

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.373.8:77.026.34

Бунчук
Андрей Александрович

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени магистра

по специальности 1-40 80 01 Компьютерная инженерия. Хранение и
обработка данных

Научный руководитель
Шевяков Алексей Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
ООО «РИФТЭК»

Минск 2021

ВВЕДЕНИЕ

Лазерное триангуляционное сканирование (далее ЛТС) является одним из самых распространённых способов бесконтактных оптических измерений. Данный способ основан на проецировании на объект лазерной линии. Форма проекции лазерной линии регистрируется при помощи светочувствительного CMOS-сенсора. Детектируя положение лазерной линии в каждом столбце полученного изображения рассчитывается положение точки в пространстве. Таким образом формируется профиль объекта в месте проецирования лазерной линии.

Результатом ЛТС является набор точек, описывающих профиль в проецируемом сечении или облако точек для всего отсканированного объекта. Под достоверностью результатов ЛТС подразумевается соответствие полученных точек реальной геометрии объекта. Снижение достоверности происходит при появлении ложных точек или отсутствии истинных.

Предшественниками лазерных сканеров были координатные измерительные машины. Однако контактные головки координатных машин имеют ограничения и непригодны для сканирования многих хрупких объектов или тонко отполированных поверхностей. Лазерные сканеры не требуют физического контакта с поверхностью объекта и обеспечивают более высокую скорость сканирования. Однако применению лазеров для бесконтактных измерений сопутствуют оптические проблемы, вызываемые особенностями блестящих, полупрозрачных или прозрачных поверхностей.

Вследствие множественных переотражений лазерного излучения от поверхностей объекта, формируется изображение, на котором присутствует как истинная отраженная линия лазера, так и множество переотраженных. Поэтому при сканировании объектов с высокой отражательной способностью, возникает проблема определения действительного положения проецируемой лазерной линии на изображении светочувствительного сенсора сканера.

Традиционные методы выделения истинной лазерной линии основаны на измерении интенсивности пикселей полученного изображения. Однако во многих случаях применение критерия детектирования, основанного только на измерении значения интенсивности локального максимума, не позволяет надежно разделить истинную лазерную линию от переотраженных, что приводит к наличию ошибок и снижению достоверности в информации, получаемой от лазерных триангуляционных датчиков.

Одним из способов повышения достоверности является учёт дополнительных параметров отражённого лазерного излучения. Практические исследования показывают, что параметры поляризации отражённого лазерного излучения для истинной лазерной линии и переотражённой имеют различия.

Использование в качестве дополнительных параметров характеристик поляризации может служить основой для разработки новых способов, позволяющих надёжно детектировать истинную лазерную линию и тем самым повысить достоверность получаемых результатов.

Цель работы: исследовать способы повышения достоверности результатов лазерного триангуляционного сканирования и предложить новый способ.

Задачи:

- проанализировать современное состояние и выделить причины снижения достоверности результатов ЛТС;
- провести обзор существующих решений для повышения достоверности результатов ЛТС;
- выбрать направление повышения достоверности результатов ЛТС для исследования;
- разработать макет экспериментальной установки;
- провести экспериментальные исследования по выбранному направлению;
- привести практическое применение предлагаемого способа повышения достоверности;
- определить направления дальнейшего развития.

Объект исследования: лазерные триангуляционные датчики.

Предмет исследования: достоверность информации, получаемой от лазерных триангуляционных датчиков.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации заключается в необходимости повышения достоверности информации, получаемой от лазерных триангуляционных датчиков при сканировании объектов с высокой отражательной способностью.

Цель работы: исследовать способы повышения достоверности результатов лазерного триангуляционного сканирования и предложить новый способ.

Задачи:

- проанализировать современное состояние и выделить причины снижения достоверности результатов ЛТС;
- провести обзор существующих решений для повышения достоверности результатов ЛТС;
- выбрать направление повышения достоверности результатов ЛТС для исследования;
- разработать макет экспериментальной установки;
- провести экспериментальные исследования по выбранному направлению;
- привести практическое применение предлагаемого способа повышения достоверности;
- определить направления дальнейшего развития.

Объект исследования: лазерные триангуляционные датчики.

Предмет исследования: достоверность информации, получаемой от лазерных триангуляционных датчиков.

Лазерное триангуляционное сканирование широко применяется на производстве для контроля геометрических параметров производимых изделий. Широкое распространение обусловлено бесконтактным типом измерения и высокой скоростью работы. При этом область применения не ограничивается только промышленностью, но и распространяется на другие области, такие как искусство, медицина и т.д. В качестве примера, в искусстве применяется для создания трёхмерных моделей различных объектов для интерактивных музеев, а в медицине — для протезирования.

Применение лазеров в лазерных триангуляционных сканерах сопровождается рядом оптических проблем, в частности: переотражения лазерного излучения, спекл-шум, ограниченный динамический диапазон. Все эти проблемы снижают достоверность получаемых данных от лазерных сканеров. Для решения проблемы переотражений не существует на данный момент законченного решения, поэтому эта проблема остаётся открытой.

Общее повышение достоверности данных лазерного триангуляционного сканирования, в частности решение проблемы переотражений, расширяет область применения лазерных триангуляционных датчиков. Это позволит облегчить контроль объектов с блестящими поверхностями, что должно положительно отразиться на экономической составляющей производства.

Обзор литературных источников по теме исследований позволил выявить наиболее перспективное направление для дальнейших исследований — применение поляризации.

В теоретическом разделе были исследованы характеристики поляризации света. Приведена модель микроповерхностей, на основе которой рассматривается отражение лазерного излучения от поверхности объекта. Выполнен анализ поляризационных процессов при отражении от металлических поверхностей, на основании которого выведена характеристика относительного изменения интенсивности отражённого света, который до отражения был линейно поляризован в двух ортогональных направлениях.

Исходя из полученной теоретической характеристики предложена гипотеза исследования: **на двух изображениях, полученных при двух ортогональных направлениях линейной поляризации лазерного излучения, должны проявляться различия в интенсивности отражённого от анализируемых объектов света, и степень различия увеличивается с увеличением количества переотражений.**

В качестве способа повышения достоверности ЛТС предложено применение двух лазеров, излучение которых имеет линейную поляризацию в ортогональных направлениях, получение двух изображений и расчёт относительного изменения интенсивности.

В ходе выполнения магистерской диссертации разработана и изготовлена экспериментальная установка для проверки выдвинутой гипотезы. Проведены экспериментальные исследования и на основе полученных экспериментальных данных построена характеристика относительного изменения интенсивности для изображений с ортогональной поляризацией. Среднеквадратическое отклонение при измерении относительного изменения интенсивности не превысило 3%. Характеристика, полученная экспериментальным путём, соответствует теоретической, на основании чего сделан вывод о подтверждении выдвинутой гипотезы.

Практическая реализация предложенного способа включает 2 подхода к применению относительного изменения интенсивности, а также подход на основе смешивания изображений.

Первый подход предусматривает выделение истинной линии относительно переотражённых на основе данных о изменении интенсивности отражённого света в локальных максимумах яркости на изображениях с ортогональной

поляризацией. Выполнены экспериментальные исследования предложенного подхода. По результатам эксперимента среднее квадратическое отклонение измерения изменения интенсивности составило 1.381%. Сформулирован алгоритм действий, для достоверного выделения истинной линии.

Второй подход основан на формировании маски, которая позволяет ослабить интенсивность областей, имеющих переотражения лазерного излучения, и является упрощением первого подхода.

Дополнительно предложен подход смешивания двух изображений с ортогональной поляризацией для получения одного общего изображения, на котором лазерная линия имеет большую равномерность распределения интенсивности, что снижает влияние спекл-шума и приводит к повышению точности и достоверности. По результатам эксперимента в среднем пиксельный шум уменьшился в 1,7 раз.

Для предложенных подходов проанализированы факторы, которые оказывают влияние на отклонение результатов от теоретических.

Результаты практического применения предложенного способа подтверждают повышение достоверности результатов ЛТС за счёт анализа изменения интенсивности детектируемых пиков или за счёт снижения интенсивности областей изображения, содержащих переотражения, что в совокупности обеспечивает надёжное определение истинной линии.

Определены направления возможного развития применения предложенного способа, а именно: для классификации материалов, для улучшения систем трёхмерного сканирования, для обнаружения дефектов поверхностей.

Результатом работы над магистерской диссертацией являются способ повышения достоверности ЛТС, подходы к его практическому применению и результаты экспериментальных исследований. Повышение достоверности ЛТС расширяет область применения лазерных триангуляционных сканеров и повышает качество сканирования.

По теме исследования магистерской диссертации подготовлен доклад «Применение поляризации для повышения достоверности результатов лазерного триангуляционного сканирования» и опубликован в сборнике 57-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2021). Также подана статья «Повышение достоверности результатов лазерного триангуляционного сканирования» в Научный журнал «Доклады БГУИР» (Минск, БГУИР, 2021).

1 Обзор литературы

В разделе описаны причины, по которым снижается достоверность данных, полученных от лазерных триангуляционных датчиков, а также проанализированы уже предложенные способы в направлении их решения и степень их проработанности.

Основными причинами снижения достоверности являются: переотражения лазерного излучения поверхностями сканируемого объекта, спекл-шум и ограниченный динамический диапазон.

Переотражения лазерного излучения создают ситуацию, при которой в столбце изображения присутствует несколько пиков интенсивности, что затрудняет или делает невозможным достоверное детектирование истинной линии. Для снижения влияния данной проблемы в литературных источниках предложены: подход на основе аппроксимации полученного облака точек трёхмерными примитивами, подход с расчётом локальной плотности полученного облака точек. Также приведены подходы на основе изменения стандартной оптической схемы лазерной триангуляционной системы. Одним из таких вариантов является расположение двух камер напротив друг друга.

Одними из самых перспективных решений являются подходы на основе применения поляризации, так как они используют больший набор получаемых исходных данных об отражённом лазерном излучении. Практические исследования показывают, что параметры поляризации отражённого лазерного излучения для истинной лазерной линии и переотражённой имеют различия.

Спекл-шум возникает из-за шероховатости поверхности порядка длины волны падающего когерентного света. При этом лазерная линия выглядит не сплошной на изображении, а в ней присутствуют области с резким изменением интенсивности. Для решения данной проблемы в ряде работ предлагается применение комбинации алгоритмов цифровой обработки изображений.

Проблема ограниченного динамического диапазона проявляется при сканировании одновременно светлых и тёмных объектов. При недостаточной экспозиции тёмные объекты не детектируются, а при достаточной для тёмных — светлые переэкспонированы. В настоящее время данная проблема эффективно решается применением алгоритмов HDR или кусочно-линейным откликом матрицы.

На основании обзора литературных источников по теме исследования выявлено, что наибольший вклад в снижение достоверности результатов ЛТС вносит проблема переотражений. Использование дополнительных параметров, основанных на свойствах поляризации, может служить основой для разработки новых способов, позволяющих надёжно детектировать истинную лазерную линию и тем самым повысить достоверность получаемых результатов.

2 Теоретический раздел

В разделе приведены теоретические сведения о поляризации света, описаны характеристики поляризации и способы их получения.

Получение характеристик поляризации основано на построении синусоиды передаваемой яркости (TRS). Для получения TRS необходима серия кадров с различным углом поляризатора. Серия кадров может быть получена вращением поляризатора перед светочувствительным сенсором. Вращение может происходить механическим поворотом поляризационного фильтра, или может быть заменено поляризатором на основе жидких кристаллов. Также возможно наложение на светочувствительный сенсор сеток, каждая ячейка которой соответствует размеру пикселя светочувствительного сенсора и имеет своё направление поляризации. Ещё одним способом является применение специальных поляризационных матриц, в которых пиксельные фильтры уже интегрированы в сам сенсор, что обеспечивает улучшенные характеристики.

Проведён анализ поляризационных процессов при отражении света от металлической поверхности. В исследовании отражение лазерного излучения рассматривается в рамках модели микроповерхностей. В результате анализа, получена относительная характеристика изменения коэффициентов отражения излучения от поверхности.

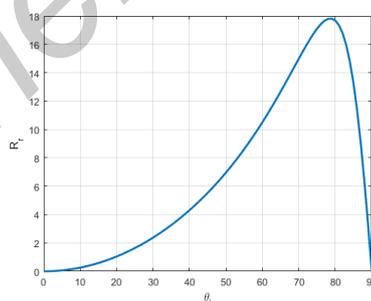


Рисунок 1 — Относительная характеристика изменения коэффициентов отражения

Исходя из полученной теоретической характеристики предложена гипотеза исследования: **на двух изображениях, полученных при двух ортогональных направлениях линейной поляризации лазерного излучения, должны проявляться различия в интенсивности отражённого от анализируемых объектов света, и степень различия увеличивается с увеличением количества переотражений.**

В качестве способа повышения достоверности ЛТС предложено применение двух лазеров, излучение которых имеет линейную поляризацию в ортогональных направлениях, получение двух изображений и расчёт относительного изменения интенсивности.

3 Экспериментальная проверка гипотезы исследования

Для проверки выдвинутой гипотезы была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Перед проведением испытаний была разработана методика калибровки, в соответствии с которой была выравнена мощность двух полупроводниковых лазеров.

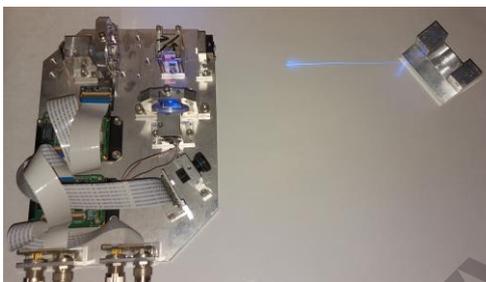


Рисунок 2 — Фото изготовленной экспериментальной установки

Экспериментальная установка позволяет проецировать на объект лазерную линию, поляризованную в двух ортогональных между собой направлениях. Получаемые пары изображений с ортогональной поляризацией (далее называются Р и S поляризации) будут использоваться для анализа. Составленный план эксперимента определил его методику и объём. В качестве экспериментального объекта для сканирования использована алюминиевая деталь, имеющая шлифованные поверхности.

В ходе проведения эксперимента, сформирован набор данных. Среднеквадратическое отклонение при измерении относительного изменения интенсивности не превысило 3%. По результатам обработки экспериментальных данных построена относительная характеристика изменения интенсивности, которая сопоставлена с теоретической.

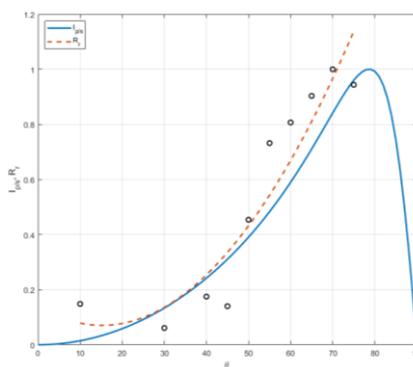


Рисунок 3 — Сопоставление теоретической характеристики и полученной в результате эксперимента

Соответствие теоретической характеристики, и полученной экспериментальным путём, свидетельствует о подтверждении выдвигаемой гипотезы, а также, что предложенный способ целесообразно применять для решения практических задач.,

4 Практический раздел

Для предложенного способа на основе формирования двух изображений с разной ортогональной поляризацией разработан ряд подходов.

Предложен подход фильтрации переотражений лазерного излучения путём анализа изменения интенсивности в детектируемых пиках. Исходя из сформулированной и подтверждённой гипотезы следует, что для первого отражения, которое присуще истинной линии, будет наблюдаться минимальное изменение интенсивности, а для переотражений — изменение интенсивности будет больше.

Для фильтрации переотражений может быть использован разработанный алгоритм на основе предложенного способа. Алгоритм подразумевает регистрацию двух изображений с P и S поляризацией, детектирование всех возможных пиков, расчёт относительного изменения интенсивности в соответствующих парах пиков и принятие решения об истинности линии на основе значений изменения интенсивности в пиках.

Также одним из применений предлагаемого способа предложено построение маски, на основании которой производится фильтрация на изображении областей с переотражениями. Маска строится на основании разности интенсивности пикселей для изображения P и S поляризаций.

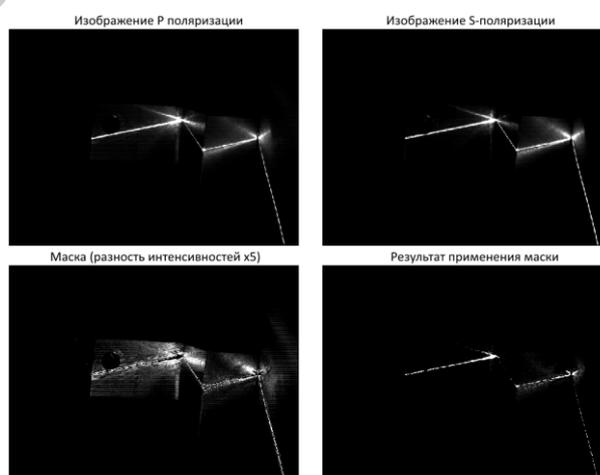


Рисунок 4 — Пример построенной маски и отфильтрованного изображения

После проведения фильтрации данной маской профиль может быть детектирован стандартными алгоритмами детектирования пиков. При этом влияние переотражений на достоверность снижается, за счёт уменьшения интенсивности сигнала в областях с переотражениями.

Дополнительно предложен подход, использующий свойство различных интерференционных картин для разных лазеров, что создаёт различную картину зернистости спекл-шума. Таким образом, полезным свойством предлагаемого способа является уменьшение спекл-шума путём смешения двух изображений Р и S поляризаций. На рисунке 5 представлен пример, при котором каждый пиксель изображения является средним арифметическим из двух изображений с разной поляризацией.

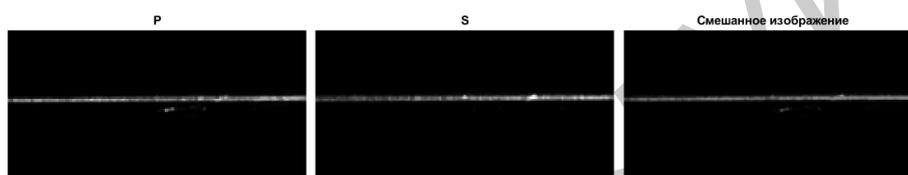


Рисунок 5 — Применение изображений Р и S поляризаций для подавления спекл-шума

По результатам эксперимента в среднем пиксельный шум уменьшился в 1,7 раз.

Для предложенных подходов проанализированы факторы, которые оказывают влияние на отклонение результатов от теоретических. Важна точность совмещения лазерных линий от двух лазеров, а также точность выравнивания их мощностей. Дополнительно рекомендуется минимизировать смещение объекта, для исключения изменения параметров отражённого света в процессе экспонирования.

Полученные в ходе практического применения предложенного способа практические результаты подтвердили повышение достоверности результатов ЛТС за счет анализа изменения интенсивности детектируемых пиков или снижения интенсивности областей изображения с переотражениями, что обеспечивает надёжное определение истинной линии.

5 Направления дальнейшего развития

Предложенный способ может быть улучшен применением специальных поляризационных светочувствительных сенсоров. Это позволит регистрировать дополнительно изменение фазы в отражённом излучении, что позволит получить

нормаль в точке и построить картину падения лучей, повысив точность оценки положения истинной и переотражённых линий.

Так же предложенный способ может получить развитие и найти применение для решения других задач, таких как классификация материалов, детектирование царапин на поверхностях, а также улучшить качество трёхмерного сканирования.

В задаче классификации материалов возможно определение металла, на основании того, что каждый металл имеет свой комплексный коэффициент преломления, от которого зависит применяемая в предложенном способе характеристика относительного изменения интенсивности. В случае, если комплексные показатели преломления различаются на достаточном для регистрации светочувствительным сенсором уровне, то эти материалы могут быть различимы при помощи предлагаемого в работе способа. Также на основе различий характеристик коэффициентов отражения для проводников и диэлектриков возможна классификация в категории «проводник/диэлектрик».

В области трёхмерного сканирования, в частности для систем на структурированном свете, при помощи предложенного способа возможно повышение качества триангулируемой поверхности. При применении специальных поляризационных сенсоров, возможно получение параметров поляризации, на основе которых возможно восстановление нормали к поверхности. Это может повысить точность детектирования точек и добавить ориентацию микроповерхности в точке, что является важной характеристикой при получении триангулированной поверхности из облака точек.

Также предложенный способ пригоден для выполнения контроля царапин на поверхностях объектов. В местах царапин линейная поляризация искажается больше. Если построить изображение, в котором интенсивность будет определяться изменением поляризации между изображениями P и S поляризаций, то изменение поляризации в местах царапин создадут большой контраст. Более контрастное изображение увеличивает точность детектирования царапин на поверхности.

Приведённые примеры применения предложенного способа и его элементов свидетельствуют об актуальности исследования поляризации и её свойств для применения в различных областях промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования по теме магистерской диссертации поставленная цель была достигнута: исследованы способы повышения достоверности результатов лазерного триангуляционного сканирования и предложен новый способ повышения достоверности.

В качестве способа повышения достоверности ЛТС предложено применение двух лазеров, излучение которых имеет линейную поляризацию в ортогональных направлениях, получение двух изображений и расчёт относительного изменения интенсивности.

При выполнении исследования выполнены все поставленные задачи:

- проанализировано современное состояние и выделены причины снижения достоверности результатов ЛТС;
- проведён обзор существующих решений для повышения достоверности результатов ЛТС;
- выбрано направление повышения достоверности результатов ЛТС для исследования;
- разработан и изготовлен макет экспериментальной установки;
- проведены экспериментальные исследования по выбранному направлению исследования;
- приведены практические применения предлагаемого способа повышения достоверности;
- определены направления дальнейшего развития.

В результате анализа причин снижения достоверности, выявлено, что наиболее распространёнными причинами являются переотражения лазерного излучения от блестящих поверхностей сканируемого объекта, спекл-шум и ограниченный динамический диапазон. Проблема переотражений не имеет законченного решения и является открытой.

Обзор литературных источников по теме исследований позволил выявить наиболее перспективное направление для дальнейших исследований — применение поляризации.

В теоретическом разделе были исследованы характеристики поляризации света. Выполнен анализ поляризационных процессов при отражении от металлических поверхностей, на основании которого выведена характеристика относительного изменения интенсивности отражённого света, который до отражения был линейно поляризован в двух ортогональных направлениях.

Исходя из полученной теоретической характеристики предложена гипотеза исследования: **на двух изображениях, полученных при двух ортогональных направлениях линейной поляризации лазерного излучения, должны проявляться различия в интенсивности отражённого от анализируемых объектов света, и степень различия увеличивается с увеличением количества переотражений.**

В ходе выполнения магистерской диссертации разработана и изготовлена экспериментальная установка для проверки выдвинутой гипотезы. На основе полученных экспериментальных данных построена характеристика относительного изменения интенсивности для изображений с ортогональной поляризацией. Среднеквадратическое отклонение при измерении относительного изменения интенсивности не превысило 3%. Характеристика, полученная экспериментальным путём соответствует теоретической, на основании чего сделан вывод о подтверждении выдвинутой гипотезы.

Практическая реализация предложенного способа включает 2 подхода к применению относительного изменения интенсивности, а также подход на основе смешивания изображений. Первый подход предусматривает выделение истинной линии относительно переотражённых на основе данных о изменении интенсивности отражённого света в локальных максимумах яркости на изображениях с ортогональной поляризацией. Выполнены экспериментальные исследования предложенного подхода. По результатам эксперимента среднеквадратическое отклонение измерения изменения интенсивности составило 1.381%. Сформулирован алгоритм действий, для достоверного выделения истинной линии. Второй подход основан на формировании маски, которая позволяет ослабить интенсивность областей, имеющих переотражения лазерного излучения, и является упрощением первого подхода.

Дополнительно предложен подход смешивания двух изображений с ортогональной поляризацией для получения одного общего изображения, на котором лазерная линия имеет бóльшую равномерность распределения интенсивности, что снижает влияние спекл-шума и приводит к повышению точности и достоверности. По результатам эксперимента в среднем пиксельный шум уменьшился в 1,7 раз.

Для предложенных подходов проанализированы факторы, которые оказывают влияние на отклонение результатов от теоретических.

Полученные в ходе практического применения предложенного способа практические результаты подтвердили повышение достоверности результатов ЛТС за счет анализа изменения интенсивности детектируемых пиков или снижения интенсивности областей изображения с переотражениями, что обеспечивает надёжное определение истинной линии.

Определены направления возможного развития применения предложенного способа, а именно: для классификации материалов, для улучшения систем трёхмерного сканирования, для обнаружения дефектов поверхностей.

Результатом работы над магистерской диссертацией являются способ повышения достоверности ЛТС, подходы к его практическому применению и результаты экспериментальных исследований. Повышение достоверности ЛТС расширяет область применения лазерных триангуляционных сканеров и повышает качество сканирования.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

№ п/п	Название	Печатн. или рукописн.	Изд-во, журн. (название, №, год) или № авторского свидетельства	Кол-во печатных листов или стр.	Фамилии соавторов
1	2	3	4	5	6
1	«Применение поляризации для повышения достоверности результатов лазерного триангуляционного сканирования»	Печатн.	Сборник докладов 57-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, 2021	2	А.В Шевяков
2	Повышение достоверности результатов лазерного триангуляционного сканирования (подана статья)	Печатн.	Научный журнал «Доклады БГУИР», 2021	12	А.В Шевяков