Nesterenko E.A. Optimization of laser scanner mine surveying at the expense of scanning rate // Materials of international conference / Ural State Mining University. Ekaterinburg, 2011. P.47-51.

№ п/п	Форма снимаемого объекта	Размер снимаемого объекта, м	Число сечений n	Число точек лазерных отражений, 10^6	Приблизительный размер погрешности определения объема m_V
1	Вытянутая	До 100	800-900	10,8-12,15	0,38-0,9
2		100-1000	1000-1200	13,5-16,2	0,01-0,05
3		Более 1000	1500	20,25	0,002
4	Изометрическая	До 100	500-700	6,75-9,45	0,03-0,05
5		100-1000	700-800	9,45- 10,8	0,0013-0,005
6		Более 1000	900	12,15	0,0005
7	Полусферическая	До 100	1000	13,5	0,018
8		100-1000	2000	27,0	0,0001
9		Более 1000	5000	67,5	0,00001
10	Клиновидная	До 100	5000-6000	67,5-81,0	0,8-2,5
11		100-1000	7000-8000	94,5-108,0	0,1-0,3
12		Более 1000	8000	108,0	0,04

Исходя из формул для вычисления объема склада и формулы средней квадратической ошибки функции, были произведены расчеты ошибки определения объема M_V, а также относительной ошибки m_V и изучено влияние на эти величины числа вертикальных сечений, при сканировании представляющих собой движение лазерного луча в вертикальной плоскости. Информация о числе сечений, при котором изучаемые ошибки будут минимальны, позволит производить съемку объекта (в данном случае отвалов, насыпей и складов) в оптимальном режиме по точности последующего определения объема.

Расчеты проводились для нескольких форм отвалов: вытянутая призма, изометрическая призма, полусфера и клиновидная призма. Это формы элементарных объемов, вписываемых в пространство, ограниченное поверхностью объекта. В ходе исследований была выведена также зависимость между габаритными размерами объектов и характером влияния числа вертикальных сечений на ошибку определения объема. Все результаты расчетов были отражены на построенных трехмерных графиках зависимости между абсолютной и относительной погрешностями определения объема от количества и площади вертикальных сечений $M_V = f(n, S)$, $m_V = f(n, S)$, а также на двухмерных графиках зависимости указанных погрешностей от количества вертикальных сечений $M_V = f(n)$ и $m_V = f(n)$ (рис.4).

Результатом исследований является разработка методических указаний по производству наземной лазерно-сканирующей съемки, в которых отражена информация о зависимости погрешности определения объема объекта (склада, отвала, насыпи) от его параметров и числа вертикальных сечений, позволяющая минимизировать влияние этой величины на результат съемки и оптимизировать плотность съемки лазерным сканером (см. таблицу).

Представленная методика выполнения лазерно-сканирующей съемки позволяет оптимизировать съемочный процесс за счет определения числа станций сканирования и, соответственно, осуществления прогноза временны́х затрат на этапе планирования съемки. Кроме того, она дает возможность сделать вывод о выборе режима плотности сканирования на основании данных о размерах, форме объекта и необходимой точности результатов.