

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РЕЛЬЕФНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАТОРОВ ПРИ СКАНИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА

В.А.Соломатин, д.т.н., vsolomatin@mail.ru,
Д.А.Балабанова, аспирант, Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

Приводится описание установки, предназначенной для определения рельефно-частотных характеристик, методика и результаты измерений. Вводится понятие "рельефно-частотная характеристика", представляющее лазерный сканер как фильтр пространственных частот при зондировании рельефа поверхности. Предложен способ измерения рельефно-частотных характеристик лазерных локаторов с использованием тест-объектов в виде ступенчатого изменения дальности (пространственный аналог измерения переходной характеристики).

ВВЕДЕНИЕ

В рамках теории линейной фильтрации используются такие обобщенные характеристики оптических и оптико-электронных систем, как импульсная характеристика (функция рассеяния точки, функция рассеяния линии), пространственно-частотная характеристика, контрастно-частотная характеристика (функция передачи модуляции), переходная характеристика (краевая функция) [1,2]. Эти характеристики, как известно, взаимосвязаны и представляют систему в целом или отдельные ее звенья как фильтр пространственных частот, передающий спектральное (по пространственной частоте) распределение энергетических составляющих сигнала (потока излучения, яркости, облученности), и позволяют оценить качество оптической или оптико-электронной системы, создающей изображение объекта. Так, при сканировании разложение поля обзора описывается сверткой функции распределения потока излучения в поле обзора с импульсной характеристикой сканирующей системы. По пространственной координате (по оси сканирования) свертываются энергетические (световые, яркостные) процессы, позволяющие моделировать двумерную (плоскую) пространственную структуру.

MEASURING METHOD OF RELIEF-FREQUENCY RESPONSE OF LASER LOCATORS IN THE RELIEF SCANNING

V.A. Solomatin, Doctor of Engineering Sciences.
vsolomatin@mail.ru, D.A. Balabanova, graduate student, Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

The concept of "relief-frequency response" has been introduced, representing a laser scanner as a filter of spatial frequencies when probing the surface relief. A method for measuring the laser locator relief-frequency response has been proposed using test objects in the form of a step change in range (a spatial analogue of measuring the transient response). The article describes the installation designed to determine the relief-frequency response, the method and the results of measurements.

INTRODUCTION

In the framework of the theory of linear filtration, the following generalized characteristics of optical and optoelectronic systems are used, such as pulse response (point scattering function, line scattering function), spatial frequency characteristic, contrast-frequency response (modulation transfer function), transition response (edge function) [1, 2]. These characteristics are known to be interrelated, representing the system as a whole or its individual links as a spatial frequency filter that transmits the spectral (by spatial frequency) distribution of the energy components of the signal (radiation flux, brightness, irradiance) and allowing us to estimate the quality of the optical or optoelectronic system, which creates an image of the object. Thus, the scanning of the field of view is described by the convolution of the distribution function of the radiation flux in the field of view with the pulse response of the scanning system. By the spatial coordinate (along the scanning axis), the energy (light, brightness) processes are convolved, allowing to model a two-dimensional (flat) spatial structure.

With laser scanning for the purpose of constructing a spatial model of the relief (laser location), an informative parameter is the range as a function of the spatial coordinates determining the direction

При лазерном сканировании с целью построения пространственной модели рельефа (лазерной локации) информативным параметром является дальность как функция пространственных координат, определяющих направление в поле обзора, то есть рельеф сканируемой поверхности, а не какой-либо энергетический параметр сигнала. Импульсная характеристика системы и процедура свертки приобретают в этом случае иной смысл. Импульсная характеристика трактуется как функция, описывающая выходной сигнал при входном воздействии, представляемом δ -функцией. Моделью δ -функции при энергетическом описании сигнала может быть точечный источник излучения или при одномерном представлении сигнала светящаяся линия. При описании сигнала функцией распределения дальности по пространственным координатам, то есть при описании рельефа поверхности, моделью δ -функции может служить, например, узкий выступ на плоской поверхности, представляющий импульсное изменение структуры рельефа (дальности). При сканировании такого объекта системой лазерной локации возникает сигнал, представляющий импульсную характеристику сканирующей системы.

СКАНИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА

Допустим, сканирование лазерным пучком осуществляется по оси x , сканируемый рельеф задан функцией $S(x)$ в заданной системе координат (рис.1). Функция $S(x)$ является сечением двумерной функции $S(x, y)$, описывающей рельеф при фиксированном значении y , и определяется как

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

где b - ширина строки. На рис.1а показаны расходящиеся лазерные пучки из двух точек положения сканера x_1 и x_2 . На плоском участке поверхности лазерное пятно имеет размер a по оси x , причем для симметричного лазерного пучка $a = b$. При использовании импульсных дальномеров дальность определяется по интервалу времени между передаваемым импульсом и отраженным от поверхности импульсом (эхосигналом), показанным на рис.1б и 1с. В общем случае при дискретном измерении дальности с определенной временной частотой осуществляется пространственная выборка функции $S(x)$ с ее усреднением внутри размера лазер-

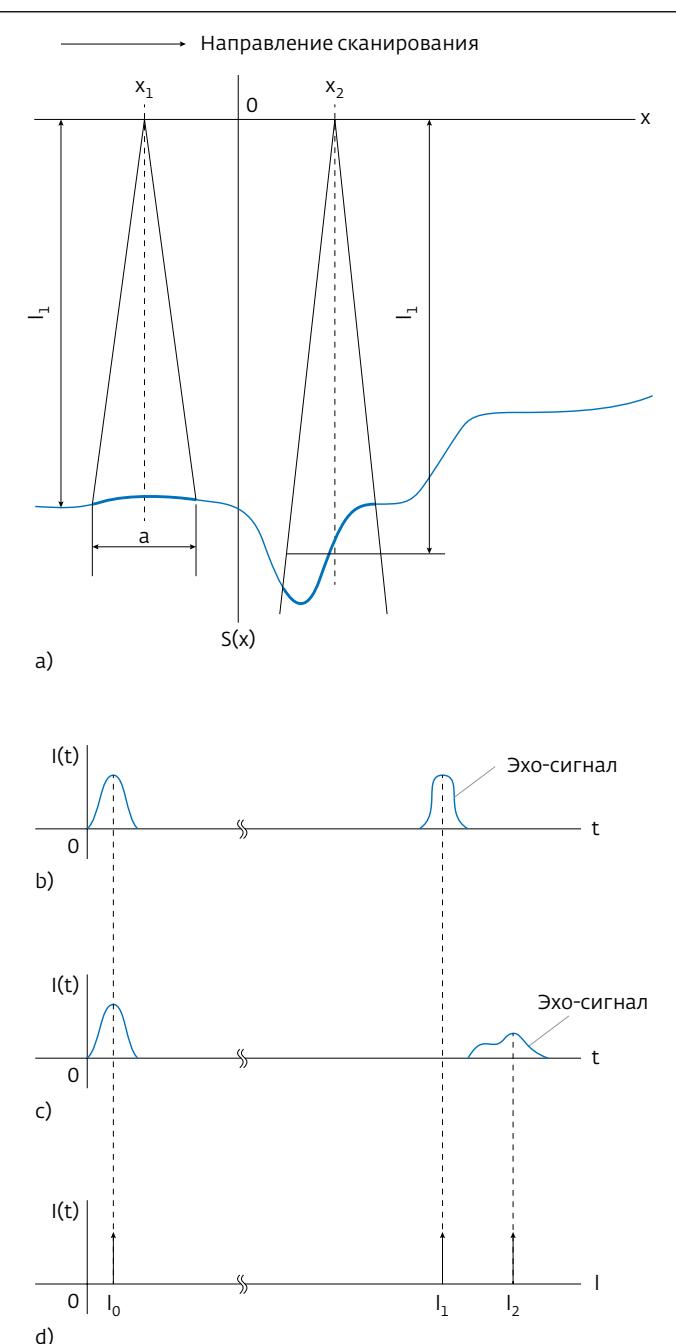


Рис. 1. Сканирование лазерным пучком: a) лазерные пучки; b) эхосигнал при локации из точки x_1 ; c) эхосигнал при локации из точки x_2 ; d) отсчеты дальности l_1 и l_2

Fig. 1. Laser beam scanning: a) laser beams, b) echo signal when locating from x_1 point, c) echo signal when locating from x_2 point, d) range counts l_1 and l_2

in the field of view, i.e., the relief of the surface being scanned, and not any energy parameter of the signal. The pulse response of the system and the convolution procedure acquire a different meaning in this case. The pulse response is treated as a function

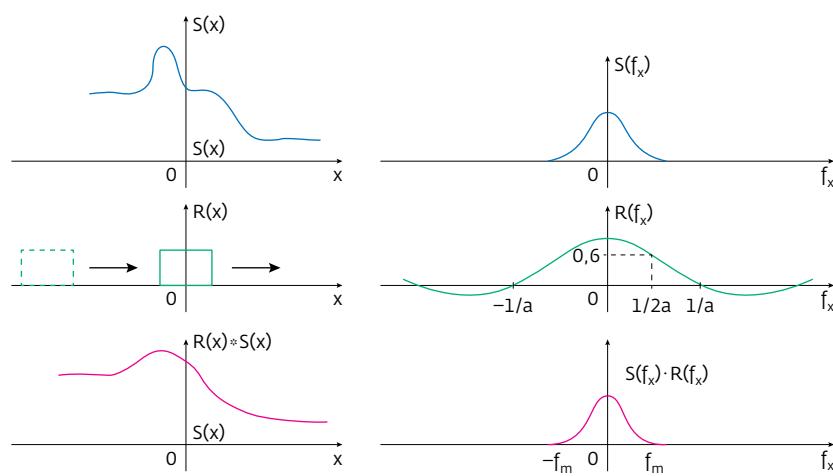


Рис.2. К расчету импульсной характеристики сканера
Fig. 2. Calculation the scanner pulse response

ного пятна [2,3]. Однако при достаточно высокой частоте выборки (десятки отсчетов в пределах лазерного пятна) процедура сканирования сводится к свертке функции $S(x)$ с импульсной характеристикой системы $R(x)$:

$$S(x)*R(x) = \int_0^x S(x)R(\Delta x - x)dx,$$

а спектр свертки находится произведением соответствующих спектров $S(f_x)R(f_x)$, где f_x – пространственная частота, $*$ – знак свертки, Δx – сдвиг по оси x (рис.2).

На рис.2 видно, что в результате свертки спектр функции $S(x)$ утрачивает высокие пространственные частоты и модель рельефа оказывается сглаженной. В идеальном случае импульсная характеристика системы описывается прямоугольной функцией, шириной, равной размеру a лазерного пятна по оси x . Спектром прямоугольной функции $R(x)$ является функция отсчетов

$$R(f_x) = a \operatorname{sinc}(af_x),$$

где

$$\operatorname{sinc}(af_x) = \frac{\sin(\pi af_x)}{\pi af_x}.$$

Функция $R(f_x)$ убывает до уровня 0,6 при $f_x = 1/2a$, т.е. на частоте, вдвое меньшей частоты первого нуля функции отсчетов, поэтому при моделировании рельефа пространственную частоту ($f_x = f_m = 1/2a$) удобно считать максимальной по уровню 0,6 частотной характеристики.

describing the output signal at the input action represented by the δ -function. The model of the δ -function in the energy description of the signal can be a point source of radiation or, for a one-dimensional representation of the signal, a luminous line. When describing a signal by the range distribution function with respect to spatial coordinates, i.e., when describing the surface relief, a model of the δ -function can be, e.g., a narrow protrusion on a flat surface representing a pulse change in the relief (range) structure. When such an object is scanned with a laser locating system, a signal appears that represents the pulse response of

the scanning system.

RELIEF SCANNING

Let us assume that the scanning with a laser beam is performed along the x axis, the scanned relief is given by the $S(x)$ function in the given coordinate system (Fig. 1). The $S(x)$ function is a section of the two-dimensional $S(x, y)$ function describing the relief for a fixed value of y and is defined as

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

where b is the width of the line. Fig. 1a shows the divergent laser beams from two points of the scanner position, x_1 and x_2 . On a flat part of the surface, the laser spot has a dimension a along the x axis,

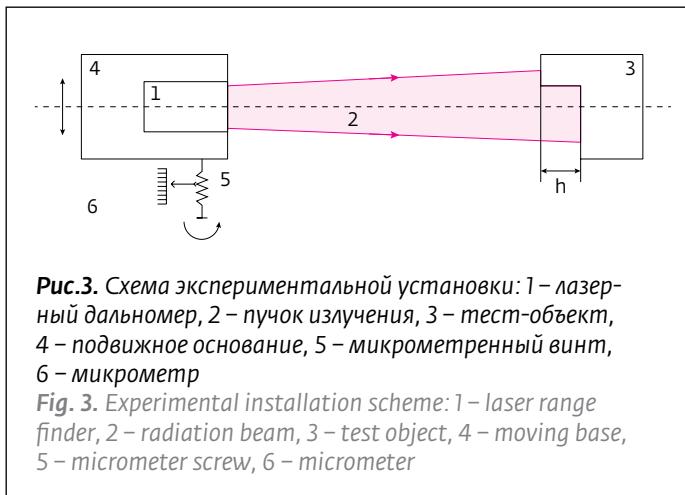


Рис.3. Схема экспериментальной установки: 1 – лазерный дальномер, 2 – пучок излучения, 3 – тест-объект, 4 – подвижное основание, 5 – микрометренный винт, 6 – микрометр

Fig. 3. Experimental installation scheme: 1 – laser range finder, 2 – radiation beam, 3 – test object, 4 – moving base, 5 – micrometer screw, 6 – micrometer

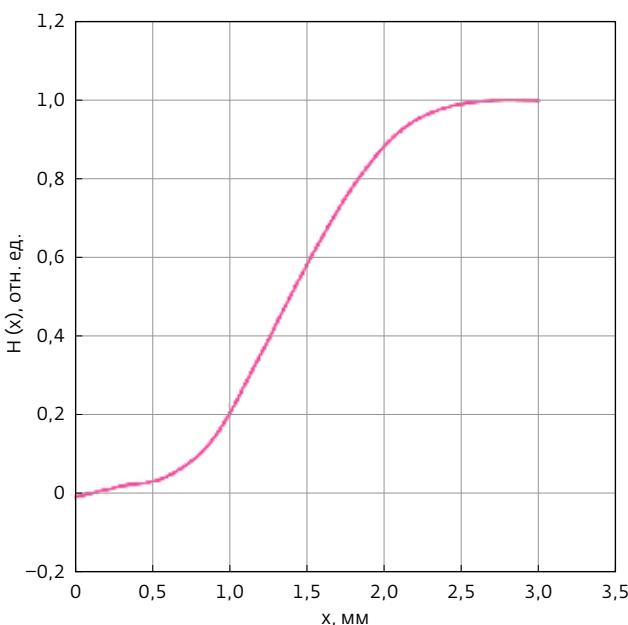


Рис.4. Нормированная переходная характеристика
Fig. 4. Normalized transient response

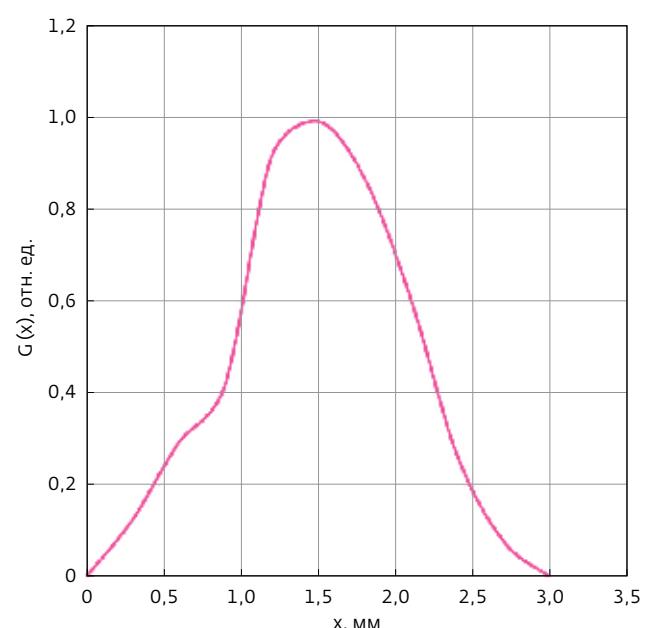


Рис.5. Нормированная импульсная характеристика
Fig. 5. Normalized pulse response

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На практике импульсная характеристика сканера может отличаться от идеальной прямоугольной формы. Теоретически рассчитать ее форму не представляется возможным, поэтому для описания сканера как фильтра пространственных частот целесообразно экспериментальное определение импульсной характеристики по определенным тест-объектам. Наиболее удобной в практическом отношении представляется модель ступенчатого сигнала, используемого при определении переходной характеристики системы (краевой функции). Такая модель сравнительно просто реализуется в виде прямоугольного уступа, создающего ступенчатый перепад дальности при расположении плоских поверхностей модели перпендикулярно оси лазерного пучка. Упомянутая выше модель δ -функции в виде узкого выступа на плоской поверхности на практике оказалась менее удобной. Импульсную характеристику можно получить, дифференцируя переходную характеристику, полученную по ступенчатой модели поверхности.

СХЕМА УСТАНОВКИ

Для проведения эксперимента по измерению переходной характеристики лазерного даль-

where $a = b$ for a symmetric laser beam. When using pulse range finders, the range is determined by the time interval between the transmitted pulse and the reflected pulse from the surface (echo signal) shown in Fig. 1b and 1c. In the general case, for a discrete range measurement with a certain time frequency, a spatial sample of the $S(x)$ function is performed with its averaging inside the size of the laser spot [2, 3]. However, at sufficiently high sampling frequency (dozens of counts within the laser spot), the scanning procedure is reduced to the convolution of the $S(x)$ function with the pulse response of the $R(x)$ system:

$$S(x) * R(x) = \int_0^{\infty} S(x)R(\Delta x - x)dx,$$

And the convolution spectrum is the product of the corresponding spectra $S(f_x)R(f_x)$, where f_x is the spatial frequency, $*$ is the convolution sign, and Δx is the x axis shift.

Fig. 2 shows that, as a result of convolution, the spectrum of the $S(x)$ function loses its high spatial frequencies, and the relief model is smoothed out. Ideally, the pulse response of the system is described by a rectangular function, a width equal to the size a of the laser spot along the x axis. The spectrum of the rectangular $R(x)$ function is the function of counts



Результаты измерений переходной характеристики и оценка их точности

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	I_{cp}	σ	M
$x, \text{мм}$	$I_i, \text{м}$												
0,0	8,522	8,522	8,521	8,522	8,521	8,522	8,522	8,522	8,522	8,522	8,522	$4,44 \cdot 10^{-7}$	$1,40546 \cdot 10^{-7}$
0,3	8,523	8,523	8,522	8,522	8,522	8,522	8,523	8,523	8,523	8,523	8,523	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$5,62183 \cdot 10^{-7}$
0,6	8,524	8,524	8,523	8,523	8,522	8,523	8,524	8,523	8,523	8,524	8,523	$4,44 \cdot 10^{-7}$	$1,40546 \cdot 10^{-7}$
0,9	8,526	8,527	8,526	8,525	8,526	8,524	8,527	8,526	8,526	8,527	8,526	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$3,51364 \cdot 10^{-8}$
1,2	8,530	8,531	8,534	8,531	8,532	8,526	8,535	8,535	8,532	8,533	8,532	$4,44 \cdot 10^{-7}$	$1,40546 \cdot 10^{-7}$
1,5	8,536	8,538	8,54	8,538	8,539	8,534	8,54	8,541	8,539	8,538	8,538	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$3,16228 \cdot 10^{-7}$
1,8	8,541	8,544	8,544	8,545	8,545	8,544	8,544	8,545	8,543	8,544	8,544	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$3,51364 \cdot 10^{-8}$
2,1	8,546	8,548	8,548	8,548	8,548	8,548	8,548	8,548	8,548	8,548	8,548	$4,44 \cdot 10^{-7}$	$1,40546 \cdot 10^{-7}$
2,4	8,549	8,550	8,549	8,550	8,55	8,549	8,550	8,550	8,549	8,549	8,550	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$5,62183 \cdot 10^{-7}$
2,7	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	0	0
3,0	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	8,550	0	0

мера была собрана установка, схема которой показана на рис.3. Лазерный дальномер (использовалась лазерная рулетка BOSCH CLM 40 Professional) устанавливался на подвижном основании, перемещающимся перпендикулярно направлению излучения с помощью винта с отсчетным устройством (использовался столик с микрометром из комплекта оптической скамьи ОСК-2). Измерения проводились на расстоянии (дистанции I_i) около 8,5 м с шагом смещения каретки $\Delta=0,3$ мм при использовании тест-объекта в виде уступа с перепадом дальности $h=30$ мм.

Технические данные лазерного дальномера:

- диапазон измерений – 0,15–40 м;
- точность измерения (предельное значение погрешности) $\pm 1,5$ мм;
- наименьшее отображаемое значение – 1 мм;
- класс лазера – 2;
- рабочая длина волны – 635 нм;
- вес – 0,1 кг;
- габариты 105×41×24 мм.

$$R(f_x) = a \operatorname{sinc}(af_x),$$

where

$$\operatorname{sinc}(af_x) = \frac{\sin(\pi af_x)}{\pi af_x}.$$

The $R(f_x)$ function decreases to a level of 0.6 when $f_x = 1/2a$, i.e. at a frequency half the frequency of the first zero of the count function, therefore, for the relief modelling, it is convenient to consider the spatial frequency ($f_x = f_m = 1/2a$) as the maximum frequency characteristic by a level of 0.6.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PULSE RESPONSE

In practice, the pulse response of the scanner may differ from the ideal rectangular shape. Theoretically, it is not possible to calculate its shape, therefore, to describe the scanner as a filter of spatial frequencies, it is expedient to

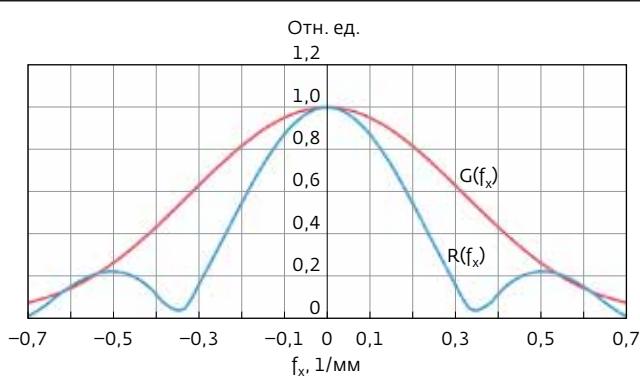


Рис.6. Рельефно-частотные характеристики дальномера: $R(f_x)$ – идеальная; $G(f_x)$ – полученная экспериментально

Fig. 6. Relief-frequency response of the range finder: $R(f_x)$ is ideal response; $G(f_x)$ is a response obtained experimentally

Для получения надежных значений отсчетов переходной характеристики было произведено 10 серий измерений (реализаций переходной характеристики). Шаг смещения каретки $\Delta=0,3$ мм обеспечивал 11 отсчетов дальности l_i в пределах сечения лазерного пучка. Результаты измерений и оценка их точности показаны в таблице, где среднее квадратическое отклонение одного измерения

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (l_i - l_{cp})^2}{n-1}},$$

а среднее квадратическое отклонение арифметической средины

$$M = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где l_{cp} – среднее значение дальности в серии из $n=10$ измерений.

experimentally determine the pulse response for certain test objects. The most convenient practically is a stepped signal model used in determining the transient response of the system (edge function). It is relatively easy to implement such model in the form of a rectangular ledge creating a stepwise range difference when the model plane surfaces are located perpendicular to the axis of the laser beam. The above-mentioned model of the δ -function in the form of a narrow projection on a flat surface proved to be less convenient in practice. The pulse response can be obtained by differentiating the transient response obtained from the stepped surface model.

INSTALLATION SCHEME

To carry out the experiment to measure the transient response of the laser rangefinder, an installation was assembled according to the scheme shown in Fig. 3. The laser rangefinder (using the laser measuring tape BOSCH GLM 40 Professional) was mounted on a movable base moving perpendicular to the direction of radiation with a screw with a counting mechanism (a table with micrometer from the set of optical bench OSK-2 was used). The measurements were carried out at a distance (range l_i) of about 8.5 m with a carriage increment $\Delta=0.3$ mm using a test object in the form of a ledge with a range difference of $h=30$ mm.

Specifications of laser range finder:

- Measuring range is 0.15–40 m;
- Measurement accuracy (limit value of error) is ± 1.5 mm;
- The smallest displayed value is 1 mm;
- Laser class is 2;
- Working wavelength is 635 nm;
- Weight is 0.1 kg;
- Dimensions are 105x41x24 mm.



Очевидно, значения σ и M составляют пренебрежимо малые величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

По результатам измерений определялась переходная характеристика (краевая функция) $H(x)$, путем дифференцирования $H(x)$ вычислялась импульсная характеристика $G(x)$, а по ней и пространственно-частотная (рельефно-частотная) характеристика $G(f_x)$ как преобразование Фурье функции $G(x)$. Нормированные функции $H(x)$, $G(x)$, $G(f_x)$ показаны на рис.4-6. Сопоставление полученной рельефно-частотной характеристики $G(f_x)$ со спектром $R(f_x)$ импульса прямоугольной формы той же ширины a (a - ширина пятна в рассматриваемом случае $a=3$ мм) (рис.6) позволяет определить масштаб пространственных частот при выполнении преобразования Фурье, поскольку первый нуль в спектре прямоугольной функции приходится на вполне определенную частоту $f_x=1/a$. Видно, что реальная характеристика $G(f_x)$ охватывает значительно больший диапазон пространственных частот, то есть аппроксимация импульсной характеристики прямоугольной функцией шириной a (размер пятна) дает заниженные результаты в отношении точности воспроизведения рельефа при сканировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рельефно-частотная характеристика, представляя лазерную сканирующую локационную систему как фильтр пространственных частот, позволяет рассматривать эту систему как линейное звено в общей схеме преобразования сигналов при сканировании рельефа поверхности. Рельефно-частотная характеристика лазерной локационной системы определяет точность воспроизведения рельефа, характеризуемую диапазоном передаваемых частот. При экспериментальном определении рельефно-частотной характеристики в качестве тест-объекта целесообразно использовать модель со ступенчатым изменением дальности ("ступен"), по которому непосредственно определяется переходная характеристика (краевая функция), позволяющая вычислить рельефно-частотную характеристику. Разработанная установка и методика измерений подтверждают возможность экспериментального определения переходной характеристики и расчет по ней рельефно-частотной характеристики. Целесообразно в перечне

To obtain reliable values of the counts of the transition response, 10 series of measurements (realizations of the transient response) were made. The carriage increment of $\Delta=0.3$ mm provided 11 counts of the range l_i within the cross section of the laser beam. The results of measurements and an estimation of their accuracy are shown in the table, where the standard deviation of one measurement is

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(l_i - l_{cp})^2}{n-1}},$$

and the standard deviation of the arithmetic mean is

$$M = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

where l_{cp} is the average distance in a series of $n=10$ measurements.

Obviously, the values of σ and M are negligibly small.

EXPERIMENT RESULTS

The $H(x)$ transient response (edge function) was determined from the measurement results, the $G(x)$ pulse response was calculated by differentiating $H(x)$ followed by determination of the $G(f_x)$ spatial frequency (relief-frequency) response as the Fourier transform of the $G(x)$ function. The $H(x)$, $G(x)$, $G(f_x)$ normalized functions are shown in Fig. 4.5.6. A comparison of the obtained $G(f_x)$ relief-frequency response with the $R(f_x)$ spectrum of a rectangular pulse of the same width of a (a is the spot width, in the case under consideration $a=3$ mm) (Fig. 6) allows us to determine the scale of the spatial frequencies during the Fourier transform, since the first zero in the spectrum of a rectangular function occurs at a completely determined frequency $f_x=1/a$. It can be seen that the real $G(f_x)$ response covers a much larger range of spatial frequencies, i.e., the approximation of the pulse response by a rectangular function with a width of a (spot size), yields an underestimation of the accuracy of the relief reproduction as a result of scanning.

CONCLUSION

The relief-frequency response, representing the laser scanning location system as a filter of spatial frequencies, makes it possible to consider this system as a linear link in the general scheme of signal transformation when scanning the surface relief. The relief-frequency response of the laser locating system determines the accuracy of the relief reproduction, characterized by the range of transmitted frequencies.



параметров и характеристик лазерных локаторов, используемых для сканирования рельефа поверхностей, наряду с размерами сечения лазерного пучка на определенном расстоянии указывать рельефно-частотную характеристику, определенную на этом расстоянии до объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ллойд Дж.** Системы тепловидения /Пер. с англ. под ред. А.И. Горячева.– М.: Мир. 1978.
2. **Соломатин В.А.** Оптические и оптико-электронные приборы в геодезии. строительстве и архитектуре.– М.: Машиностроение, 2013.
3. **Соломатин В.А.** Оценка точности наземных лазерных сканеров.– Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2012, № 5, с. 110–114.

In the experimental determination of the relief-frequency response as a test object, it is expedient to use a model with a stepped range change ("ledge"), followed by direct determination of the transition response (edge function), which makes it possible to calculate the relief-frequency response. The developed installation and the measurement method support the possibility of experimental determination of the transient response and subsequent calculation of the relief-frequency response. It is advisable to indicate the relief-frequency response determined at this distance to the object in the list of parameters and characteristics of laser locators used to scan the surface relief, along with the dimensions of the laser beam section at a certain distance.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



ОКНОННЫЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ

Издание второе, переработанное и дополненное

В.П.Дворкович, А.В.Дворкович

Цена 475 руб.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 208 с.,
ISBN 978-5-94836-432-2

Книга содержит подробную информацию о параметрах классических оконных функций, сконструированных различными авторами в виде произведений, сумм и сверток различных функций или в виде отдельных участков известных окон, и их применении для анализа сигналов с использованием БПФ.

Приведены результаты авторской разработки ряда новых высокоеффективных оконных функций с применением следующих алгоритмов: минимизации спектра вне пределов заданного частотного интервала; минимизации различий формы и спектра оконных функций; максимизации скорости спада уровней боковых лепестков спектра оконных функций; перемножения относительных спектров оконных функций.

Особое вниманиеделено анализу равноволновых окон Дольфа – Чебышева и Барсилона – Темеша, тождественно аппроксимируемых конечным числом косинусоидальных функций; с применением этих функций реализованы новые окна, обеспечивающие существенное подавление боковых лепестков.

Рассмотрены принципы обработки ограниченных по спектру сигналов с использованием субполосных дискретных вейвлет-преобразований от второго до пятого порядков и формирование на их базе оконных функций. Подробно анализируются методы обработки видеоинформации с применением двухполосных и комбинированных вейвлет-преобразований, реализации на их основе кратномасштабных преобразований изображений.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; ☎ (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru