

УДК 519.216.3

DOI 10.22213/2410-9304-2018-3-84-89

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ОДНОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А. И. Емельянов, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
И. В. Абрамов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

А. И. Абрамов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

При использовании оптических измерительных систем для сканирования области пространства возникает проблема определения оптимального диапазона сканирования с минимальным отклонением в ходе измерения параметра расстояния до цели. Сравнение результатов измерений, полученных LIDAR-устройством и лазерным дальнометром, позволяет получить достоверную оценку разброса данных при измерении расстояния до заданного объекта. Однофакторная модель эксперимента, представленного в виде матрицы планирования с последующим определением расчетных значений критериев Кохрена и Стьюдента уравнения регрессии для основной и вспомогательной измерительных систем, необходима для выявления адекватности коэффициентов уравнения регрессии по критерию Фишера. Адекватность коэффициентов позволяет использовать модель эксперимента, связанного с LIDAR-устройством при сканировании области пространства и построении карты помещения без применения специальных алгоритмов, необходимых для минимизации отклонения данных массива с координатами x и y . В статье представлен сравнительный анализ однофакторных моделей, полученных в ходе экспериментальных исследований с последующим вычислением расчетных значений вышеуказанных критериев уравнения регрессии и определением целесообразности использования LIDAR-устройства для сканирования пространства без дополнительных алгоритмов обработки данных. В экспериментальных исследованиях используются нижеперечисленные измерительные системы: импульсный лазерный дальномер модели Bosch DLE-40 и LIDAR-устройство Hokiyo UTM-30LN.

Ключевые слова: лазерный дальномер, LIDAR-устройство, оптические системы, погрешность измерений, расстояние до цели, отклонение средних значений.

Введение

В области обнаружения ошибок измерительных приборов случайного и систематического характера значительное количество исследований посвящено сравнению результатов оценки точности измерений с использованием доверительного оценивания и вычислению среднеквадратической ошибки измерения без использования вспомогательных приборов [1–3], позволяющих определить целесообразность проводимых исследователем экспериментов. Применение вспомогательного импульсного измерительного устройства, представленного в виде лазерного дальнометра, позволяет повысить эффективность определения величины отклонения при равнооточных измерениях. В настоящей работе для определения точности измерительной системы и расчета отклонения средних значений при измерении расстояния предложена модель однофакторного эксперимента, позволяющая провести качественный анализ параметра отклонения.

Теоретическая часть

LIDAR-устройство, используемое в существующем исследовании, относится к классу лазерных сканеров, позволяющих формировать сцену определенной области в режиме реального времени с использованием двумерного мас-

сива с координатами x и y . При сканировании области пространства в данном измерительном устройстве используются кратковременные импульсы лазерного излучения, фиксирующие момент передачи и приема сигналов, после чего система сохраняет координаты точки и формирует массив данных, сохраняя предыдущие значения. Следует учитывать, что скорость сканирования при угловом диапазоне 270° составляет $25 \cdot 10^{-3}$ секунд, позволяя формировать массив из 1080 значений в течение одного скана. Расстояние до точки поверхности объекта, в которой произошло отражение лазерного луча, может быть определено по зависимости [4]:

$$D = \frac{1}{2}ct, \quad (1)$$

где c – скорость света; t – полное время прохождения светом пути до точки отражения и обратно; D – искомое расстояние до точки отражения.

Импульсный лазерный дальномер, представленный в качестве сравнительного измерительного прибора, предназначен для определения расстояния до конкретной точки пространства, т. е. система обладает иным характером измерений. Время измерения параметра расстояния до цели составляет $5 \cdot 10^{-1}$ секунд, с учетом пара-

метра отражающей способности поверхности цели. При импульсном методе измерения расстояния используется следующая зависимость [5]:

$$L = \frac{ct}{2n}, \quad (2)$$

где L – расстояние до объекта; c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления среды, в которой распространяется излучение; t – время прохождения импульса до цели и обратно (время отклика). Учитывая зависимости (1) и (2), необходимо определить диапазон расстояний, на котором будут производиться измерения, и указать уровни варьирования управляемого фактора в виде расстояния до i -го маркера [6]:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - x_{j0}}{I_j}, \quad (3)$$

где \tilde{x}_j – натуральное значение фактора; I_j – интервал варьирования; x_{j0} – основной уровень; x_j – кодированное значение. В результате преобразования x_j принимает значения на границе $x_j = \pm 1$, на основном уровне $x_j = 0$. Далее необходимо построить матрицу планирования с учетом требований симметричности, нормировки и ортогональности и определить зависимость коэффициентов уравнения регрессии по зависимостям [7]:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j \quad (4)$$

и

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \bar{y}_j, \quad (5)$$

где n – количество экспериментов; \bar{y}_j – среднее значение параметра в j -м эксперименте; b_0 и b_i – коэффициенты регрессии. После определения коэффициентов уравнения регрессии необходимо указать стандартное отклонение каждой выборки, представленной в матрицах планирования [8]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (6)$$

где y_i – i -й элемент выборки; \bar{y} – среднее арифметическое выборки; n – объем выборки. Дисперсия каждого эксперимента, с учетом равного количества опытов, и проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена рассчитываются по зависимостям [9]:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (7)$$

где S_{\max}^2 – максимальное значение выборочной дисперсии определенной выборки, $\sum_{i=1}^N S_i^2$ – сумма дисперсий выборок. Далее следует доказательство значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента [10]:

$$t_{\text{расч}} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{\sigma \sqrt{n}}, \quad (8)$$

где \bar{y} – среднее арифметическое выборки; y_{\min} – минимальное значение i -й выборки; σ – стандартное отклонение; n – объем выборки. Адекватность применяемой в эксперименте модели определена критерием Фишера, исходя из зависимости [11]:

$$\frac{S_{x_i}^2}{S_{y_i}^2}; t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}, \quad (9)$$

где $S_{x_i}^2$, $S_{y_i}^2$ – выборки, представленные в матрицах планирования; $t_{\text{расч}}$, $t_{\text{табл}}$ – расчетное и табличное значения критерия Фишера. При выполнении условия модель эксперимента является адекватной.

Экспериментальная часть

Эталонным прибором исследования при проведении однофакторных экспериментов является импульсный лазерный дальномер фирмы *Bosch DLE-40*. Характеристики эталонного измерительного прибора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики прибора

Максимальное расстояние измерений (м)	Минимальное расстояние измерений (м)	Погрешность измерения при 10 м (мм)	Длина волны (мм)
30	0,05	±1,5	635

Параметр погрешности, указанный в табл. 1, возрастает в соответствии с увеличением диапазона расстояния – на дистанции, равной 29 мет-

рам, погрешность измерений эталонного устройства возрастает до 9 миллиметров. Уровни

варьирования управляемого фактора по зависимости (3) представлены в табл. 2.

Диапазон измерений, указанных в табл. 2, составляет 29 метров. Матрица планирования представлена в табл. 3.

Таблица 2. Уровни варьирования управляемого фактора

Наименование и обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервал варьирования δ , м
	-1	0	+1	
x – расстояние (м)	1	15	29	14

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента

№	Матрица планирования в кодированных значениях		Функция отклика l , м					Среднее арифметическое, м
			Параллельные опыты					
i	X_0	X_1	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	Y_{i4}	Y_{i5}	\bar{Y}_{ap}
1	+1	-1	1,0068	1,0077	1,0080	1,0085	1,0142	1,00904
2	+1	0	15,0074	15,0114	15,0184	15,0196	15,0213	15,0156
3	+1	+1	29,020	29,0228	29,024	29,0258	29,027	29,039

Исходя из данных, отображенных в табл. 3, исследователем принято решение о проведении нескольких опытов для снижения вероятности возникновения большей погрешности и определения среднего арифметического значения на

каждой дистанции. Результаты расчетов стандартного отклонения для каждой выборки эксперимента с указанием коэффициентов регрессии представлены в табл. 4.

Таблица 4. Стандартное отклонение выборок

№	Матрица планирования в кодированных значениях		Коэффициенты регрессии		Стандартное отклонение выборочной дисперсии, м
	X_0	X_1	b_i		
1	+1	-1	X_0	X_1	0,00263
2	+1	0	15,0161	14,343	0,00531
3	+1	+1			0,00243

Стандартное отклонение, представленное в табл. 4, в диапазоне от 1 до 29 метров является незначительным и стремится к нулю. Дисперсии выборок, указанных в табл. 3, являются однородными, согласно критерию Кохрена по

зависимости (7). Результаты представлены в табл. 5.

Определение значимости коэффициентов регрессии исходит из зависимости (7) и представлено в табл. 6.

Таблица 5. Проверка однородности дисперсий выборок

№	Выборочная дисперсия	Расчетное значение критерия Кохрена	Табличное значение критерия Кохрена	Проверка однородности дисперсий
i	S_i^2	$G_{расч}$	$G_{табл} = \Phi(3, 4, 0,95)$	$G_{расч} < G_{табл}$
1	8,703E-06	0,6865	0,7454	Условие выполняется
2	3,530E-05			
3	7,410E-06			

Таблица 6. Определение значимости коэффициентов регрессии

Номер выборки	Расчетное значение критерия	Среднее арифметическое значение	Табличное значение критерия	Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии
i	$t_{расч}$	$\bar{t}_{расч}$	$t_{табл}$	$t_{расч} \geq t_{табл}$
1	0,340	0,536	2,776	0,536 < 2,776
2	0,620			
3	0,645			

В данном однофакторном эксперименте коэффициент регрессии является значимым, т. е. уравнение определено зависимостью вида

$$y = b_0 + b_1x_1 = 15,0161 + 14,343x_1. \quad (10)$$

Адекватность уравнения регрессии в соответствии с зависимостью (9) представлена в табл. 7.

Таблица 7. Проверка адекватности уравнения регрессии

Номер выборки	Значение дисперсии выборки	Сравнение выборок на основе дисперсии	Результат сравнения	Проверка адекватности модели
i	S_i^2		Sx_i^2 / Sy_i^2	$\bar{t}_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$
1	$8,703 \times 10^{-6}$	1 → 2	4,06	$4,06 < 6,39$
2	$3,530 \times 10^{-5}$	2 → 3	4,76	$4,76 < 6,39$
3	$7,410 \times 10^{-6}$	1 → 3	1,17	$1,17 < 6,39$

Данные, отображенные в табл. 7, доказывают адекватность уравнения регрессии. Для определения точности измерительного устройства необходимо провести второй однофакторный экс-

перимент в виде сравнения лазерного дальномера с системой лазерного сканирования японского производителя *Hokuyo* модели *UTM-30LX-EW*. Характеристики системы приведены в табл. 8.

Таблица 8. Характеристики LIDAR-устройства

Максимальное расстояние измерений (м)	Минимальное расстояние измерений (м)	Погрешность измерения (мм) до 10 м	Длина волны (мм)
30	0,1	±30	905

Величина отклонения, отображенная в табл. 8 при дистанции, равной 29 метрам, составляет 90 миллиметров, что значительно превышает погрешность эталонного измерительного устройства. Матрица планирования представлена в табл. 9.

Представленные в табл. 9 параллельные опыты демонстрируют увеличение величины отклонения в сравнении с табл. 2. Определение коэффициентов регрессии аналогично, т. е. используются зависимости (4) и (5). Коэффициенты представлены в табл. 10.

Таблица 9. Матрица планирования

№	Матрица планирования в кодированных значениях		Функция отклика $l, \text{ м}$					Среднее арифметическое, м
			Параллельные опыты					
i	X_0	X_1	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	Y_{i4}	Y_{i5}	\bar{Y}_{op}
1	+1	-1	1,0613	1,0621	1,0623	1,063	1,0633	1,0624
2	+1	0	15,0967	15,0969	15,0974	15,1049	15,1059	15,10036
3	+1	+1	29,0108	29,021	29,0638	29,093	29,1138	29,0604

Таблица 10. Определение коэффициентов регрессии

№	Матрица планирования в кодированных значениях		Коэффициенты регрессии		Стандартное отклонение выборочной дисперсии σ
	X_0	X_1	b_0	b_1	
1	+1	-1	15,074	14,366	0,00079
2	+1	0			0,00462
3	+1	+1			0,04400

Данные, отображенные в табл. 10, показывают, что при дистанции, составляющей 1 метр, стандартное отклонение незначительно, а при увеличении дистанции до 29 метров отклонение возрастает в 56 раз по сравнению с исходным. Проверка однородности дисперсий выборок представлена в табл. 11.

Данные, отображенные в табл. 11, позволяют сделать вывод о неоднородности дисперсий, указанных в выборках табл. 9. Уравнение регрессии представлено зависимостью:

$$y = b_0 + b_1x_1 = 15,0740 + 14,366x_1. \quad (11)$$

Проверка адекватности уравнения регрессии осуществляется согласно зависимости (9) и представлена в табл. 12.

Таблица 11. Проверка однородности дисперсий выборок

№	Выборочная дисперсия	Расчетное значение критерия Кохрена	Табличное значение критерия Кохрена	Проверка однородности дисперсий
i	S_i^2	$G_{\text{расч}}$	$G_{\text{табл}} = \Phi(3, 4, 0.95)$	$G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$
1	$6,2 \times 10^{-7}$	0,9890	0,7454	Условие не выполняется
2	$2,14 \times 10^{-5}$			
3	$1,985 \times 10^{-3}$			

Таблица 12. Проверка адекватности уравнения регрессии

Номер выборки	Значение дисперсии выборки	Сравнение выборок на основе дисперсии	Результат сравнения	Проверка адекватности модели
i	S_i^2		Sx_i^2 / Sy_i^2	$\bar{t}_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$
1	$6,2 \times 10^{-7}$	1 → 2	34,40	$34,40 > 6,39$
2	$2,14 \times 10^{-5}$	2 → 3	92,92	$92,92 > 6,39$
3	$1,985 \times 10^{-3}$	1 → 3	3200,96	$3200,96 > 6,39$

Указанные в табл. 12 значения отображают отсутствие адекватности уравнения регрессии, представленного в зависимости (11). Разброс значений, полученных в ходе сканирования с помощью LIDAR-устройства, изменяется по неопределенному закону, что подтверждается неадекватностью коэффициентов уравнения регрессии второго однофакторного эксперимента.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ показал, что для повышения точности измерения расстояния лазерным сканером до заданного объекта необходима разработка специальных алгоритмов, учитывающих достаточно большую нечеткость массива данных, полученного в ходе сканирования области пространства.

Библиографические ссылки

1. Кугаевский В. И., Хан В. Д. Сравнительный анализ точности геодезических работ при их выполнении с помощью БПЛА «GATEWING X100» и наземной сканирующей установки «RIEGL VZ-1000» // Автоматика. Вычислительная техника : IX Международный научный конгресс и выставка «ИнтерЭкспо Гео-Сибирь» / под общ. ред. СГГА. 2013. Т. 3. С. 111–116.

2. Иванов А. В., Середович В. А. Исследования точности измерений выполненных наземным лазерным сканером // Строительство. Архитектура : IX Международный научный конгресс и выставка «ИнтерЭкспо Гео-Сибирь» / под общ. ред. СГГА. 2013. Т. 1. С. 134–143.

3. Бачинин С. В., Лентовский В. В., Фёдоров Д. Л. Экспериментальная оценка дальности обнаружения беспилотных летательных аппаратов лазерным даль-

номером // Технические науки : материалы XIII Международной научно-практической конференции «Научный форум: инновационная наука». М., 2018. Т. 4. С. 19–23.

4. Гужов В. И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2015. 82 с.

5. Антонов А. В. Сканирующие лазерные дальнометры // Робототехника: «Современная электроника». 2016. Т. 1. С. 10–16.

6. Мухачёв В. А. Планирование и обработка результатов эксперимента. Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. 119 с.

7. Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. Методы планирования эксперимента и обработки данных. Самара : Самарский государственный технический университет, 2016. 132 с.

8. Реброва И. А. Планирование эксперимента. Омск : Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2010. 107 с.

9. Рогов В. А., Поздняк Г. Г. Методика и практика технических экспериментов. М. : Академия, 2005. 288 с.

10. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М. : Наука, 2010. 108 с.

11. Налимов В. В. Теория эксперимента. М. : Наука, 1971. 208 с.

References

1. Kugaevsky V. I., Khan V. D. *Sravnitel'nyy analiz tochnosti geodezicheskikh работ pri ikh vypolnenii s pomoshch'yu BPLA «GATEWING X100» i nazemnoy skaniruyushchey ustanovki «RIEGL VZ-1000»* [Comparative analysis of the accuracy of geodetic work during their implementation with the help of the UAV

«GATEWING X100» and the ground scanning facility «RIEGL VZ-1000»). *Avtomatika. Vychislitel'naya tekhnika* [Proc. Automation. Computer Engineering] (eds. SGGGA), 2013, vol. 3, pp. 111-116 (in Russ.).

2. Ivanov A. V., Seredovich V. A. *Issledovaniya lishennykh izmereniy vypolnennykh nazemnym lazernym skanerom* [The accuracy of measurements performed by a ground-based laser scanner]. *Stroitel'stvo. Arkhitektura* [Proc. Building. Architecture] (eds. SGGGA), 2013, vol. 1, pp. 134-143 (in Russ.).

3. Bachinin S. V., Lentovskiy V. V., Fodorov D. L. *Ekspirental'naya otsenka dal'nosti obnaruzheniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov lazernym dal'nomerom* [Experimental evaluation of the range of detection of unmanned aerial vehicles with a laser range-finder]. *Tekhnicheskkiye nauki* [Proc. Technical science], 2018, vol. 4, pp. 19-23 (in Russ.).

4. Guzhov V. I. *Metody izmereniya 3D-profil'ya* [Methods for measuring the 3D profile of objects]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2015 (in Russ.).

5. Antonov A. V. [Scanning laser rangefinders]. *Robototekhnika, «Sovremennaya elektronika»*, 2016, vol. 1, pp. 10-16 (in Russ.).

6. Mukhachev V. A. *Planirovaniye i obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Planning and processing of experimental results]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2007 (in Russ.).

7. Makarichev Yu. A., Ivannikov Yu. N. *Metody planirovaniya eksperimenta i obrabotki dannykh* [Methods of experiment planning and data processing]. Samara, Samara State Technical University, 2016 (in Russ.).

8. Rebrova I. A. *Planirovaniye eksperimenta* [Planning an experiment]. Omsk, Siberian State Automobile and Highway Academy, 2010 (in Russ.).

9. Rogov V. A., Pozdnyak G. G. *Metodika i praktika tekhnicheskikh eksperimentov* [Technique and practice of technical experiments]. Moscow, Academy Publ., 2005 (in Russ.).

10. Sobol I. M. *Vybor optimal'nykh parametrov v ramkakh so mnogimi kriteriyami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. Moscow, Science Publ., 2010 (in Russ.).

11. Nalimov V. V. *Teoriya eksperimenta* [The theory of experiment]. Moscow, Science Publ., 1971 (in Russ.).

Comparative Analysis of Measurement Systems Using One-Factor Experiments

A. I. Emelyanov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

I. V. Abramov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

A. I. Abramov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

When using optical measurement systems to scan an area of space, the problem arises of determining the optimal range of scanning with a minimum deviation during the measurement of the distance to the target. Comparison of the results of measurements obtained by the LIDAR-device and the laser range finder allows for obtaining a reliable estimate of the spread of data when measuring the distance to a given object. The one-factor model of the experiment presented in the form of a planning matrix with the subsequent determination of the calculated values of the Cochran and Student criteria for the regression equation for the main and auxiliary measurement systems is necessary to determine the adequacy of the coefficients of the regression equation by the Fisher criterion. The adequacy of the coefficients makes it possible to use the experiment model associated with the LIDAR-device when scanning a space region and constructing a room map without applying special algorithms necessary to minimize the deviation of the array data with the x and y coordinates. The paper presents comparative analysis of single-factor models obtained in the course of experimental studies with subsequent calculation of the calculated values of the above criteria of the regression equation and determination of the expediency of using a LIDAR-device for scanning space without additional data processing algorithms. In the experimental studies, the following measurement systems are used: pulse laser rangefinder Bosch DLE-40 and LIDAR-device Hokuyo UTM-30LN.

Keywords: laser rangefinder, LIDAR-device, optical systems, measurement error, distance to target, deviation of mean values.

Получено: 06.06.18