

Точность измерений рельефа при лазерном сканировании

В. А. СОЛОМАТИН

Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия, e-mail: vsolomatin@mail.ru

Приведён анализ влияния параметров лазерного сканера на точность модели рельефа, созданной по результатам сканирования поверхности объекта.

Ключевые слова: лазерное сканирование, пространственно-частотная характеристика, выборка, свёртка.

The analysis of influence of the laser scanner parameters on the accuracy of a relief the model created by results of scanning is provided.

Key words: laser scanning, the spatial-frequency characteristic, sampling, convolution.

Для получения геопространственной информации (3D-моделей объектов, разрезов, планов, рельефов поверхности) широко используют технологию лазерного сканирования (наземного, мобильного, воздушного, космического), основанную на высокоточных угловых и линейных измерениях [1, 2]. При лазерном сканировании поверхности образуется так называемое облако точек, каждая из которых представляет пространственные координаты отражающей площадки объекта сканирования: угловые координаты по двум осям и расстояние до площадки (дальность) в определённой системе координат. Точность вычислений пространственных координат каждой точки в облаке зависит от погрешностей сканера, параметров объекта и среды распространения излучения. При воздушном сканировании поверхности Земли на точность измерений влияют размер лазерного пятна на поверхности отражения, шаг сканирования (интервал выборки) и пространственно-частотная характеристика сканируемой поверхности; фактор рельефа поверхности обычно не учитывается. Размеры лазерного пятна на поверхности объекта не дают корректного представления о возможности построения модели сложного рельефа по результатам сканирования. В статье приведён анализ влияния параметров сканирования

(плотности точек, шага, частоты) и размеров лазерного пятна на поверхности объекта на точность построения пространственной модели рельефа поверхности.

Для анализа пространственного разрешения сканирующих систем используют теорию линейной фильтрации и соответствующий математический аппарат фурье-анализа [2, 3]. В теории линейной фильтрации разложение изображения описывает свёртка функции распределения потока излуче-

ния в изображении с функцией распределения чувствительности к потоку в пределах элемента разложения. По пространственной координате (оси сканирования) свёртываются энергетические (световые, яркостные) процессы, моделирующие двумерную пространственную структуру объекта. В процессе построения пространственной модели рельефа (3D модели) необходимо учитывать ещё и дальность. Сканирование в этом случае будет иным.

Допустим, лазерный пучок сканирует по оси x рельеф, заданный функцией $S(x)$ в выбранной системе координат (рис. 1). Функция $S(x)$ является сечением двумерной функции $S(x, y)$ при фиксированном значении y :

$$S(x) = \int_{-b/2}^{b/2} S(x, y) dy,$$

где b — ширина строки.

На рис. 1 показаны лазерные пучки, расходящиеся из двух точек положения сканера x_1, x_2 . На плоском участке поверхности лазерное пятно имеет ширину a по оси x , для симметричного лазерного пучка $a = b$. Дальность находим по интервалу времени между передаваемым и отражённым от поверхности импульсами (эхо-сигнал). Эхо-сигнал от плоской отражающей поверхности подобен передаваемому сигналу, а от сложного по рельефу участка отличается в общем случае как по форме, так и по длительности. Однозначно связать форму эхо-сигнала с функцией $S(x)$ невозможно в силу многообразия факторов, влияющих на форму отражённого сигнала, однако его длительность можно использовать для определения наклона отражающей поверхности. В воздушных лазерных сканерах эхо-сигнал может содержать несколько импульсов, так как объекты на поверхности земли (ветви деревьев, линии электропередачи) частично отражают импульсный сигнал. По принятым импульсам вычисляют однозначное значение дальности l — функцию $S(x)$ в заданном направлении (l_1, l_2). При этом дальности l_2 соответствует некоторое усредненное значение высоты рельефа.

Дальность измеряют в дискретных точках траектории сканирования по оси x , реализуя выборку функции $S(x)$ с пространственным периодом T_x . Воспользуемся сокращённой системой обозначений функций и свойствами преобразования Фурье (теоремами о спектрах). Запишем через $F[]$

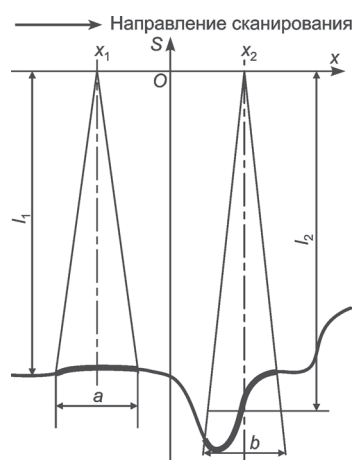


Рис. 1. Сканирование лазерным пучком

операцию нахождения фурье-образа от аргумента в скобках. Импульс прямоугольной формы единичной амплитуды и шириной a имеет вид

$$P(x) = \text{rect}(x/a),$$

его фурье-образ:

$$F[P(x)] = F[\text{rect}(x/2)] = a \text{sinc}(af_x),$$

где $\text{sinc}(af_x) = \sin(\pi af_x)/(\pi af_x)$, f_x — пространственная частота.

Периодическая последовательность δ -функций с периодом T_x — гребенчатая функция $N(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nT_x) =$

$$= T_x^{-1} \text{comb}(xT_x^{-1}), \text{ а её фурье-образ, гребенчатая функция}$$

$$N(f_x) = F[N(x)] = F[T_x^{-1} \text{comb}(xT_x^{-1})] = \text{comb}(T_x f_x) =$$

$$= T_x^{-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f_x - nT_x^{-1}).$$

Идеальную выборку (лазерный пучок можно считать бесконечно узким), опишем произведением функции $S(x)$ на гребенчатую функцию $N(x)$ с периодом T_x по оси x , соответствующему шагу сканирования:

$$S(x)N(x) = S(x) \left(T_x^{-1} \text{comb}(xT_x^{-1}) \right).$$

В пределах лазерного пятна шириной a по оси x оценка дальности — величина постоянная, поэтому с учётом ширины пятна усредняющая выборка является свёрткой идеальной выборки $S(x)N(x)$ с прямоугольным импульсом $P(x)$. На основании фильтрующего свойства δ -функций выборка $S(x)$ содержит последовательность прямоугольных импульсов с амплитудами, равными отсчётам дальности в соответствующих точках по оси сканирования и шириной, равной ширине пятна на поверхности объекта. Если $S(f_x) = F[S(x)]$, а $N(f_x) = F[N(x)]$, то спектр идеальной выборки (ИБ) находится свёрткой $S_{\text{ИБ}}(f_x) = S(f_x) * N(f_x)$ и представляет серию полос, чередующихся с интервалом T_x^{-1} . Каждая из них отображает спектр $S(f_x)$:

$$S_{\text{ИБ}}(f_x) = T_x^{-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(f_x - nT_x^{-1}).$$

Если критерий Найквиста не выполняется, т. е. $T_x^{-1} < 2f_{\text{max}}$, где f_{max} — максимальная пространственная частота в спектре $S(f_x)$, то соседние боковые полосы перекрываются, и функцию $S(x)$ невозможно восстановить без искажений даже при идеальной выборке. Дополнительные искажения в спектр вносит обстоятельство, что лазерное пятно имеет конечные размеры. Выборка конечным пятном будет усредняющей по области существования пятна. Спектр усредняющей выборки [2] находим произведением спектра идеальной выборки $S(f_x) * N(f_x)$ на функцию отсчётов $P(f_x) = a \text{sinc}(af_x)$:

$$S_{\text{Б}}(f_x) = a T_x^{-1} \text{sinc}(af_x) \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(f_x - nT_x^{-1}).$$

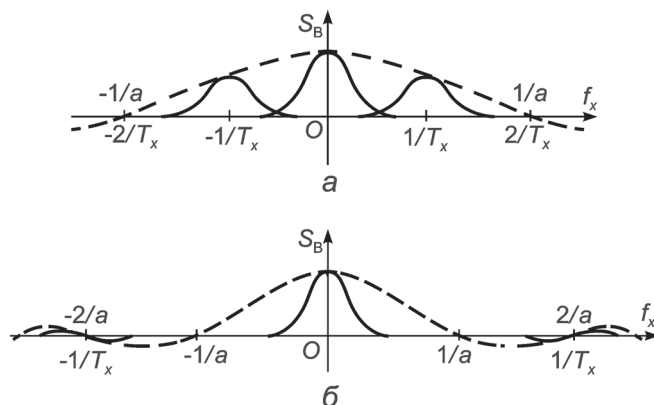


Рис. 2. Спектры усредняющей выборки при $T_x = 2a$ (а) и $T_x = a/2$ (б), соответственно

На рис. 2, а представлен спектр усредняющей выборки, когда пространственный период выборки T_x вдвое больше ширины пятна a . Отметим, что при круглом лазерном пятне функция $P(f_x)$ представляется bessinc -функцией, но с достаточной степенью приближения она может быть аппроксимирована sinc -функцией, и эта замена не влияет на дальнейшие рассуждения и выводы.

Искажения в модель рельефа вносят как ширина пятна, так и недостаточная частота выборки. При увеличении частоты выборки боковые полосы в спектре раздвигаются, а частотную характеристику $P(f_x)$ можно использовать как пространственно-частотный фильтр для подавления боковой полосы на частоте T_x^{-1} . При $T_x = a$ первый нуль sinc -функции $P(f_x)$ на частоте $f_x = a^{-1}$ совпадает с центром первой боковой полосы, и она подавляется (происходит снижение влияния этой полосы на основную центральную полосу, отображающую спектр $S(f_x)$ (редукции пространственных частот)). Если лазерное пятно круглое и $T_x = a$, при сканировании возникают «слепые» зоны между окружностями, ограничивающими соседние пятна.

Если сканирование осуществляют с шагом $T_x = a/2$, то угловой шаг сканирования равен половине угла расходимости лазерного пучка и соседние отсчёты при выборке функции $S(x)$ будут совмещаться наполовину. В этом случае второй нуль sinc -функции $P(f_x)$ приходится на частоту $f_x = 2/a$, соответствующую области наложения соседних боковых полос. Эта область окажется подавленной, и влияние редукции пространственных частот на функцию $S(x)$ будет меньше. Кроме того, боковые полосы будут раздвинуты на больший частотный интервал, что также уменьшает редукцию (рис. 2, б). Уменьшение шага выборки T_x означает увеличение временной частоты передаваемых импульсов, а значит, — повышение отношения сигнал—шум вследствие накопления сигнала. В то же время определённые ограничения накладывает неоднозначность отсчёта времени прихода импульсов. В простейшем случае это принцип «одного импульса в воздухе», при котором следующий импульс излучается после приёма эхо-сигнала от предыдущего импульса. Такое ограничение существенно для воздушных сканеров, в которых допустимая частота импульсов уменьшается с увеличением высоты полёта, и частота выборки составляет десятки «отсчётов на пятно», т. е. T_x на порядок больше ширины пятна. В этом случае редукцией пространственных частот пренебрегают,

процедура сканирования представляет свёртку $S(x) * P(x)$, а максимальную пространственную частоту, воспроизводимую при построении модели рельефа, определяют по частотной характеристике $P(f_x)$. В результате свёртки функция $S(x)$ утрачивает высокие пространственные частоты, и модель рельефа сглаживается. Функция $P(f_x) = a \operatorname{sinc}(af_x)$ убывает до уровня 0,6 при пространственной частоте $f_x = 1/(2a)$, которую можно считать максимальной $f_{\max}$ при моделировании рельефа. Тогда по теореме Котельникова $T_x = 1/(2f_m) = 2a$, значит шаг выборки должен быть не более половины ширины пятна (два отсчёта на пятно).

Заключение. Точность построения модели рельефа отражающей поверхности (по результатам лазерного сканирования) характеризует максимальная воспроизводимая пространственная частота. Её можно определить (с учётом только пространственно-частотных характеристик сканера) по размеру лазерного пятна $f_{\max} = 1/(2a)$ при достаточной плотности точек выборки (более двух точек на сечение пятна в одном направлении). Если плотность точек выборки недостаточна, $f_{\max} = 1/(2T_x)$ будет определена пространственным периодом выборки T_x при условии, что $T_x > a$. Так, для типового угла расходимости лазерного излучения сканеров 0,25 мрад размер пятна на расстоянии 100 м составляет 25 мм, чему соответствует $f_{\max} = 0,02 \text{ мм}^{-1}$. Увеличение плотности точек не приводит к возрастанию $f_{\max}$.

Параметры точности сканера обычно включают погрешности измерений координат и дальности (высоты для воз-

душных сканеров). Эти параметры относят к некоторой элементарной площадке (точке), расстояние до которой принимают постоянным в пределах лазерного пятна. Прямого отношения к точности моделирования рельефа поверхности это не имеет.

Целесообразно ввести в систему параметров и характеристик лазерных сканеров пространственно-частотную (рельефно-частотную) характеристику и эффективную полосу передачи пространственных частот рельефа. Так как известные способы и методики измерений пространственно-частотных параметров и характеристик оптических и оптико-электронных звеньев и приборов в целом основаны на использовании плоских тест-объектов, а не рельефа, требуется разработка новых технических решений и методик измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН, 2007.
2. Соломатин В. А. Оптические и оптико-электронные приборы в геодезии, строительстве и архитектуре. М.: Машиностроение, 2013.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.

Дата принятия: 01.07.2015 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

536.42:535.66+666.32

Метод колориметрической градации в RGB-пространстве как способ регистрации структурных изменений в керамическом материале

А. Г. ЧЕТВЕРИКОВА, О. Н. КАНЬГИНА

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия, e-mail: KR-727@mail.ru

Описано применение метода колориметрической градации для определения структурных отличий в объёме традиционного керамического образца по R, G, B составляющим и их распределениям. Определена основная рабочая цветовая компонента R (красная), контролирующая состояние железа и степень завершенности фазовых превращений в материале во время технологических процессов.

Ключевые слова: колориметрия, цвет, RGB-пространство, структурные превращения, керамика.

Application of the method of colour gradation to determine the structural differences in the volume of traditional ceramic sample by coordinates R, G and B and their distributions is described. The method is based on statistical processing of values of R, G, B — coordinates of the individual cells — and a reasonable selection of taxa with representative cells with specific characteristics. It is shown that in this case the main color component is red (R), which controls the state of iron and the degree of completeness of phase transformations in the material during technological processes.

Key words: colorimetry, color, RGB-space, structural transformations, ceramics.

Для алюмосиликатной керамики не существует надёжных и простых методов интегральной оценки структуры материала, зависящих от фазовых составов, соотношений

кристаллических и аморфных фаз, включений и пор и характера их распределения по объёму изделия. Химический и рентгенофазовый анализы твёрдого каркаса, оценка харак-