

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ

УДК 528.8:004.932.2

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-83-90

Методика контроля качества представления данных бортового лазерного сканирования смесью трехмерных гауссовых компонент

Т. А. Пискленов, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

В. А. Ненашев, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Цель исследования – разработать методику формирования и контроля качества компактного представления данных бортового лазерного сканирования смесью трехмерных гауссовых компонент, позволяющую согласовать геометрическую точность, долю измерений в заданном допуске и сокращение объема данных. Актуальность работы обусловлена ростом плотности лазерного сканирования и необходимостью выполнять оперативный контроль протяженных природных и техногенных объектов при ограниченных ресурсах бортовой памяти и канала передачи. Работа посвящена представлению локальных фрагментов облака точек ориентированными гауссовыми компонентами, параметры которых отражают центр, размеры, направление и анизотропию измеренной поверхности. Для достижения цели предложены: входной контроль данных, переход к локальной системе координат, адаптивное пространственное разбиение, оценивание средних значений, полных ковариационных матриц и контрольных пространственных остатков. Ячейки с наибольшими остатками дробятся повторно, после чего проводится итоговый контроль по среднеквадратическому отклонению, квантилю уровня 0,95, доле точек в допуске и коэффициенту сокращения. Вычислительный эксперимент выполнен на 1 000 000 точек открытого набора воздушного лазерного сканирования. При 50001 компоненте получены среднеквадратическое отклонение расстояния до локальной плоскости 0,136 м, квантиль уровня 0,95, равный 0,245 м, доля точек в допуске 0,25 м, равная 95,21 %, и коэффициент сокращения объема 16,25. По сравнению с равномерным разбиением среднеквадратическое отклонение уменьшено на 31,6 %. Цель исследования достигнута: предложенная методика обеспечивает контролируемое сокращение данных и может использоваться как основа оперативного контроля состояния объектов.

Ключевые слова: бортовое лазерное сканирование, контроль качества, облако точек, трехмерная гауссова компонента, ковариационная матрица, адаптивное разбиение.

Введение

Бортовое лазерное сканирование применяется при контроле рельефа, растительности, гидротехнических сооружений, транспортной инфраструктуры и других протяженных объектов. Результатом измерений является пространственно привязанное облако точек, каждая из которых содержит координаты, интенсивность отраженного сигнала и дополнительные признаки регистрации. Такое представление сохраняет первичные измерения, однако его объем быстро возрастает при повышении плотности сканирования и площади обследования [1–3].

Для задач контроля важны не только полнота исходных данных, но и возможность своевременно передать, сопоставить и повторно обработать их. Хранение каждой точки как независимой записи приводит к избыточному расходу памяти и затрудняет применение методов контроля на бортовых вычислительных средствах. В отечественных исследованиях разработаны способы снижения избыточности, сегментации и классификации облаков точек [4–6]. Вместе с тем обычно отдельно рассматриваются точность геометрической модели и степень сокращения данных, тогда как решение о пригодности представ-

ления должно приниматься по их совместному контролю [7, 8]. Для технических систем контроля также актуальны задачи выявления деформаций и распознавания объектов по данным бортовых средств наблюдения [9–11].

Локальная поверхность в облаке точек обладает выраженной направленностью. Для грунта или кровли разброс вдоль касательной плоскости существенно больше разброса по нормали; для стволов, опор и кромок характерны вытянутые распределения. Поэтому замена группы точек только ее центром не сохраняет геометрическое строение участка. Полная ковариационная матрица, напротив, содержит размеры, ориентацию и степень анизотропии локального распределения. Геометрическим образом такой матрицы является эллипсоид, полуоси которого совпадают с главными направлениями разброса [12, 13].

В статистическом распознавании смеси нормальных распределений давно применяются для описания неоднородных выборок. Современные способы визуализации пространственных сцен трехмерными гауссовыми примитивами показали, что набор ориентированных эллипсоидов может эффективно воспроизводить сложную геометрию [14]. Однако фотометрические показатели изображения не являются

достаточными показателями контроля данных лазерного сканирования: требуется непосредственно оценивать расстояния исходных точек до локальных поверхностей, устойчивость ковариационных оценок и долю измерений, удовлетворяющих заданному допуску.

Научная новизна работы состоит в объединении геометрически адаптивного формирования компонент и формального правила контроля. Ячейки с наибольшими остатками дробятся, после чего параметры компонент оцениваются повторно. Вычислительный ресурс направляется преимущественно на участки со сложным рельефом, резкими перепадами высот и неоднородной структурой. Для плоских областей сохраняются более крупные компоненты. В результате число компонент определяется не только плотностью точек, но и контролируемой сложностью поверхности.

Цель исследования – разработать методику представления данных бортового лазерного сканирования смесью трехмерных гауссовых компонент и систему показателей контроля, связывающую геометрическую точность, долю точек в допуске и сокращение оперативного объема данных. Для достижения цели решаются задачи входного контроля, пространственного разбиения, оценивания параметров, регуляризации ковариационных матриц, адаптивного дробления и итогового контроля пригодности представления.

Постановка задачи контроля

Пусть исходное облако содержит M измерений $P = \{x_i, I_i\}$, где $x_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ – координаты точки, I_i – интенсивность отражения. Компактное представление задается смесью N трехмерных нормальных компонент. Для j -й компоненты сохраняются вес w_j , среднее μ_j , симметричная ковариационная матрица Σ_j , средняя интенсивность $\bar{I}_j$ и число исходных точек n_j .

$$p(x) = \sum_{j=1}^N w_j \left[(2\pi)^3 \det(\Sigma_j) \right]^{-1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x - \mu_j)^T \Sigma_j^{-1} (x - \mu_j) \right\}.$$

Матрица Σ_j является положительно определенной и раскладывается в виде $\Sigma_j = R_j \text{diag}(\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \lambda_{3j}) R_j^T$. Столбцы R_j задают главные направления локального участка, а величины $a_{kj} = c\sqrt{\lambda_{kj}}$ задают полуоси эллипсоида выбранного уровня. Для плоского фрагмента λ_{3j} значительно меньше λ_{1j} и λ_{2j} ; собственный вектор, отвечающий λ_{3j} , используется как оценка нормали к поверхности.

Контрольный остаток для точки определяется расстоянием до локальной касательной плоскости компоненты, к которой отнесено измерение:

$$r_i = \left| n_j^T (x_i - \mu_j) \right|, \quad n_j = \nu_{\min}(\Sigma_j).$$

В качестве сводных показателей применяются: среднеквадратическое отклонение σ_r , квантиль $q_{0,95}$, доля точек D_δ с $r_i \leq \delta$ и коэффициент сокращения K . При хранении исходной точки в виде трех координат двойной точности, интенсивности, классификационного признака и времени регистрации ее оперативная запись в эксперименте принята равной 39 байтам. Запись компоненты включает параметры среднего, шесть независимых элементов ковариационной матрицы, вес, интенсивность и число точек, то есть 48 байт. Поэтому K определяется отношением $39M/48N$.

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_i^2}, \quad D_\delta = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 1(r_i \leq \delta) \cdot 100\%, \quad K = \frac{V_0}{V_g}.$$

Представление признается пригодным для заданного режима контроля при одновременном выполнении условий $q_{0,95} \leq \delta_q$, $D_\delta \geq D_{\min}$, $K \geq K_{\min}$ и положительной определенности всех ковариационных матриц. В вычислительном эксперименте основной пространственный допуск принят равным $\delta = 0,25$ м. Значения $D_{\min}$ и $K_{\min}$ зависят от назначения контроля; для сравнительного анализа использованы $D_{\min} = 95\%$ и $K_{\min} = 15$.

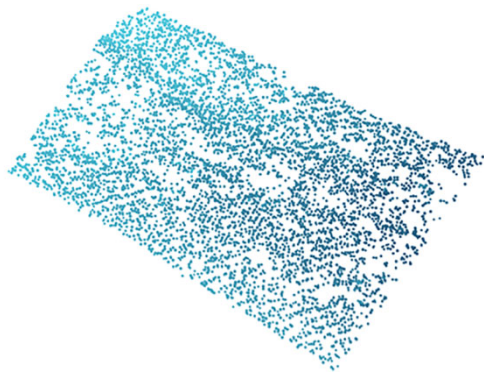
Применение нескольких показателей принципиально важно. Малое среднеквадратическое отклонение может сочетаться с локальными крупными ошибками, если сложные участки занимают небольшую долю площади. Квантиль $q_{0,95}$ ограничивает хвост распределения остатков, а D_δ показывает процент измерений, непосредственно прошедших контроль допуска. Коэффициент K не характеризует геометрическую точность, но предотвращает выбор режима, при котором число компонент приближается к числу исходных точек, и практический смысл компактного представления утрачивается.

Геометрический смысл трехмерных гауссовых компонент

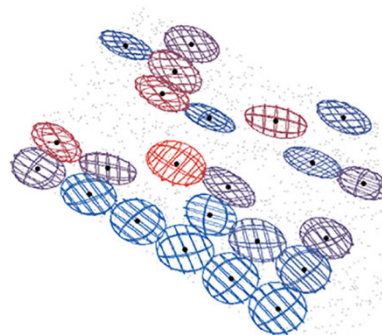
Каждая компонента может быть представлена ориентированным эллипсоидом. Его центр совпадает с μ_j , направление полуосей определяется собственными векторами Σ_j , а длины полуосей пропорциональны квадратным корням из собственных значений. Поэтому плоский участок отображается тонким дискообразным эллипсоидом, линейный объект – вытянутым эллипсоидом, а объемная неоднородность – компонентой с близкими значениями всех трех полуосей.

На рисунке 1 приведен пример, построенный по реальному фрагменту открытых данных воздушного лазерного сканирования. На левой части показаны исходные измерения, окрашенные по относительной высоте. На правой части те же данные представлены локальными компонентами. Точки служат исходной

выборкой, черные точки обозначают центры μ_j , а сетчатые эллипсоиды отображают направления и масштабы ковариации. Цвет эллипсоидов связан с величиной остатка, более теплые оттенки соответствуют геометрически сложным участкам, которым требуется дополнительное дробление.



a



b

Рис. 1. Геометрический пример представления реального фрагмента облака точек трехмерными гауссовыми компонентами: *a* – исходное облако точек; *b* – представление локальными трехмерными гауссовыми компонентами

Fig. 1. Geometric example of representing a real point-cloud fragment by three-dimensional Gaussian components: *a* – source point cloud; *b* – representation by local three-dimensional Gaussian components

Для технического контроля полезны три производных признака формы: плоскостность $F = (\lambda_2 - \lambda_3)/\lambda_1$, линейность $L = (\lambda_1 - \lambda_2)/\lambda_1$ и сферичность $S = \lambda_3/\lambda_1$ при $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$. Эти безразмерные величины позволяют отделять плоские поверхности от кромок и объемных рассеивателей. В предлагаемом методе они не заменяют контроль остатка, а используются для выбора направления дробления и для протокола последующего контроля состояния объекта.

Масштаб эллипсоида задается коэффициентом c . Если граница строится по условию

$$(x - \mu)^T \Sigma (x - \mu) = c^2,$$

то для трехмерного нормального распределения уровню вероятности 0,95 соответствует $c \approx 2,795$. В работе эллипсоиды применяются как средство объяснения геометрии, контрольное решение принимается по остаткам исходных точек, а не по визуальному пересечению границы эллипсоида.

Из рисунка 1 следует, что гауссова компонента не является отдельной измеренной точкой и не должна трактоваться как сфера фиксированного радиуса. Это локальная статистическая модель. Ее форма изменяется в соответствии с измеренной поверхностью. Именно анизотропия позволяет представить протяженный плоский участок меньшим числом параметров, не теряя направления нормали и характерных масштабов.

Метод формирования и контроля

Метод включает восемь последовательно выполняемых операций. На первой операции проводится

входной контроль: проверяются система координат, диапазоны высот и интенсивности, наличие пропусков, повторяющихся записей, выбросов и недостаточно заполненных областей. Координаты переводятся в локальную систему, чтобы уменьшить влияние больших абсолютных значений на вычисление ковариаций [15–17].

На второй операции область измерений разбивается кубическими ячейками с начальной стороной h_0 . Значение h_0 выбирается по требуемому начальному числу компонент и ограничивается снизу условием достаточного числа точек в ячейке. Ячейки с числом точек меньше $n_{\min}$ объединяются с ближайшей заполненной ячейкой либо сохраняются как исходные точки с отметкой о непрохождении контроля статистической устойчивости.

На третьей операции для каждой ячейки вычисляются μ_j , Σ_j , w_j и $\bar{I}_j$. Для защиты от вырожденности выполняется регуляризация

$$\Sigma_j^* = \Sigma_j + \varepsilon \cdot \text{tr}(\Sigma_j) / 3E,$$

где E – единичная матрица; ε – малая безразмерная величина.

После регуляризации повторно контролируются знаки собственных значений и отношение λ_1/λ_3 . Компоненты с недопустимой обусловленностью помечаются для дробления.

На четвертой операции каждой точке назначается локальная компонента и рассчитывается остаток r_i . Для ячейки формируется частный показатель J_j , учитывающий среднеквадратический остаток, квантиль уровня 0,95, число точек и признаки формы:

$$J_j = \alpha \frac{\sigma_{r,j}}{\delta} + \beta \frac{q_{0,95,j}}{\delta} + \gamma \cdot \log(1 + n_j) + \eta S_j,$$

Коэффициенты α , β , γ и η нормируют влияние показателей. В эксперименте ранжирование выполнялось преимущественно по геометрическому остатку, признаки формы использовались как дополнительные. Ячейки с наибольшим J_j дробились на восемь дочерних ячеек. Пустые дочерние ячейки отбрасывались, поэтому фактическое увеличение числа компонент отличалось от кратного восьми.

На пятой операции параметры дочерних компонент оцениваются повторно. Дробление продолжается до достижения заданного числа компонент, выполнения контрольных допусков либо минимального допустимого размера ячейки $h_{\min}$. Такой порядок обеспечивает управляемое распределение вычислительного ресурса: участки с малой кривизной сохраняются крупными, а зоны изменения нормали, кромки и растительность описываются более мелкими компонентами.

На шестой операции выполняется итоговый контроль по σ_r , $q_{0,95}$, D_δ и K . Дополнительно сохра-

няется пространственная карта ячеек, не прошедших допуск. Эта карта необходима для последующего контроля объекта: оператор или автоматизированная система видит не только общее значение ошибки, но и расположение проблемных областей.

На седьмой операции формируется выходная запись. В нее входят параметры компонент, границы обработанного участка, система координат, контрольные допуски, значения показателей, дата обработки и версия алгоритма. На восьмой операции выполняется обратный выборочный контроль: из компонент восстанавливаются локальные поверхности, после чего для независимой контрольной выборки повторно рассчитываются остатки.

Схема на рисунке 2 показывает наличие двух обратных связей. Первая возвращает данные на очистку и нормализацию, если не выполнены требования входного контроля. Вторая запускает дополнительное дробление ячеек с наибольшим остатком, если итоговые допуски не достигнуты. Благодаря этому результатом метода является не только набор параметров, но и протокол контроля, позволяющий обосновать пригодность представления для конкретной задачи.

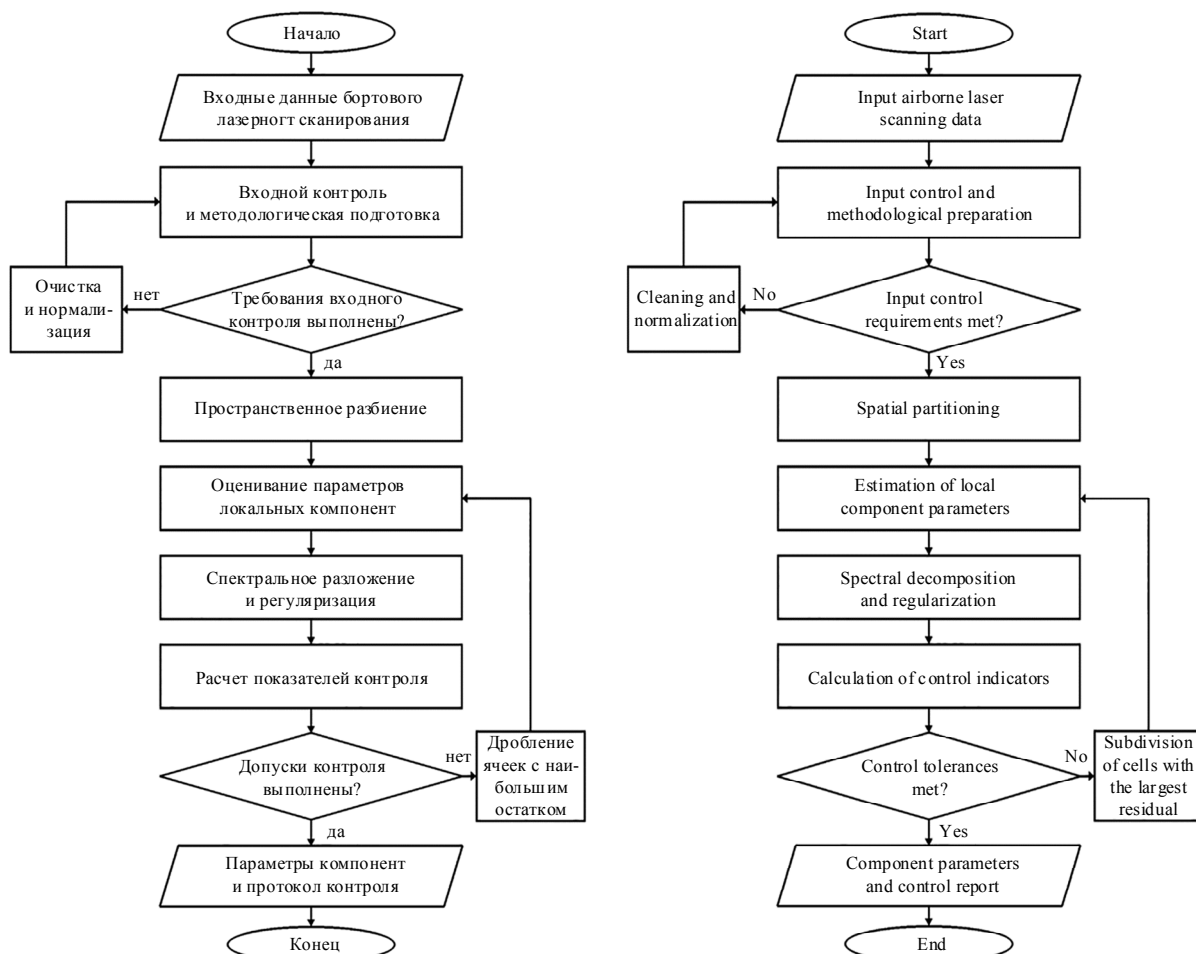


Рис. 2. Схема метода формирования и контроля гауссова представления данных бортового лазерного сканирования

Fig. 2. Flowchart of the method for forming and controlling the Gaussian representation of airborne laser scanning data

Методика вычислительного эксперимента

Проверка выполнена на открытом наборе данных воздушного лазерного сканирования. Использованы узлы иерархического массива точек, из которых загружено 1 304 584 измерения. Для воспроизводимого эксперимента случайным образом выбрано 1 000 000 точек с начальным состоянием генератора 2 282 026. Координатный охват контрольной выборки составил $1007,88 \times 806,30$ м, диапазон высот – 177,53 м, диапазон интенсивности – от 1 до 255.

Таблица 1. Условия воспроизводимого вычислительного эксперимента

Table 1. Conditions of the reproducible computational experiment

Параметр / Parameter	Значение / Value
Объем загруженных данных / Loaded data volume	1 304 584 точки / points
Контрольная выборка / Control sample	1 000 000 точек / points
Пространственный охват / Spatial coverage	$1007,88 \times 806,30$ м / m
Диапазон высот / Elevation range	177,53 м / m
Диапазон интенсивности / Intensity range	1–255
Начальное состояние генератора / Random generator seed	2282026
Основной допуск / Main tolerance	$\delta = 0,25$ м / m

Сравнивались равномерное и адаптивное разбиения. Для равномерного разбиения целевое число компонент составляло 10, 20, 30, 40 и 50 тыс. Начальная сторона кубической ячейки определялась

автоматически и изменялась от 9,880 до 4,430 м. Адаптивный вариант запускался с более крупной сетки, после чего ячейки с наибольшими контрольными остатками дробились до получения около 40 и 50 тыс. компонент.

Исходное облако и гауссово представление оценивались одной программной реализацией. Время построения измерялось после загрузки точек и не включало сетевую передачу. Показатель расстояния до центра компоненты рассчитывался дополнительно, но не использовался как основной критерий, поскольку он зависит от протяженности участка вдоль поверхности. Основным геометрическим показателем было расстояние до локальной плоскости, соответствующее наименьшему собственному значению ковариации [18, 19].

Для каждого режима сохранялись: фактическое число компонент, среднее число точек в компоненте, объем параметров, коэффициент сокращения, среднеквадратический остаток, квантиль $q_{0,95}$ и доля точек в допуске. Такой состав показателей позволяет провести как количественное сравнение способов разбиения, так и контроль выполнения заранее установленных требований.

Результаты эксперимента

При равномерном разбиении увеличение числа компонент закономерно уменьшало геометрический остаток. Фактические результаты приведены в таблице 2. При переходе от 9 999 к 49 998 компонентам среднеквадратическое отклонение снизилось с 0,486 до 0,199 м, квантиль $q_{0,95}$ – с 1,005 до 0,344 м, а доля точек в допуске 0,25 м выросла с 79,61 до 92,23 %. Одновременно коэффициент сокращения уменьшился с 81,26 до 16,25.

Таблица 2. Показатели контроля при равномерном пространственном разбиении

Table 2. Control indicators for uniform spatial partitioning

Число компонент / Number of components	Сторона ячейки, м / Cell side, m	Сокращение, раз / Reduction factor	СКО, м / RMSD, m	$q_{0,95}$, м / $q_{0,95}$, m	В допуске $D_{0,25}$, % / Within tolerance $D_{0,25}$, %
9 999	9,880	81,26	0,486	1,005	79,61
20 000	7,003	40,62	0,353	0,672	85,29
30 006	5,718	27,08	0,282	0,513	88,37
40 003	4,946	20,31	0,235	0,413	90,54
49 998	4,430	16,25	0,199	0,344	92,23

Ни один из равномерных режимов не выполнил одновременно условия $q_{0,95} \leq 0,25$ м и $D_{0,25} \geq 95$ %. Это означает, что простое уменьшение ячейки распределяет дополнительные компоненты и по плоским хорошо описываемым участкам. При ограниченном числе компонент такой расход не обеспечивает требуемого контроля хвоста распределения ошибок.

Результаты адаптивного разбиения приведены в таблице 3 совместно с ближайшими по числу компонент равномерными режимами. При 40 тыс. компонент адаптивное разбиение снизило среднеквадратический остаток с 0,235 до 0,168 м, то есть на 28,4 %. Квантиль $q_{0,95}$ уменьшился с 0,413 до 0,289 м, а доля точек в допуске выросла с 90,54 до 93,20 %.

При 50 001 компоненте достигнуты: $\sigma_r = 0,136$ м, $q_{0,95} = 0,245$ м и $D_{0,25} = 95,21$ %. По сравнению с равномерным режимом при 49 998 компонентах среднеквадратический остаток уменьшен на 31,6 %, а квантиль $q_{0,95}$ – на 28,7 %. Коэффициент сокращения практически не изменился и составил 16,25. Следовательно, улучшение связано с перераспределением компонент по геометрически сложным областям, а не с увеличением объема параметров.

Среднее число точек на компоненту в адаптивном режиме 50 тыс. составило 20,00. Из исходных 30 006 ячеек дополнительно дробились 4598 родительских ячеек. Время построения параметров после загрузки

данных составило 3,96 с на использованной вычислительной установке. Это значение характеризует программную реализацию и выбранный участок.

Перенос на бортовую аппаратуру требует отдельного контроля вычислительной производительности и энергопотребления.

Таблица 3. Сравнение равномерного и адаптивного разбиений

Table 3. Comparison of uniform and adaptive partitioning

Разбиение / Partitioning	Число компонент / Number of components	Сокращение, раз / Reduction factor	СКО, м / RMSD, m	$q_{0,95}$, м / $q_{0,95}$, m	В допуске $D_{0,25}$ / Within tolerance $D_{0,25}$, %
Равномерное / Uniform	40 003	20,31	0,235	0,413	90,54
Адаптивное / Adaptive	40 001	20,31	0,168	0,289	93,20
Равномерное / Uniform	49 998	16,25	0,199	0,344	92,23
Адаптивное / Adaptive	50 001	16,25	0,136	0,245	95,21

Обсуждение результатов исследования

Полученные значения подтверждают, что главным фактором повышения точности является геометрическая адаптация. Равномерная сетка одинаково расходует компоненты на плоские и сложные области. Адаптивная методика использует остаток как сигнал обратной связи и увеличивает разрешение представления там, где локальная плоскость описывает точки недостаточно точно. Это соответствует задачам контроля: дополнительные параметры появляются только в областях повышенного риска геометрической потери.

Ковариационное представление удобно для сравнения повторных съемок. После регистрации двух наборов данных можно сопоставлять центры компонент, направления нормалей, собственные значения и средние интенсивности. Изменение центра по нормали характеризует смещение поверхности, изменение λ_3 – рост локальной шероховатости или неопределенности, а изменение отношения λ_1/λ_2 – перестройку направленной структуры. Такие признаки могут применяться при контроле откосов, насыпей, кровель, опор и растительного покрова.

При этом гауссово представление не должно подменять первичные измерения в метрологически ответственных операциях. Оно является контролируемым производным набором данных. Исходные точки целесообразно сохранять в архиве, а параметры компонент использовать для оперативной передачи, предварительного поиска изменений и выбора участков детального контроля. Для областей, не прошедших допуск, методика должна сохранять ссылку на исходные измерения либо передавать точки без сокращения.

Ограничением исследования является использование одного открытого набора и одного значения основного допуска. Результаты нельзя без дополнительной проверки переносить на городскую застройку, лес с высокой ярусностью, линии электропередачи и водные поверхности. Для каждого класса объектов требуется установить собственные пороги, минимальное число точек и допустимую обусловленность ковариации. Также необходим отдельный контроль ошибок траекторной системы, калибровки сканера и взаимной регистрации полос.

В дальнейшей работе целесообразно исследовать временную согласованность компонент в по-

следовательных съемках, устойчивость к неравномерной плотности и совместный контроль геометрии и интенсивности. Отдельной задачей является разработка бортовой реализации, в которой дробление выполняется потоково, без хранения всего облака в оперативной памяти. Для технического применения потребуется установить связь между допусками представления и допустимыми ошибками контролируемого параметра объекта. При разработке бортовой реализации необходимо учитывать сопряжение алгоритма с регистрирующими и визуальными системами технического контроля, для которых параметры освещения и технического зрения также являются самостоятельным объектом моделирования.

Выводы

Разработана методика формирования и контроля качества представления данных бортового лазерного сканирования смесью трехмерных гауссовых компонент. Метод объединяет входной контроль, оценивание локальных средних и полных ковариационных матриц, спектральный анализ, регуляризацию, вычисление пространственных остатков и адаптивное дробление ячеек.

Вычислительный эксперимент на 1000000 реальных точек показал, что при практически одинаковом числе компонент адаптивное размещение уменьшает среднеквадратическое отклонение расстояния до локальной плоскости на 28,4...31,6 % по сравнению с равномерным разбиением. При 50001 компоненте достигнуты: $\sigma_r = 0,136$ м, $q_{0,95} = 0,245$ м, доля точек в допуске 0,25 м 95,21 % и коэффициент сокращения 16,25.

Предложенное правило контроля позволяет выбирать число компонент не по визуальному впечатлению, а по измеряемым показателям и заданному допуску. Метод пригоден как основа для оперативного контроля протяженных природных и техногенных объектов при ограничениях памяти и канала передачи. Для метрологического применения необходима дополнительная оценка составляющих погрешности измерительного комплекса и проверка на представительных контрольных объектах.

Библиографические ссылки

1. Васанов А. Е., Шляхова М. М. Метод воздушного лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2023.

Т. 4, № 1. С. 162–166. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-162-166

2. Харченко С. С., Арбузов С. А. Объектно-ориентированная классификация для предварительного анализа данных воздушного лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2025. Т. 6. С. 213–221. DOI: 10.33764/2618-981X-2025-6-213-221

3. Оценка параметров деревьев на основе данных воздушного лазерного сканирования в смешанных лесах Среднего Предуралья / А. А. Бурдин, Д. А. Богатырев, А. В. Тарасов, С. В. Пьянков // Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 4. С. 32–41. DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-4-32-41

4. Кочнева А. А., Зайцева Е. В., Катунцов Е. В. Снижение избыточности данных лазерного сканирования для построения цифровых моделей рельефа // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11, № 4 (43). DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.033

5. Алтынцева М. А., Комиссаров А. В., Алтынцев М. А. Автоматизированная сегментация и классификация данных мобильного лазерного сканирования для векторизации контурной части топографического плана городской территории // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 6. С. 32–43. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-32-43

6. Черсошентев А. Ю., Сухотин В. К. Обзор методов сегментации точек лазерных отражений, полученных по данным лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2023. Т. 6. С. 297–303. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-6-297-303

7. Горобцов С. Р. Анализ отечественного программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2023. Т. 1, № 1. С. 65–72. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-65-72

8. Применение воздушного лазерного сканирования для информационного обеспечения задач кадастрового учета водных объектов / В. В. Никольский, Д. А. Веретельник, Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2024. Т. 4, № 2. С. 184–191. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-4-2-184-191

9. Ханнанов Р. Р. Лазерное сканирование для определения деформаций насыпных дамб // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2023. Т. 1, № 1. С. 149–153. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153

10. Распознавание наземных объектов в авиационных системах потоковой обработки оптических кадров / В. А. Ненасhev, Р. М. Воронов, А. В. Березин, А. Д. Матвеев, В. К. Лосев // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22, № 4. С. 85–90. DOI: 10.18127/j20700814-202404-10

11. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для классификации зон земной поверхности по оптическим изображениям / Е. А. Антохин, А. А. Залишук, В. А. Ненасhev, С. А. Ненасhev // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 8. С. 35–44. DOI: 10.18127/j00338486-202408-04

12. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

13. Дуда Р., Харт П., Сторк Д. Классификация образов. 2-е изд. М.: Техносфера, 2003. 917 с.

14. Kerbl B., Kopanas G., Leimkühler T., Drettakis G. (2023) 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. ACM Transactions on Graphics, vol. 42, no. 4, pp. 1-14. DOI: 10.1145/3592433

15. Алгоритм выделения точек земной поверхности из данных воздушного лазерного сканирования / М. Г. Выстрчил, Т. И. Балтыжакова, А. Ю. Романчиков, А. А. Аникеева // Геодезия и картография. 2024. № 2. С. 2–11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11

16. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В. А. Вальков, К. П. Виноградов, Е. О. Валькова, М. Г. Мустафин // Геодезия и картография. 2022. № 11. С. 40–49. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49

17. Оценка точности инвентаризации лесных земель с применением воздушного лазерного сканирования / В. Ф. Ковязин, О. А. Пасько, О. Ю. Лепихина, В. Е. Трушников // Геодезия и картография. 2022. № 6. С. 54–63. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63

18. Исупов Н. С., Фомин Н. И. Сравнительный анализ эффективности способов оценки выполненных строительных работ по облаку точек // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15, № 3. С. 442–453. DOI: 10.21285/2227-2917-2025-3-442-453

19. Kellner M., Stahl B., Reiterer A. (2022) Fused Projection-Based Point Cloud Segmentation. Sensors, vol. 22, no. 3. Art. 1139. DOI: 10.3390/s22031139

References

1. Vasanov A.E., Shlyakhova M.M. (2023) [Airborne Laser Scanning Method]. *Interexpo GEO-Sibir'*, vol. 4, no. 1, pp. 162-166. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-162-166 (in Russ.).

2. Kharchenko S.S., Arbuzov S.A. (2025) [Object-Oriented Classification for Preliminary Analysis of Airborne Laser Scanning Data]. *Interexpo GEO-Sibir'*, vol. 6, pp. 213-221. DOI: 10.33764/2618-981X-2025-6-213-221 (in Russ.).

3. Burdin A.A., Bogatyrev D.A., Tarasov A.V., Pyankov S.V. (2025) [Estimation of Tree Parameters Based on Airborne Laser Scanning Data in Mixed Forests of the Middle Cis-Urals]. *Vestnik SGUGiT*, vol. 30, no. 4. pp. 32-41. DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-4-32-41 (in Russ.).

4. Kochneva A.A., Zaitseva E.V., Katuntsov E.V. (2023) [Reducing Laser Scanning Data Redundancy for Building Digital Terrain Models]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii*, vol. 11, no. 4 (43). DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.033 (in Russ.).

5. Altyntseva M.A., Komissarov A.V., Altyntsev M.A. (2024) [Automated Segmentation and Classification of Mobile Laser Scanning Data for Vectorizing the Contour Part of an Urban Topographic Plan]. *Vestnik SGUGiT*, vol. 29, no. 6, pp. 32-43. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-32-43 (in Russ.).

6. Chersoshentsev A.Yu., Sukhotin V.K. (2023) [Review of Segmentation Methods for Laser Reflection Points Obtained from Laser Scanning Data]. *Interexpo GEO-Sibir'*, vol. 6, pp. 297-303. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-6-297-303 (in Russ.).

7. Gorobtsov S.R. (2023) [Analysis of Russian Software for Laser Scanning Data Processing]. *Interexpo GEO-Sibir'*, vol. 1, no. 1, pp. 65-72. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-65-72 (in Russ.).

8. Nikolsky V.V., Veretelnik D.A., Dolgoplov D.V., Melkiy V.A. (2024) [Application of Airborne Laser Scanning for Information Support of Cadastral Registration of Water Bodies]. *Interexpo GEO-Sibir'*, vol. 4, no. 2, pp. 184-191. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-4-2-184-191 (in Russ.).

9. Khannanov R.R. (2023) [Laser Scanning for Determining Deformations of Embankment Dams]. *Interexpo GEO-Sibir'*, vol. 1, no. 1, pp. 149-153. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153 (in Russ.).

10. Nenashev V.A., Voronov R.M., Berezin A.V., Matveev A.D., Losev V.K. (2024) [Ground Object Recognition in Aviation Systems for Stream Processing of Optical Frames]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*,

vol. 22, no. 4, pp. 85-90. DOI: 10.18127/j20700814-202404-10 (in Russ.).

11. Antokhin E.A., Zalishchuk A.A., Nenashev V.A., Nenashev S.A. (2024) [Comparative Analysis of Neural Network Models for Classification of Ground Surface Areas from Optical Images]. *Radiotekhnika*, vol. 88, no. 8, pp. 35-44. DOI: 10.18127/j00338486-202408-04 (in Russ.).

12. Aivazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. (1989) [Applied Statistics: Classification and Dimensionality Reduction]. Moscow: Finansy i statistika Publishing, 607 p. (in Russ.).

13. Duda R., Hart P., Stork D. (2003) [Pattern Classification]. 2nd ed. Moscow: Tekhnosfera Publishing, 917 p. (in Russ.).

14. Kerbl B., Kopanas G., Leimkühler T., Drettakis G. (2023) 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *ACM Transactions on Graphics*, vol. 42, no. 4, pp. 1-14. DOI: 10.1145/3592433

15. Vystrchil M.G., Baltyzhakova T.I., Romanchikov A.Yu., Anikeeva A.A. (2024) [Algorithm for Extracting Ground Surface Points from Airborne Laser Scanning Data].

Geodeziya i kartografiya, no. 2, pp. 2-11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1004-2-2-11 (in Russ.).

16. Valkov V.A., Vinogradov K.P., Valkova E.O., Mustafin M.G. (2022) [Creation of Highly Informative Rasters Based on Laser Scanning and Aerial Photography Data]. *Geodeziya i kartografiya*, no. 11, pp. 40-49. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49 (in Russ.).

17. Kovyazin V.F., Pasko O.A., Lepikhina O.Yu., Trushnikov V.E. (2022) [Accuracy Assessment of Forest Land Inventory Using Airborne Laser Scanning]. *Geodeziya i kartografiya*, no. 6, pp. 54-63. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63 (in Russ.).

18. Isupov N.S., Fomin N.I. (2025) [Comparative Analysis of the Efficiency of Methods for Assessing Completed Construction Work Using a Point Cloud]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, vol. 15, no. 3, pp. 442-453. DOI: 10.21285/2227-2917-2025-3-442-453 (in Russ.).

19. Kellner M., Stahl B., Reiterer A. (2022) Fused Projection-Based Point Cloud Segmentation. *Sensors*, vol. 22, no. 3. Art. 1139. DOI: 10.3390/s22031139

Methodology for Quality Control of Airborne Laser Scanning Data Representation by a Mixture of Three-Dimensional Gaussian Components

T.A. Pisklenov, Post-graduate, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

V.A. Nenashev, DSc in Engineering, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

The purpose of the study is to develop a methodology for quality forming and control of a compact representation of airborne laser scanning data by a mixture of three-dimensional Gaussian components, coordinating accuracy and data-volume reduction. The relevance is determined by the increasing laser scanning density and by the need for operational control of extended natural and man-made objects under limited onboard memory and data-link capacity. The study represents local point-cloud fragments by oriented Gaussian components with parameters describing the center, dimensions, and anisotropy of the measured surface. The methodology includes input data control, transformation to a local coordinate system, adaptive spatial partitioning, estimation of means and full covariance matrices, and calculation of control spatial residuals. Cells with the largest residuals are re-subdivided with the following final control using the root-mean-square deviation, the 0.95 quantile, the proportion of points within the tolerance, and the data-reduction factor. The experiment was performed on 1,000,000 points from an open airborne laser scanning dataset. For 50,001 components, the root-mean-square distance to the local plane was 0.136 m, the 0.95 quantile was 0.245 m, 95.21% of the points satisfied the 0.25 m tolerance, and the data-volume reduction factor was 16.25. Compared with uniform partitioning, the root-mean-square deviation decreased by 31.6%. The purpose was achieved: it provides controlled data reduction and can be used for operational control of object condition.

Keywords: airborne laser scanning, quality control, point cloud, three-dimensional Gaussian component, covariance matrix, adaptive partitioning.

Получено 25.06.2026

Образец цитирования

Пискленов Т.А., Ненасhev В. А. Методика контроля качества представления данных бортового лазерного сканирования смесью трехмерных гауссовых компонент // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 3. С.83–90. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-83-90

For Citation

Pisklenov T.A., Nenashev V.A. (2026) [Methodology for Quality Control of Airborne Laser Scanning Data Representation by a Mixture of Three-Dimensional Gaussian Components]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 3, pp. 83-90. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-83-90 (in Russ.).