

На правах рукописи



Староверов Сергей Вячеславович

Разработка компактных средств геодезической метрологии  
для оперативной поверки и исследований нивелиров и тахеометров

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре геодезии.

Научный руководитель: **Ямбаев Харьес Каюмович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Буюкян Сурен Петросович**  
доктор технических наук, Государственный специализированный проектный институт (АО «ГСПИ»), главный специалист  
**Плотников Александр Васильевич**  
кандидат технических наук, ФГБУ Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации, начальник отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский переулок, дом 4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК): <http://www.miigaik.ru/science/councils/dissertation/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Вшивкова Ольга Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** При проведении исследований и поверок электронных тахеометров (ЭТ), цифровых нивелиров (ЦН) и других геодезических средств измерений (ГСИ) должны выполняться обязательные операции в полевых условиях, регламентированные соответствующими Инструкциями по конкретному виду топографо-геодезических работ.

Но процесс полевых поверок ГСИ в соответствии с действующими Инструкциями, занимает значительное время, неудобен, особенно в условиях строительных площадок, в стесненных условиях городов, снижает производительность труда и надежность поверочных работ. Поэтому актуальной является задача разработки и исследований оперативных компактных поверочных установок, стендов и компараторов на основе современного состояния оптики, цифровых технологий и т.п., позволяющих упростить и ускорить процедуру выполнения контрольных измерений, а так же произвести тщательную юстировку ГСИ при обнаружении отклонения их технических и метрологических характеристик от заданных нормативных требований обеспечения единства и достоверности результатов геодезических измерений.

**Степень разработанности темы.** В течение многих десятилетий, особенно начиная с 50-х годов прошлого столетия, разработаны различные, ставшие уже традиционными геодезические методы и средства технологических и метрологических поверок и исследований ГСИ: стационарные оптико-механические и интерференционные компараторы (МИИГАиК, ЦНИИГАиК, ВНИИФТРИ, ИФВЭ и др.), компактные установки типа УК-1, АУПНТ, ВЕГА-УКС и т.п.

На практике широкое применение нашли коллиматорные средства поверок геодезических инструментов. Например, в ЦНИИГАиК разработана целая серия таких коллиматорных стендов.

При разработке и исследовании поверочных установок – стендов, используют разнообразные эталоны, в том числе образцовые средства измерений, каковыми являются аттестованные ГСИ аналогичного назначения с точностью измерений в  $2\div 4$  раза выше исследуемого (рабочего) геодезического инструмента.

Упомянутые методы и средства геодезической метрологии позволяли практически до настоящего времени осуществлять технологические и метрологические поверки ГСИ. Этому способствовали разработки и исследования

таких известных ученых, как Ф.Н. Красовский, Ф. Деймлих, С.В. Елисеев, В.С. Плотников, Н.Н. Воронков, А.И. Спиридонов, А.И. Захаров, М.В. Кузьмин, Д.А. Аникст, В.С. Усов, М.М. Корсунская, Х.К. Ямбаев, А.М. Жилкин и многие другие.

Однако известные методы поверок на стационарных компараторах и даже компактных поверочных установках являются трудоемкими, не оперативными и аналоговыми. Требуется не только их модернизация, но и разработка новых, основанных на цифровых технологиях, автоматизированных средств и методик поверочных работ в геодезии.

**Цели и задачи исследований.** В рамках общей цели – разработки компактных средств геодезической метрологии для поверки и исследования нивелиров и электронных тахеометров, по результатам анализа степени разработанности темы и на основе синтеза свойств оптических дальномеров, коллиматоров, фотоэлектрических сенсоров, образцовых ГСИ и специального программного обеспечения сформулированы следующие задачи:

- разработать стенд и методику оперативной поверки оптических и цифровых нивелиров;

- разработать и создать многоколлиматорный угломерный стенд на базе серийной автоколлимационной установки поверки нивелиров и теодолитов (АУПНТ);

- разработать методику и провести исследования основных инструментальных погрешностей цифровых нивелиров и электронных тахеометров ведущих фирм-производителей на разработанных стендах;

- разработать методику и провести сравнительные исследования ЦН и ЭТ на созданных автором компактных полевых компараторах.

**Объектом исследований** является организация и выполнение поверочных работ в геодезии.

**Предмет исследований** – оперативные методы и средства технологических и метрологических поверок и исследований геодезических инструментов.

**Научная новизна диссертации** заключается в следующем:

- Доказано, что синтез свойств оптических дальномеров, коллиматоров, многоэлементных фотоэлектрических преобразователей типа ПЗС и КМОП-матриц, образцовых ГСИ в качестве эталона и специального программного обеспечения

(СПО), позволяет создавать компактные, оперативные методы и средства геодезической метрологии.

- Взятая за основу идея принятия за эталон постоянства параллактического угла  $\varphi = 34,38' = 2062,65''$  и расстояния между нитями  $l = 2,0$  мм нитяных дальномеров позволила определять угловую и линейную дискретность одного пикселя ПЗС-матриц и, следовательно, при создании поверочных стендов подбирать их оптимальную разрешающую способность в мегапикселях (Мп).

- По результатам исследований на стенде поверки нивелиров (СПН) угловой размер пикселя использованного восьми мегапиксельного ПЗС-преобразователя составил  $0,996''$ , т.е.  $1,0''$ , а линейный –  $4,0$  мкм, что позволяет использовать такую ПЗС-матрицу в качестве образцовой двумерной метрической шкалы.

- Сравнительные исследования на созданных компактных полевых компараторах цифровых нивелиров и электронных тахеометров показали их взаимозаменяемость для нивелирования III и даже II классов.

- На основе анализа и интерпретации результатов исследований электронных тахеометров ведущих фирм-изготовителей на разработанном и изготовленном опытном образце многоколлиматорного угломерного стенда (МКС) доказана целесообразность исследования величины углового элемента эксцентриситета алидады ЭТ по всему кругу, позволяющая увеличить точность угловых измерений путем введения соответствующих поправок в измеренные направления, что особенно важно при выполнении измерений при одном положении вертикального круга.

### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Методология диссертационного исследования базируется на эмпирических методах научного познания. Методы, применяемые в работе, – аналитический, системный анализ, лабораторный эксперимент, моделирование, сравнение, измерение.

**Теоретическая значимость** заключается в обосновании целесообразности использования в средствах геодезической метрологии ПЗС-матриц, которые расширяют область их применения при проведении поверок, исследований и юстировок ГСИ.

**Практическая значимость работы** заключается в оптимизации процесса поверочных работ. Предложенные технические и технологические решения

позволяют создавать полностью автоматизированные компактные средства геодезической метрологии для оперативной поверки и исследований ГСИ.

**На защиту выносятся следующие новые научные положения и результаты:**

- Новый подход к разработке компактных оперативных методов и средств геодезической метрологии, основанный на синтезе свойств оптических дальномеров, коллиматоров, многоэлементных фотоэлектрических преобразователей типа ПЗС и КМОП-матриц, образцовых ГСИ в качестве эталона и специального программного обеспечения (СПО).
- Экспериментально доказанная возможность использования ПЗС-матрицы в качестве образцовой двумерной шкалы и определение угловой и линейной дискретности одного пикселя на основе постоянства параллактического угла нитяного дальномера и расстояния между нитями образцового ГСИ при создании поверочных стендов.
- Разработанные технологические решения, экспериментальные и натурные исследования разработанного на этой основе стенда СПН, обеспечивающие достаточную точность (средняя квадратическая погрешность (СКП) – 1,2") и оперативность исследования инструментальных погрешностей и поверки главного условия оптических и цифровых нивелиров.
- СПО, автоматизирующее процесс измерений при поверке нивелиров вплоть до выдачи итогового протокола.
- Разработанная методика исследования электронных тахеометров на реализованном многоколлиматорном стенде, позволяющая определять остаточное влияние эксцентриситета алидады горизонтального круга электронных тахеометров и повышающая точность угловых измерений путем введения поправок в направления.
- Выполненные на разработанных компактных полевых компараторах исследования, доказывающие достаточную точность и надёжность измерения превышения тригонометрическим нивелированием электронным тахеометром.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Основные положения диссертации соответствуют пункту п.13 научной специальности ВАК 25.00.32-Геодезия:

«п.13. Геодезическая метрология. Разработка методов, средств и нормативных документов для метрологического обеспечения геодезических средств измерений. Создание и функционирование эталонных геодезических полигонов, базисов и компараторов для поверки, калибровки и аттестации геодезических средств измерений».

**Достоверность полученных результатов** подтверждается аналитическими расчётами, сравнением паспортных характеристик ГСИ с экспериментально полученными результатами исследований, воспроизводимостью полученных результатов для различных марок и моделей ГСИ и результатами апробации при выполнении периодических поверок парка ГСИ.

**Апробация полученных результатов.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на 68-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, 2013г.; 69-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, посвященной 235-летию основания МИИГАиК, 2014г.; 70-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, 2015г., 71-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, 2016г.; Международной научно-технической конференции «Геодезия, Картография, Кадастр, ГИС-проблемы и перспективы развития», Новополюцк, 9-10 июня 2016 г., XIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017», 2017 г.

**Публикации по теме диссертации.** Основные положения и результаты исследований представлены в 5 научных статьях, в их числе 2 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.32 – Геодезия.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена общая характеристика диссертации, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная и практическая ценность выполненных разработок и исследований, результаты анализа степени проработанности темы, достоверность и апробация результатов исследований.

**В первом разделе** рассмотрены общие положения и основы геодезической метрологии – технологической и метрологической поверки и исследований инструментальных погрешностей ЦН и ЭТ. Представлена разработанная классификация методов и средств геодезической метрологии. Показано, что ту часть геодезии, которая занимается рассмотрением комплекса научных, организационных, технических, нормативных и методических вопросов, необходимых для обеспечения единства и точности измерений, логично обозначить понятием *«геодезическая метрология»*. Важнейшим составным элементами этого понятия являются: геодезическое средство измерений (ГСИ), погрешность геодезических измерений, точность геодезических измерений (в метрологии встречаются понятия «неопределенность результатов измерений»).

Таким образом, можно заключить, что обоснованное в работах главного метролога Роскартографии Спиридонова А.И. и профессора МИИГАиК Ямбаева Х.К. содержание понятия *«геодезическая метрология»* базируется на системе взаимоувязанных требований, суть которых проистекает из необходимости обеспечения точности и достоверности результатов геодезических измерений.

Термин и понятие *«геодезическая метрология»* введены в паспорт научной специальности 25.00.32-Геодезия (п.13).

На основе имеющихся публикаций проведена следующая классификация средств геодезической метрологии:

- Стационарные оптико-механические и интерференционные компараторы (МИИГАиК, ЦНИИГАиК, ВНИИФТРИ, ИФВЭ, ЕрФИ и др.),
- Компактные коллиматорные установки типа УК-1, АУПНТ, ВЕГА-УКС и т.п.
- Универсальные метрологические комплексы;
- Специальные стенды и установки для геодезической метрологии.

На практике широкое применение нашли коллиматорные методы поверок геодезических инструментов. Например, в ЦНИИГАиК разработана целая серия таких коллиматорных стендов.

*Особенности конструкций, исследований и поверок цифровых нивелиров.*

Общее устройство цифровых нивелиров разных фирм-изготовителей похоже, различия нивелирных систем в основном заключается в системах кодирования и, соответственно, в устройстве блока распознавания кодов.



В работе показано, что *основными источниками погрешностей цифрового нивелирования являются*: сильный ветер, окружающая температура, рефракция и мерцание изображения, освещение, закрытие участка изображения рейки, наклоны и повороты рейки, масштаб рейки, погрешность, возникающая при несовпадении пятки рейки с началом отсчёта нанесённого штрих-кода.

Все цифровые нивелиры, которые существуют на рынке, являются компенсаторными нивелирами. Следовательно, все источники ошибок, которые вызываются компенсатором, например, горизонтальный наклон, гистерезис и т.д., действуют также и на цифровые нивелиры.

*Конструктивные особенности и анализ инструментальных источников погрешностей электронных тахеометров.*

Несмотря на различия в принципах действия, большинство оптико-электронных датчиков направления геодезических приборов имеют абсолютную систему отсчитывания. В кодовых отсчетных системах, по аналогии с оптическими, измеряемое значение считывается непосредственно с лимба. Кодовые системы имеют электронные теодолиты и тахеометры. Отсчетная система таких приборов состоит из неподвижного лимба, на котором нанесен код, светодиода и оптической системы, формирующей изображение делений круга на многоэлементной ПЗС-матрице.

Рассмотренные в работе конструктивные особенности ЭТ и результаты ранее выполненных предварительных исследований доказывают необходимость разработки эргономичных компактных установок, стендов и других средств геодезической метрологии для надёжного определения таких инструментальных погрешностей как эксцентриситет алидады, основная метрологическая погрешность ЭТ – СКП измерения горизонтального угла одним полным приёмом, случайная и систематическая погрешности жидкостного компенсатора наклона, а также СКП измерения превышения тригонометрическим способом.

**Во втором разделе** приведены теоретические и научно-технические основы разработанных оперативных методов и средств геодезической метрологии.

*Постоянство параллактических углов оптического дальномера и его использование.*

Из теории нитяного дальномера (рис. 1.) известно, что при геометрическом нивелировании горизонтальное расстояние  $S$  до рейки определяется по формуле:

$$S = S' + f_o \sigma + d = \frac{1}{2} ctg \frac{\varphi}{2} + f_o \sigma + d. \quad (1)$$

Обозначив  $\frac{1}{2} ctg \frac{\varphi}{2} = C$ , получим

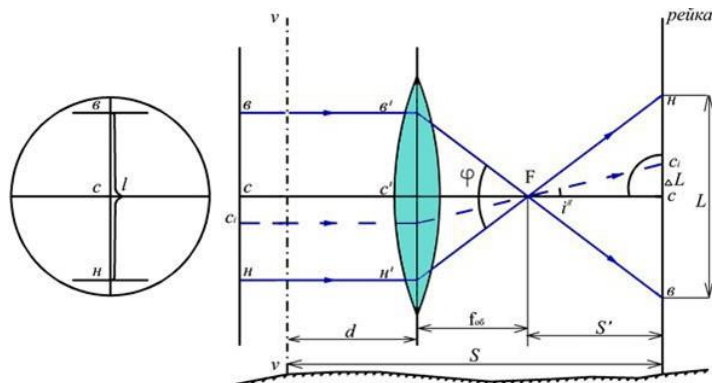


Рис. 1. К теории нитяного дальномера

что, при коэффициенте дальномера 100, параллактический угол  $\varphi = 34,38' = 2062,65''$ , при этом расстояние между нитями  $l = 2,0$  м. Определив расстояние  $L$  и линейную величину  $\Delta L$  отклонения оси визирования от оси эталона (от горизонтального положения) по

изображению, полученному с ПЗС-матрицы камеры можно утверждать, что:

$$i = \frac{\varphi}{L} \cdot \Delta L,$$

где  $L$  – расстояние между дальномерными нитями эталонного нивелира в пикселях,  $\Delta L$  – расстояние между перекрестиями сеток нитей эталонного и поверяемого нивелиров в пикселях.

Принцип определения угла  $i$  по снимку основывается на том, что во всех нивелирах коэффициент дальномерных нитей  $C=100$ , что соответствует параллактическому углу  $\varphi = 34,38' = 2062,65''$ , а угол  $\varphi$ , в свою очередь, соответствует  $N$  пикселям на снимке.

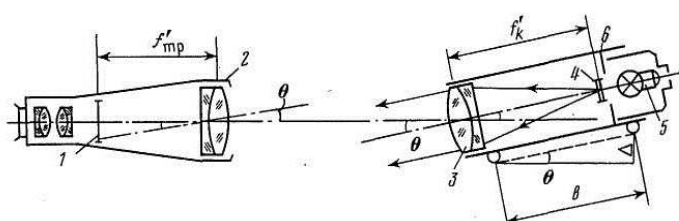


Рис. 2. Схема коллиматорного метода.

- 1 – фокальная плоскость; 2 – зрительная труба;
- 3 – объектив; 4 – марка (тест-объект); 5 – осветитель; 6 – коллиматор.

### Свойства коллиматоров.

Коллиматор (рис. 2) состоит из осветителя, тест-шкалы и длиннофокусного объектива. Коллиматор используют для имитации бесконечно удаленных предметов, например, звезд. Кроме того, его

применяют при контроле и юстировке оптических и оптико-электронных приборов. На выходе коллиматора получается параллельный пучок лучей. Любое угловое отклонение оси коллиматора от линии визирования вызывает смещение изображения цели в плоскости сетки нитей зрительной трубы. Точность

коллиматорного метода в основном зависит от погрешности измерения окулярным или оптическим микрометром смещения изображения сетки коллиматора.

По опыту применения коллиматорного метода средняя квадратическая погрешность измерения угла отклонения  $m_\theta$  из одного приема составляет  $0,5''$ .

Автоколлимация параллельных пучков позволяет вдвое повысить чувствительность по сравнению с коллиматорным методом.

#### *Свойства ПЗС преобразователей.*

Отметим, что ПЗС (CCD) приёмник – это аналоговая интегральная

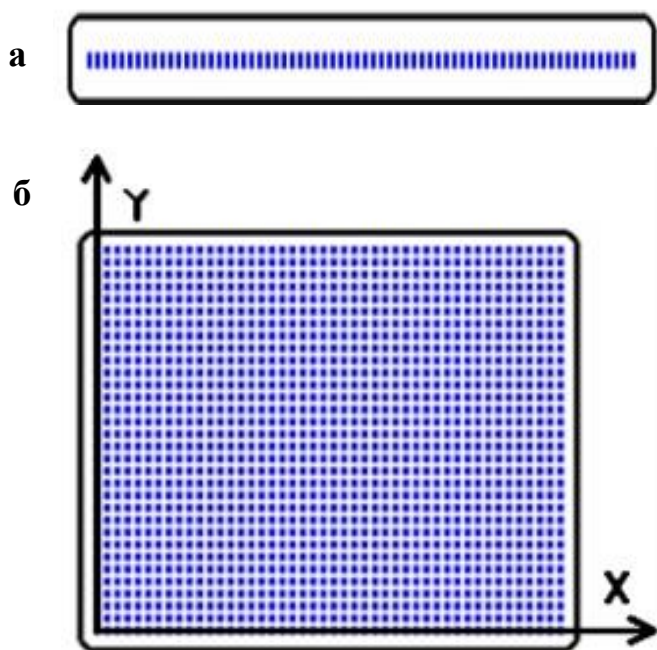


Рис. 3. Расположение светоприёмных элементов.

а – ПЗС-линейка, б – ПЗС-матрица.

микросхема, в состав которой входят светочувствительные фотодиоды на основе кремния или оксида олова. Таких светочувствительных кремниевых площадок – пикселей ПЗС очень много, от нескольких тысяч до нескольких миллионов. Пиксели могут быть уложены в один непрерывный ряд – *ПЗС-линейка* (рис. 3 а) или одинаковыми рядами и столбцами заполнять участок поверхности правильной формы, как правило, в виде прямоугольника или квадрата – *ПЗС-матрица* (рис. 3 б).

Важнейшим для разработки и создания

геодезических СИ и метрологических СИ, является то, что *ПЗС-матрица представляет собой уникальное фотоэлектронное устройство, которое одновременно формирует необходимый информационный сигнал и является измерительной шкалой*, что позволяет зарегистрировать изображение того или иного предмета в цифровом виде, определять координаты  $x_i$  и  $y_i$  точек изображения. Для геодезии и метрологии важно, чтобы конечный результат был получен в принятой международной системе единиц SI – особенно для измерения длин, углов и превышений.

При определении линейных размеров предметов, расстояний между характерными точками необходимо знать точный размер светочувствительной площадки каждого пикселя, расстояний между ними и стабильности положения

пикселя внутри их совокупности в конкретной ПЗС-матрице. Основная погрешность измерения линейных размеров на базе ПЗС-матриц – точность позиционирования изображений на приёмной поверхности матрицы, зависящая от размера  $P_{x,y}$  «приёмного окна» – пикселя. Размер пикселя и определяет дискретность отсчёта.

Для оперативного определения линейных и угловых параметров тех или иных измеряемых величин по результатам позиционирования изображения исследуемых объектов на ПЗС-матрице предлагается использовать некоторую эталонную субстанцию, рассматриваемую одновременно и в тех же условиях, что и исследуемый объект на одной и той же ПЗС-матрице.

Например, большинство ГСИ – оптические и цифровые нивелиры, оптические и электронные теодолиты и тахеометры формируют изображение визирных целей с помощью визирных зрительных труб с оптическим нитяным дальномером. Такой нитяной дальномер, относится к оптическим дальномерам с постоянным параллактическим углом  $\varphi$  и постоянным коэффициентом  $K=100\pm 0,1\%$ , что соответствует параллактическому углу  $\varphi = \frac{\rho''}{K} = 2062,65''$ .

В большинстве зрительных труб линейное расстояние между дальномерными нитями составляет  $l = 2,0\text{мм}$  и нанесены они с относительной погрешностью  $0,1\%$ , т.е. с СКП  $M_l = \frac{2,0\text{мм}}{1000} = 2\text{мкм}$ .

Этот факт и служит предпосылкой для определения линейных и угловых размеров по одновременному изображению предмета исследований и сетки нитей зрительной трубы, формирующей изображения на светочувствительной поверхности ПЗС-матрицы.

**В третьем разделе** рассмотрены результаты выполненных разработок и исследований стенда СПН и полевых компараторов для технологической и метрологической поверки оптических и цифровых нивелиров.

На кафедре геодезии МИИГАиК автором разработан стенд СПН (рис. 4) для автоматизированной поверки главного условия оптических и цифровых нивелиров. Стенд позволяет оперативно определить основные метрологические характеристики оптических и цифровых нивелиров, а так же оснащен системой визуализации результата определения и при необходимости исправления угла «i» (угла отклонения визирной оси нивелира от горизонтального положения) в режиме реального времени.

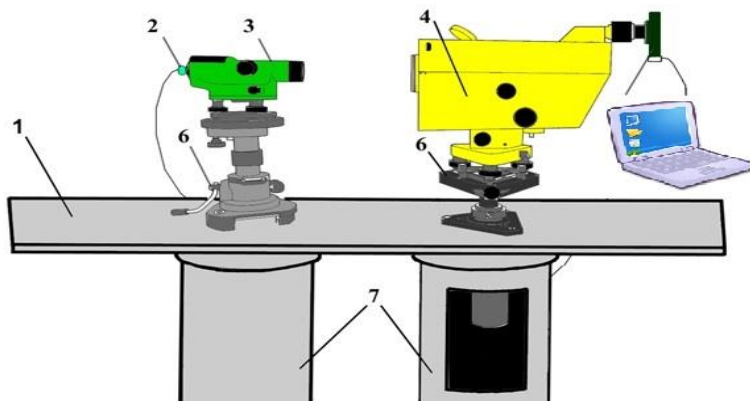


Рис. 4. Общий вид станда для поверки нивелиров СПН.

Принцип работы станда для поверки нивелиров (рис. 4) заключается в следующем. Осветительное устройство, закреплённое на окуляре поверяемого нивелира (1), освещает его сетку нитей (2). Изображение сетки нитей испытываемого нивелира,

объективом (3) поверяемого прибора и объективом эталонного нивелира (4) проецируется на сетку нитей последнего (5). Проекция двух сеток нитей, наложенные друг на друга, объективом (6) веб-камеры направляются на ПЗС-матрицу цифровой камеры (7). Видеосигнал с цифровой камеры поступает в компьютер (6) см. рис. 4, где производится обработка полученного изображения и вычисляется искомый угол  $i''$ .

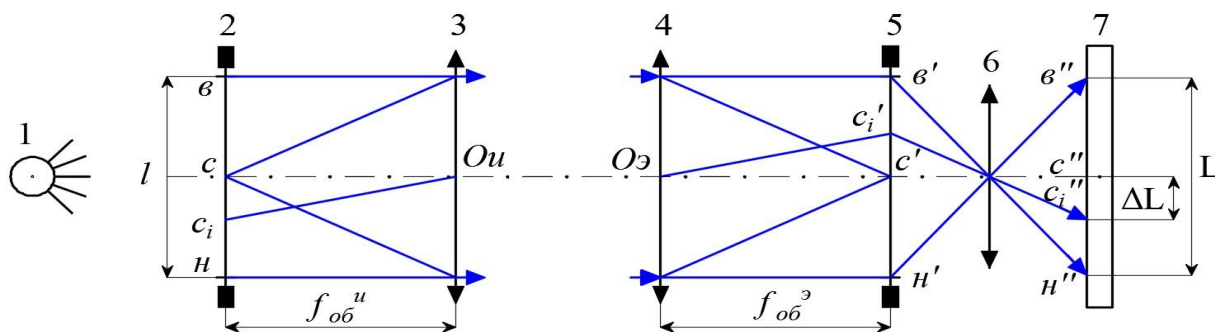


Рис. 5. Оптическая схема станда СПН.

В качестве эталона используется оптический высокоточный нивелир с компенсатором Ni002 фирмы Carl Zeiss (позиция 4 рис. 4). Средняя квадратическая погрешность на 1 км двойного хода для Ni 002 не более 0,5 мм, СКП работы компенсатора составляет 0,2". Цифровая камера, используемая на станде, имеет разрешение 7 Мрх (3500X2000 пикселей). Принцип действия оптического дальномера с  $\varphi = \text{const}$  см. на рис. 1.

Определение угла  $i$  по снимку основывается на том, что во всех нивелирах коэффициент дальномерных нитей равен  $C=100$ , что соответствует паралактическому углу  $\varphi = 34,38' = 2062,65''$ , а угол  $\varphi$ , в свою очередь, соответствует  $N$  пикселям на снимке.

Основываясь на вышесказанном можно утверждать, что:

$$i = \frac{\varphi}{N} \cdot \Delta N,$$

где  $N$  – расстояние между дальномерными нитями эталонного нивелира в пикселях,  $\Delta N$  – расстояние между перекрестиями сеток нитей эталонного и поверяемого нивелиров в пикселях.

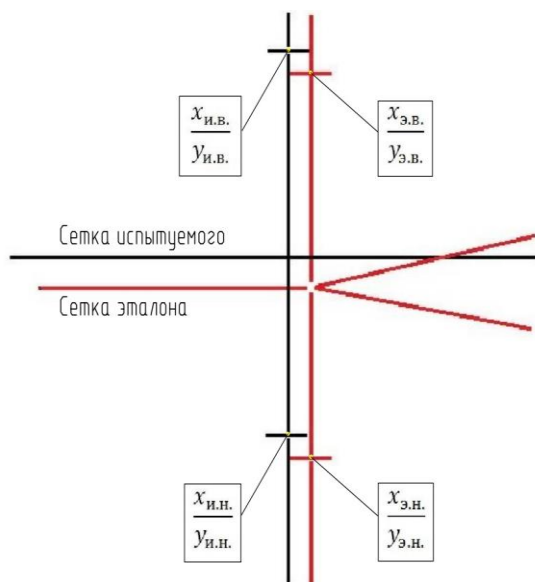


Рис. 6. Изображение сеток нитей эталона и испытываемого прибора нивелиров.

Алгоритм разработанной методики измерений на стенде СПН для поверки оптических и цифровых нивелиров с использованием ПЗС-матрицы заключается в следующей последовательности:

*Получение изображения с ПЗС-матрицы → Ввод точек дальномерных нитей → Вычисление координат указанных оператором точек → Вычисление расстояний в пикселях между дальномерными нитями эталонного и поверяемого нивелиров → Преобразование расстояний из пикселей в секунды дуги → Вывод результатов поверки*

*на экран → Формирование протокола поверки.*

При этом предоставляется возможность автоматического определения угла  $i''$  с последующим вычислением и выводом на печать протокола поверки нивелира. Отметим, что на стенде СПН возможно исследование диапазона работы, случайной и систематической погрешностей компенсации, перекоса сетки нитей и т.п.

Программа СПН написана на языке программирования Delphi. Она представляет собой окно, в котором производятся измерения по видеокадру.

Выполненные на усовершенствованном стенде СПН с использованием экзаменатора экспериментальные исследования показали, что средняя квадратическая погрешность измерения угла  $i$  нивелиров на данном стенде не превышает  $1,22''$ , а время, затрачиваемое на поверку с последующей юстировкой угла  $i$  до дискретности одного пикселя для использованной на разработанном СПН камеры с разрешением 7 Мрх, составляет 1-2 мин.

В таблице 1 представлены итоговые результаты исследования дискретности  $\lambda''$  одного пикселя в угловой мере для использованной на разработанном СПН видео камеры с разрешением 7 Мрх:

Таблица 1. Оценка дискретности пикселя

№ n/n	N, pix	$\lambda''$
1	2077,214	0,993
2	2072,217	0,995
3	2065,931	0,998
4	2068,086	0,997
5	2065,326	0,999
$\lambda_{\text{среднее}}$		<b>0,996</b>

$$\lambda = \frac{\Delta\varphi}{N},$$

где  $\Delta\varphi$  – параллактический угол нитяного дальномера эталонного нивелира,  $N$  – количество пикселей ПЗС-матрицы, соответствующих  $\Delta\varphi$ .

На стенде СПН были выполнены поверки главного условия оптического нивелира НЗ №11591 и цифрового нивелира Leica Sprinter 150M. Для их поверок использованы 2 цифровые камеры: цифровая камера Nikon Coolpix S2500 и цифровая камера Samsung NX1000 Kit и 2 веб-камеры: Ritmix RVC-006M и веб-камера Logitech HD Webcam C270.

Результаты исследования угла  $i''$  для этих нивелиров показали, что систематическая погрешность измерений не превышала 0,58'', максимальная величина средней квадратической погрешности по разностям двойных измерений  $m_d$  не превышала 3,02''.

Данный стенд позволяет в режиме реального времени находить величину угла  $i''$  нивелиров, исследовать диапазон работы компенсатора, а так же его случайные и систематические погрешности. При этом предоставляется возможность автоматического определения угла  $i''$  без участия оператора, с последующим вычислением и выводом на печать протокола поверки нивелира.

**В четвертом разделе** приведены результаты разработки и создания многоколлиматорного угломерного стенда МКС и методики исследований электронных тахеометров.

*Исследование погрешностей работы компенсаторов наклона электронных тахеометров.*

В соответствии с руководством по эксплуатации электронных тахеометров к диапазону действия и погрешностям работы компенсатора наклона предъявляют определённые требования. Например, в технических характеристиках завода-изготовителя для тахеометра Leica TCA 1102 систематическая погрешность

компенсатора не должна превышать 0,5", а диапазон действия компенсатора составлять ±4'. Целью исследования было определение влияния угла наклона тахеометра на точность измерения вертикальных углов в пределах диапазона работы компенсатора. В табл. 2 приведен перечень ЭТ, использованных в исследованиях, и результаты исследований.

При подготовке стенда к исследованиям визирная ось среднего коллиматора была приведена в горизонтальное положение с помощью нивелира Ni-002 с СКП=0,2". Исследования заключались в многократном измерении вертикальных углов между коллиматорами шестью приёмами при разных наклонах вертикальной оси вращения электронных тахеометров в пределах регламентированного диапазона работы двухосевого компенсатора с шагом 1' по направлению вверх и вниз. Все измерения заносились в компьютер, после чего производились вычисления по формулам:

$$m_{\text{изм}} = \sqrt{\frac{\sum v_{i-\text{ср}}}{n}};$$

$$\theta = \frac{\sum \left( \frac{M0_i - M0_0}{i} \right)}{n},$$

где  $v_{i-\text{ср}}$  – отклонение значения места нуля от среднего значения в приёме,  $n$  – общее количество измерений;  $m_{\text{изм}}$  – средняя квадратическая погрешность измерения.

$\theta$  – систематическая погрешность работы компенсатора на 1' наклона.

$M0_i - M0_0$  – отклонение значения места нуля при наклоне  $i$  от его значения при вертикальном положении,  $n$  – количество наклонных положений прибора. Результаты исследований обобщены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследований погрешности работы компенсатора.

Марка, модель электронного тахеометра	Leica TCA 1102	Leica TCR 1205	Sokkia Set530RK	Pentax R325-N
Случайная погрешность работы компенсатора	0,86"	0,52"	0,30"	0,67"
Систематическая погрешность работы компенсатора на 1' наклона	-0,57"	-0,46"	-0,15"	0,48"



Таким образом (табл. 2), компенсатор тахеометров фирмы Sokkia имеет практически пренебрегаемую систематическую погрешность на одну минуту наклона, систематические погрешности компенсаторов других исследованных тахеометров находятся на пределе регламентированного фирмами значения.

Кроме того, на стенде СПН были исследованы цифровые инклинометры NIVEL220 фирмы «Leica Geosystems» и ZEROMATIC2/2 «Wylер AG» (Швейцария). Полученные результаты подтвердили объективность предложенной методики и позволили расширить возможности стенда, добавив методику определения СКП измерения наклона цифровым инклинометром. При этом NIVEL220 показал более высокую точность и практически отсутствие систематической погрешности при диапазоне измерения  $\pm 10'$ .

### **Сравнительные исследования цифровых нивелиров и электронных тахеометров**

*Исследование точности измерения длины плеч цифровыми нивелирами.*

Для исследования СКП измерения расстояния цифровым нивелиром на территории университета был разбит базис длиной 50 м. Длина базиса была измерена поверенным электронным тахеометром Leica TS06 и принята за эталон.

Базис разбит на отрезки длиной 2 м, 3 м, 5 м, 10 м, 11 м, 15 м, 20 м, 25 м, 30 м, 35 м, 40 м, 45 м, 49 м и 50 м. Участки от 10 м до 11 м и от 49 м до 50 м, в свою очередь, поделены на отрезки по 10 см.

Для точного совмещения вертикальной плоскости рейки со штрих-кодом с центром знака изготовлена специальная насадка для нивелирной рейки. В процессе измерений нивелир устанавливался над начальной точкой базиса нитяным отвесом. Проведена серия измерений в прямом и обратном направлении. Полученные результаты сравнивались с эталонными значениями.

Для всей длины базиса  $b=50$  м, СКП измерения длины плеч составила в среднем 4,5 см, т.е. относительная погрешность оказалась около 1:1000, поэтому индикация длины плеча на дисплее ЦН до 1 мм завышена и не отражает фактическую точность измерения длин плеч.

*Сравнительные исследования СКП измерения превышений цифровым нивелиром и электронным тахеометром.*

Для проведения данного исследования был использован созданный автором компактный полевой компаратор (далее КПК) (рис. 7).

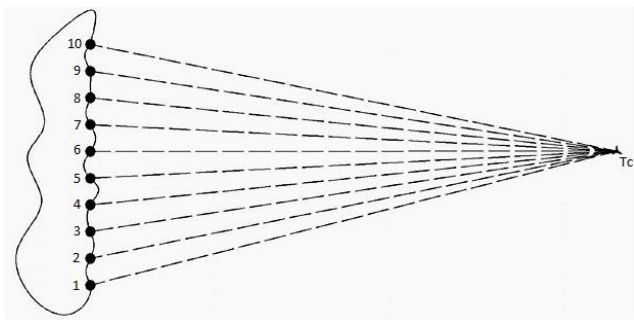


Рис. 7. Схема компактного полевого компаратора.

Измерения на полевом компараторе выполнены в 2 приёма. Каждый приём состоит в следующем. Прибор устанавливается на точке, расположенной в 50 м, и производится визирование на рейку. Помощник наблюдателя последовательно переставляет рейку с пункта 1 на пункт 2 и т.д. до пункта 10,

затем в обратном направлении, наблюдатель фиксирует отсчёты по рейке.

Независимость измерений достигается изменением высоты визирования между секциями. Преимущество линейного полигона так же и в том, что поскольку все реперы находятся на расстоянии 10-20 сантиметров друг от друга, экономится время, затрачиваемое реперником на переход от одного репера к другому.

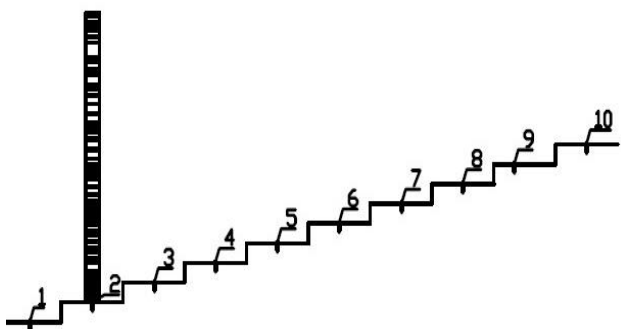


Рис. 8. Схема ступенчатого полевого компаратора.

В данном исследовании был использован также ступенчатый полевой компаратор, находящийся на территории университета (рис. 8).

Отличительная особенность ступенчатого компаратора в том, что превышение между соседними пунктами существенно больше. Таким образом, отсчеты берутся на различных участках

нивелирной рейки.

Для дальнейшего исследования автором проложен замкнутый нивелирный ход длиной 1км по близлежащим к МИИГАиК улицам. Пункты хода закреплены на местности строительными дюбелями. Измерения выполнены цифровым нивелиром и электронным тахеометром в прямом и обратном направлениях по технологии нивелирования III класса.

Полученные в ходе исследований результаты всех натуральных измерений, в том числе и полученные при проложении замкнутого нивелирного хода обобщены и приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты исследований измерения превышений цифровым нивелиром и электронным тахеометром.

Наименование, марка, модель ГСИ	Значение СКП измерения превышений			
	Цифровой нивелир Leica Sprinter 150M		Электронный тахеометр Geomax Zoom 30 pro	
	1-й приём	2-й приём	1-й приём	2-й приём
Компактный полевой компаратор, мм	1,13	0,61	0,47	1,67
Ступенчатый полевой компаратор, мм	0,64	0,42	1,05	1,51
Замкнутый нивелирный ход, мм/1км (г. Москва)	2,22		2,48	

Выполненные исследования и полученные результаты показывают, что современные оптико-электронные системы для тригонометрического нивелирования практически не уступают по точности системам геометрического нивелирования.

**Разработка, создание и исследования многоколлиматорного угломерного стенда МКС на базе серийной установки АУПНТ.**

В отличие от аналогичных по точности оптических теодолитов электронные тахеометры конструктивно выполнены так, что их горизонтальный круг закреплен неподвижно и не имеет устройства для перестановки штрих-кодowego лимба. Это обстоятельство осложняет процесс исследования ряда инструментальных ошибок, требуются дополнительные направления в виде визирных осей коллиматоров, поскольку и эксцентриситет горизонтального и вертикального круга, и погрешности отсчитывания с кодовых или растровых лимбов необходимо исследовать на разных участках лимба.

Поэтому, чтобы обеспечить необходимые для проведения исследований условия, перед автором была поставлена задача создания многоколлиматорного

универсального поверочного стенда (МКС), взяв за основу несущую конструкцию установки АУПНТ.

Как видно из рисунка 9 конструкция МКС имеет два дополнительных кронштейна, на которых могут быть установлены дополнительно по четыре коллиматора. Таким образом, разработана и реализована конструкция стенда МКС на базе АУПНТ с одиннадцатью равномерно расположенными коллиматорами.

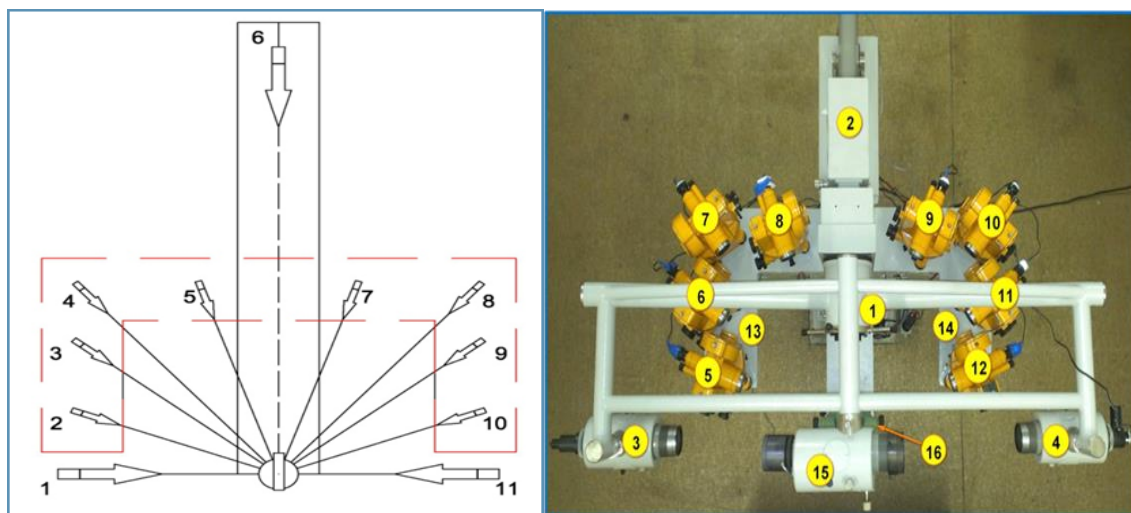


Рис. 9. Схема и общий вид многоколлиматорного универсального стенда (МКС).

На стенде МКС проведены исследования ЭТ с односторонней и двусторонней системами отсчитывания. Тахеометр Leica TCR307 выбран, как обладающий односторонней системой отсчитывания, вследствие чего измерения этим прибором имеют более низкую точность по сравнению с TCR405, имеющим двустороннюю систему отсчитывания и характеризующимся средней квадратической погрешностью 7". Основные отличия TCR307 от TCR405 — более низкая модификация и точность угловых измерений.

По результатам исследований (рис. 10) определено влияние углового элемента эксцентриситета для тахеометра с двусторонней системой отсчитывания Leica TCR405 и тахеометра Leica TCR307 с односторонней системой отсчитывания.

Как видно из рисунка 10, график углового элемента эксцентриситета для тахеометра с односторонней системой отсчитывания представляет собой плавную синусоиду. Максимальное значение углового элемента эксцентриситета  $\varepsilon_{max}=23''$ . Это позволяет утверждать, что угловой элемент эксцентриситета следует учитывать, особенно в измерениях при одном положении круга. Чтобы подтвердить истинность

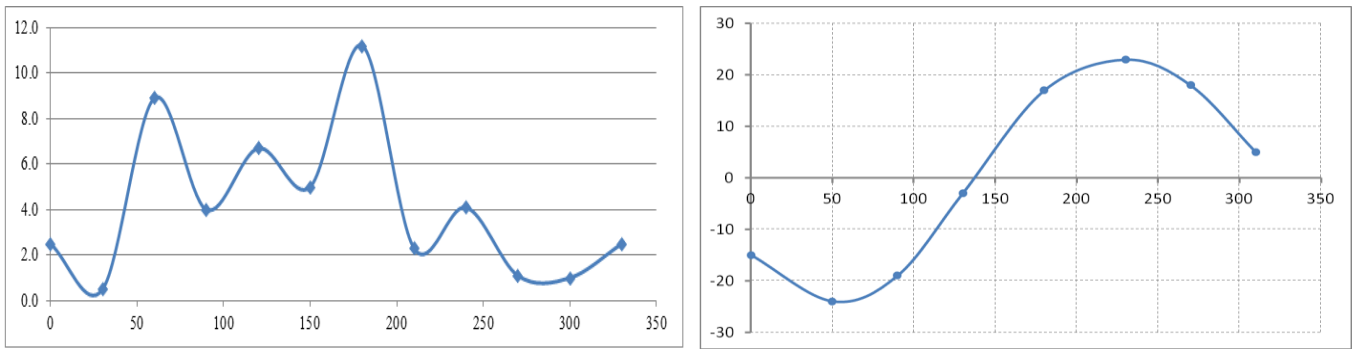


Рис. 10. Слева - Остаточное влияние эксцентриситета для Leica TCR405;  
Справа - Угловой элемент эксцентриситета для Leica TCR307.

этого утверждения, было проведено подробное исследование, включающее 12 приёмов с вращением подставки через  $30^\circ$  полным приёмом на каждое из 11 направлений. Результаты приведены на рисунке 11.

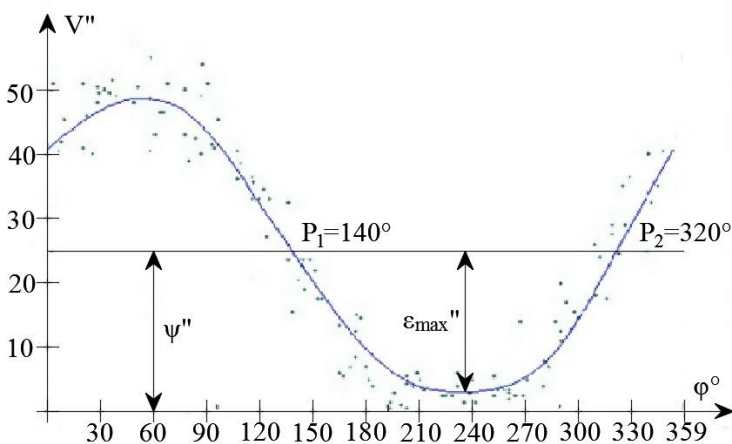


Рис. 11. Угловой элемент эксцентриситета при исследовании 12 приёмами на 11 направлений.

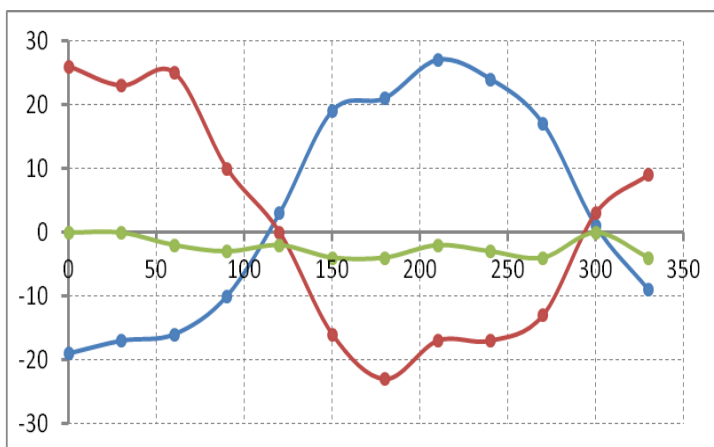


Рис. 12. Остаточное влияние углового элемента эксцентриситета  $\epsilon_i$  на значения измеренного угла  $\beta=180^\circ$  одним полным приёмом.

Данное исследование было проведено повторно с использованием эталонного угла  $\beta_{\text{эт.}}=180^\circ 00' 00''$  для тахеометра TCR307. Методика исследования состояла в следующем. При двух положениях круга КЛ и КП отсчитывались два направления, которые образуют автоколлиматоры кантователя. Этот угол был ранее измерен теодолитом Т1 с  $m_\beta=1,2''$ , превышающей заявленную производителем TCR307  $m_\beta = 7,0''$  исследуемого тахеометра.

Поскольку в ЭТ не предусмотрена перестановка лимба, чтобы иметь возможность исследовать все участки горизонтального круга, лимб перемещался вместе с подставкой на  $30^\circ$  при каждом новом приёме. По результатам измерений построен график (рис. 12).

На рисунке обозначены: КП – синим цветом; КЛ – красным; среднее значение – зелёным.

Полученные результаты подтвердили непосредственное влияние углового элемента эксцентриситета на величину измеренного угла в ЭТ с односторонней системой отсчитывания. При этом величина углового элемента эксцентриситета при измерении одним кругом (КЛ), как принято в топографической съемке, достигала 23" при заявленной  $m_{\beta} = 7''$ . Остаточное влияние эксцентриситета в ЭТ с двусторонней системой отсчитывания TCR405 колеблется от 6" до 10", что также превышает заявленную  $m_{\beta} = 5''$ .

По результатам оценки точности составлена таблица сопоставления главной метрологической характеристики измерения горизонтального угла заявленной производителем и полученной из исследований.

Таблица 4. Результаты исследований СКП измерения горизонтального угла электронных тахеометров

Наименование, марка, модель ГСИ	Значение СКП измерения горизонтального угла	
	Получено из исследований	Заявлено производителем
Leica TS 06 ultra	2,1"	3"
Leica TS 06 plus	2,8"	3"
Leica TCR 307	6,4"	7"
Trimble S8	2,8"	1"
Trimble M3 DR	6,3"	5"
Sokkia SET 530RK3	4,6"	5"

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итогом** диссертационной работы являются следующие результаты и выводы:

- Доказано, что синтез свойств оптических дальномеров, коллиматоров, многоэлементных фотоэлектрических преобразователей типа ПЗС и КМОП-матриц, образцовых ГСИ в качестве эталона и специального программного обеспечения (СПО), позволяет создавать компактные, оперативные методы и средства геодезической метрологии.

- Предложена идея использования постоянства параллактического угла  $\varphi = 34,38' = 2062,65''$ , и расстояния между нитями  $l = 2,0$  мм нитяных дальномеров, в

качестве эталонов, позволяет определять угловую и линейную дискретность пикселя ПЗС-матриц и использовать её в виде двумерной образцовой шкалы.

- Изготовлен и опробован опытный образец компактного стенда для поверки оптических и цифровых нивелиров, а также поверки геометрических условий и компенсатора наклона электронных тахеометров.
- Реализованы полевые линейный и ступенчатый компараторы, на которых проведены исследования по определению средней квадратической погрешности (СКП) измерения превышения геометрическим нивелированием и тригонометрическим нивелированием электронным тахеометром.
- Создан базис, на котором выполнены исследования по определению относительной погрешности измерения длин плеч цифровыми нивелирами по штрих-кодовым рейкам.
- Изготовлен экспериментальный многоколлиматорный стенд (МКС) на базе серийной установки АУПНТ, на котором выполнены исследования по определению главной метрологической характеристики пяти электронных тахеометров ведущих фирм-производителей.
- Разработаны две методики (с использованием эталонного угла  $180^\circ$  и с использованием 12 эталонных направлений), позволяющие выявлять остаточное влияние эксцентриситета горизонтального круга на измеренный угол.

**Рекомендации.** Полученные при выполнении диссертационной работы научные результаты могут быть использованы для оперативного определения:

- коллимационной погрешности, места зенита, эксцентриситета горизонтального круга, средней квадратической погрешностей измерения горизонтального угла и измерения превышения тригонометрическим нивелированием, случайной и систематической погрешностей работы компенсатора современными электронными тахеометрами;
- главного условия (угла  $i$ ), коэффициента нитяного дальномера, случайной и систематической погрешностей работы компенсатора, а также диапазона работы и средней квадратической погрешности измерения превышения на 1 км двойного нивелирного хода современными цифровыми нивелирами.

**Перспективы.** Полученные результаты открывают новые направления геодезической метрологии в контексте полной автоматизации технологических процессов поверки и исследования современных геодезических инструментов.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Староверов С.В. Разработка и исследования стенда для оперативной технологической и метрологической поверки угломерных ГСИ. //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка 2017.№ 5. С. 60-65.
2. Староверов С.В. О возможности использования цифровой инклинометрии для геодезического мониторинга инженерных сооружений. /Хиллер Б., Мясников Я.В. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 1. С. 34-37.

### *В прочих научных изданиях:*

3. Староверов С.В. Особенности фоточувствительных приёмников с зарядовой связью и их возможности в геодезии и метрологии. /Ямбаев Х.К. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск: Пленарное заседание: сб. материалов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 112 с.
4. Староверов С.В. Методика и результаты исследований компенсаторов наклона электронных тахеометров /Мазур А.О., Ямбаев Х.К. // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 6. – Вып. 5. С. 84-86.
5. Староверов С.В. Разработка стенда и методика определения основных метрологических параметров оптических и цифровых нивелиров /Перегудов А.А., Ямбаев Х.К. // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012 № 6. – Вып. 5. С. 110-113.