

На правах рукописи

Абраш

Брагин Александр Александрович

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И
ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
МЕТОДА ВИДЕОИЗМЕРЕНИЙ
В ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 2011

Работа выполнена на кафедре Геодезии и геоинформатики Московского государственного университета по землеустройству (ГУЗ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Баранов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Яшкин Станислав Николаевич

кандидат технических наук
Буюкян Сурен Петросович

Ведущая организация: ОАО «Корпорация «Московский институт
теплотехники» (МИТ)

Защита диссертации состоится «12» мая 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан «__»__ апреля 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ю.М. Климов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Во многих областях науки и техники в настоящее время происходит переход к оптико-электронным методам регистрации изображений. Для измерительных целей в большинстве случаев используются цифровые матричные приемники излучения (МПИ) на основе ПЗС или КМОП, для которых характерна жёсткая геометрическая привязка фоточувствительных элементов к системе координат прибора, что способствует созданию измерительной аппаратуры с высокостабильными метрологическими характеристиками.

В этой связи переход от визуальных к объективным оптико-электронным методам наблюдений является перспективным, неразрывно связанным с повышением уровня автоматизации и совершенствованием существующих и разработкой новых методов астрономо-геодезических наблюдений. Метод видеоизмерений на базе МПИ, благодаря конструктивным особенностям аппаратуры, позволяет повысить точность измерений. При этом исключается ряд трудно учитываемых погрешностей и недостатков, присущих как визуальным методам, так и аналоговым фотоэлектрическим системам (субъективные ошибки, малое быстродействие, низкий уровень автоматизации и т.п.), однако применение цифровых МПИ требует решения новых, вполне определенных задач.

На сегодняшний момент, несмотря на широкое внедрение в геодезическое производство современных технологий (ГНСС и др.), определение астрономического азимута, а в ряде случаев и астрономических координат, традиционными методами геодезической астрономии остается актуальной задачей. Применяемые в производстве способы и аппаратура определения астрономического азимута достаточно сложны и архаичны, ограничены в оперативности, что требует их автоматизации и перехода на качественно иные методы наблюдений с применением новейшей аппаратуры, отвечающей современному состоянию и уровню техники высокоточных измерений.

В более широком плане повышение точности и объективизации наблюдений с применением МПИ необходимо для решения целого комплекса задач геодинамики, геодезического обеспечения специальных работ, космических исследований и т.п. Например, при редуцировании результатов траекторных измерений из топоцентрической инструментальной в звездную (инерциальную) систему координат необходима автоматизация процесса наблюдений звезд и базисного направления.

Знакомство с современными геодезическими приборами показывает, что в настоящее время имеется особый класс электронных тахеометров, снабженных МПИ, точностные характеристики которых позволяют использовать их при астрономических наблюдениях.

Работы по автоматизации наблюдений в геодезической астрономии велись и ранее. Важнейшую роль в становлении и развитии исследований данного направления сыграли работы ведущих ученых: Павлова Н.Н., Беляева Н.А., Брандта В.Э. и других. Разработанные инструменты, современные для тех лет, и достигнутые результаты отвечали поставленным задачам, однако новейшие достижения в науке и технике открывают перспективу повышения уровня автоматизации наблюдений и позволяют сделать предположение о возможности достижения качественно новых точностных характеристик.

С учетом вышеизложенного автор полагает, что тема диссертации является **актуальной** и имеет важное научное и практическое значение.

Цель и задачи диссертации. Целью работы является изучение вопросов, связанных с применением МПИ для наблюдения точечных источников излучения (ТИИ), а также теоретическая проработка и практическая реализация метода видеоизмерений в геодезической астрономии, в частности, при азимутальных определениях с использованием серийных электронных тахеометров.

Данная цель достигнута в ходе постановки и решения следующих задач:

1. Исследование энергетических и точностных возможностей применения МПИ в качестве устройств для регистрации ТИИ астрономическими теодолитами типа Вильдт Т-4, ДКМ-3А, АУ01 и т.п.
2. Исследование точности методов определения координат центра цифрового изображения ТИИ и их совершенствование.
3. Исследование влияния погрешностей, вносимых дискретной структурой МПИ, а также влияния параметров анализируемого изображения (яркость, спектральный класс, диаметр кружка рассеяния) и шумов на результаты астроопределений.
4. Исследование точности измерения углов в поле зрения астрономического теодолита.
5. Исследование точностных возможностей применения современных серийных электронных тахеометров для полевых астрономических определений.
6. Разработка (до уровня практического применения) метода определения азимута астрономическим теодолитом, снабженным МПИ.

7. Экспериментальные исследования метода видеоизмерений при астрономических определениях с применением современных серийных электронных тахеометров.
8. Разработка и практическое апробирование алгоритмов и пакета программ для автоматизированной обработки наблюдений для получения результатов в реальном масштабе времени.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту. Предлагаемая диссертация является одной из первых работ, в которой рассматриваются вопросы по исследованию и внедрению метода видеоизмерений с применением современных портативных геодезических инструментов в практику астрономических наблюдений с целью определения точного астрономического азимута.

Новыми и выносимыми на защиту являются следующие результаты:

1. Теоретическое обоснование и практическое подтверждение возможности применения современных геодезических приборов, оснащенных матричным приемником излучения, для целей геодезической астрономии.
2. Способ определения точного астрономического азимута на пункте с неизвестными координатами, разработанный до возможности практического применения с использованием переносных астрономических теодолитов, оснащенных матричным приемником излучения.
3. Разработанная методика лабораторных и полевых экспериментальных исследований точности микрометрических методов видеоизмерений.
4. Созданный программный продукт, позволяющий реализовать предложенные в диссертации методы и алгоритмы.

Практическая значимость результатов, выносимых на защиту, заключается в следующем:

1. Полученные результаты исследования позволяют повысить точность и степень автоматизации определений точного астрономического азимута при проведении геодезических работ специального назначения, а также при создании систем калибровки автономных средств определения азимутов.
2. Все проведенные исследования матричного приемника излучения электронного

тахеометра доведены до рабочих методик наблюдений, которыми можно пользоваться при эксплуатации аппаратуры.

3. Разработанный программный продукт позволяет реализовать на практике предложенные методы и алгоритмы определения координат изображения ТИИ, а также определение астрономического азимута в реальном масштабе времени.

Апробация диссертационного исследования проведена на 61-ой (2006 г.), 62-ой (2007 г.), 65-ой (2010 г.) научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК; на ежегодных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных ГУЗ (2008, 2009, 2010 гг.); на юбилейных конференциях, посвященных 230-летию МИИГАиК и ГУЗ (2009 г.); на юбилейной конференции, посвященной 175-летию введения в России высшего землеустроительного образования (ГУЗ, 2010 г.); на VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Землеустройство, кадастр и геопространственные технологии» (ГУЗ, 2010 г.).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в четырех печатных работах в журнале, включенном в перечень ВАК; из них одна подготовлена автором лично, три в соавторстве.

Личный вклад автора. Все полученные в ходе исследования теоретические разработки и аналитические расчеты, представленные в работе, выполнены автором. Им лично проведены все полевые наблюдения и их обработка, разработаны алгоритмы и программное обеспечение, описываемое в диссертационной работе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы (всего 109 наименований, в том числе 39 на иностранных языках). Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 27 таблиц, 9 приложений на 34 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение выделены проблемы, определяющие актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и её научная новизна.

Глава 1. Матричные приемники излучения и их применение для определения координат точечных источников излучения

Приведенные в главе общие сведения об основных технических характеристиках и функциональных особенностях МПИ (на основе ПЗС и КМОП) показывают принципиальную возможность их практического применения в качестве регистраторов ТИИ и последующем измерении координат их изображений с субпиксельной точностью.

Из проведенного в данной главе анализа следует, что в настоящее время метод видеоизмерений широко применяется в различных сферах человеческой деятельности (в космических исследованиях, в прикладной геодезии и для решения специальных задач, в геодезической астрономии и астрометрии). На сегодняшний день это естественный путь при автоматизации наблюдений такого рода, в которых до этого использовались иные приборы регистрации излучения (фотографические, фотоэлектрические).

Проведенный сравнительный расчет чувствительности (минимальной регистрируемой звездной величины) при применении фотоэлектрии и МПИ показывает принципиальное расширение возможностей метода видеоизмерений за счет наблюдения звезд более слабой звездной величины, что способствует также увеличению точности в связи с возрастанием полезного сигнала и увеличением отношения сигнал/шум.

Точность определения положения центра ТИИ в астрометрии достигает в отдельных случаях величины 0,1 пикселя и более, что в угловой мере для стационарных инструментов соответствует величине $0,1 \div 0,5''$ (в зависимости от параметров применяемых МПИ и параметров оптики приборов).

По результатам выполненного обзора прослеживается тенденция активного применения МПИ и метода видеоизмерений для целей геодезической астрономии (определение составляющих УОЛ) в зарубежных странах. Однако нет единого подхода в решении ряда задач, например, какие приборы и методы эффективнее применять на практике. В настоящее время не существует единых сведений о достигнутой точности результатов, нет рекомендаций относительно применения методов при использовании портативных средств наблюдений. При этом с сожалением приходится отмечать, что подобные исследования в России на сегодняшний день не ведутся.

В ходе проведенного обзора выявлены общие характеристики описываемых приборов и инструментов, а также недостатки, присущие им. Установлено, что

применение МПИ открывает новые возможности (по сравнению с применением ФЭУ) в геодезической астрономии, а именно:

- определения азимутов и координат по наблюдениям подвижных и неподвижных звезд;
- измерение координат изображений ТИИ и углов в поле зрения объектива без применения механических микрометров;
- выполнение калибровок МПИ непосредственно в полевых условиях (по звездам) в процессе наблюдения.

Проделанный анализ свидетельствует о больших потенциальных возможностях приборов с МПИ. В главе показано, что для применения портативных инструментов требуется проведение дополнительных лабораторных и полевых исследований, а также теоретических проработок для реализации поставленных задач.

На основе приведенного материала, выполненного анализа литературы и сделанных выводов выполнена постановка задач диссертационного исследования.

Глава 2. Теоретические исследования погрешностей метода видеоизмерений

В главе приводятся результаты исследований погрешностей метода видеоизмерений. В основе метода лежит анализ электрического сигнала, получаемого с МПИ в результате преобразования световой энергии. Метрическая обработка изображений ТИИ актуальна при решении задач в ряде технических измерительных систем: геодезических, астрометрических, навигационных, локационных и т.п. Для решения большинства из этих задач необходима точность определения координат в плоскости анализа порядка десятых долей размера пикселя. При этом важным вопросом является разработка и апробирование методики точного определения положения изображения ТИИ.

Исходным при определении положения изображения ТИИ является распределение световой энергии в изображении, построенном оптической системой. После дискретизации и квантования сигнала исходное изображение представляется в виде двумерной матрицы целых чисел (пропорциональных суммарному заряду, накопленному в отдельном пикселе). При определении положения координат изображения используется набор дискретных величин, расположенных на сетке с постоянным интервалом.

В работе для выявления факторов, влияющих на точность определения положения изображения ТИИ, приводится анализ и исследование существующих методов определения координат центра изображения:

- 1) метода аппроксимации функции рассеяния точки, заключающегося в определении максимума функции рассеяния точки, описывающей исходное изображение ТИИ;
- 2) метода центра тяжести – определения значений средних взвешенных координат;
- 3) медианного метода – определения координат из условия равенства энергий (площадей) слева и справа от положения центра изображения;
- 4) уровня метода, заключающегося в разбиении исходного сигнала на уровни, нахождении средних значений координат для каждого из уровней и последующем выборе оптимального значения координаты.

При исследовании погрешностей, возникающих при определении положения изображения ТИИ, в качестве исходной одномерной модели распределения световой энергии использовалась функция:

$$y(x) = A \cdot \exp(-x^2),$$

или ее упрощенное представление:

$$y(x) = A \cdot \cos^2(Bx), \quad (1)$$

где B – константа, зависящая от длины световой волны, фокусного расстояния и диаметра входного отверстия объектива, A – амплитуда сигнала, x – координата в плоскости анализа.

Дискретный по координате x сигнал, получаемый с ячеек МПИ, рассчитывался как значение интегральных сумм:

$$f(x_i) = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_i}^{x_{i+1}} y(x) dx = \frac{A \left[(2Bx_{i+1} - 2Bx_i) + \sin(2Bx_{i+1}) - \sin(2Bx_i) \right]}{4B\Delta x}, \quad (2)$$

где $y(x)$ представляет распределение световой энергии изображения; $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ – размер пикселя; x_i, x_{i+1} – координаты границ i -го пикселя; i – порядковый номер пикселя (рис. 1).

Разность $y(x_i) - f(x_i) = \delta y(x_i)$ является погрешностью дискретизации (вместо значений $y(x_i)$ функции (1) в обработку принимаются величины интегральных сумм $f(x_i)$). На рис. 2 приведены значения $\delta y(x_i)$, выраженные в процентах от значений функции $y(x_i)$ в соответствующей ячейке, при распределении исходного сигнала на $n=3, 5, 7, 9$ элементов МПИ. Из анализа рис.2 следует, что погрешность дискретизации в относительных показателях оказывает наиболее сильное влияние в граничных элементах МПИ (в процентах от максимального значения искажения будут существенно ниже)

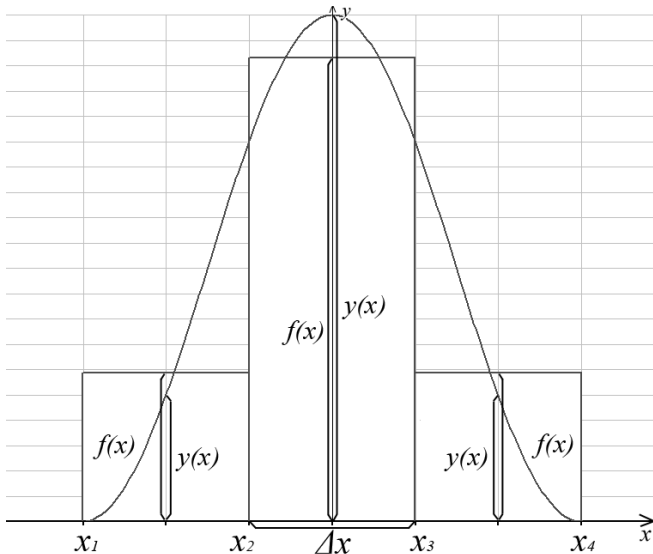


Рис. 1. Одномерная модель распределения световой энергии.

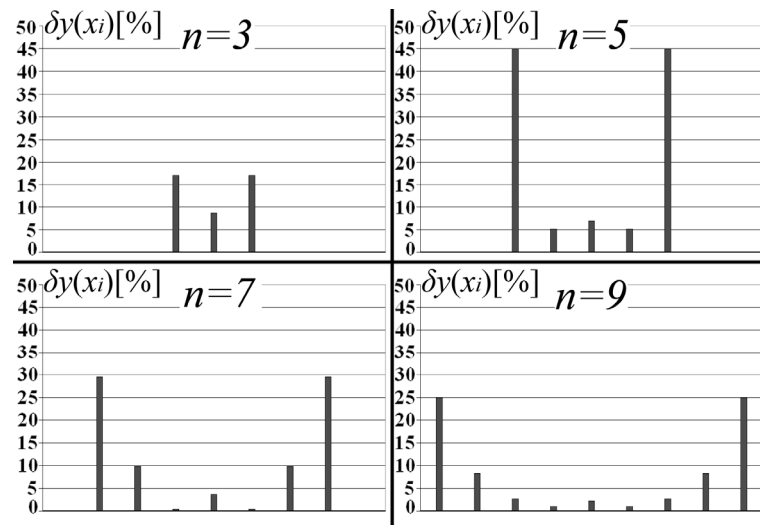


Рис. 2. Значения $\delta y(x_i)$, выраженные в процентах от значения функции $y(x_i)$.

Рассмотрим задачу определения положения максимума функции $y(x)$ на оси Ox по исходным значениям $f(x_i)$, получаемым по данным измерений с МПИ.

При расположении центра изображения, т.е. максимума функции (1), на границе пикселей или в середине пикселя его положение, ввиду симметрии значений $f(x_i)$ относительно оси Y , будет определяться безошибочно.

Если максимум функции $y(x)$ занимает произвольное положение в пределах одного пикселя, т.е. функция (1) сдвинута относительно центра пикселя на величину δ_x , то положение центра изображения не удовлетворяет условию симметрии, и аналитическое выражение для интегральных сумм в таком случае имеет вид (принимая $A=1, B=1$):

$$f(x_i + \delta_x) = \frac{[(2x_{i+1} - 2x_i) + \sin(2x_{i+1} + 2\delta_x) - \sin(2x_i + 2\delta_x)]}{4\Delta x}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет вычислить значения световой энергии, создаваемой ТИИ в отдельно взятом пикселе, для произвольного смещения δ_x .

Для предварительных расчетов рассмотрен частный случай – исходная функция (энергия изображения ТИИ) распределена на 3 элемента МПИ. Её максимум при начальном положении изображения находится в середине центрального элемента.

Симметрия $f(x_i)$ относительно максимума функции $y(x)$ при смещении изображения на величину δ_x нарушается. Влияние асимметрии на конечный результат в различных методах обработки сигнала может быть различным. Данное влияние подробно рассмотрено для каждого метода обработки. В итоге получен сравнительный график погрешностей методов,

рассматриваемых в работе (рис. 3).

Установлено, что минимальную погрешность определения на модельных сигналах дает метод центра тяжести, остальные методы дают погрешность, не превосходящую $\sim 0,1$ величины пикселя, что в угловой мере для тахеометра Topcon 7003i приводит к погрешности $\sim 0,5''$. Для астрономического теодолита с $f = 600$ мм и $D = 60$ мм погрешность будет существенно меньше и не превосходить $0,2''$.

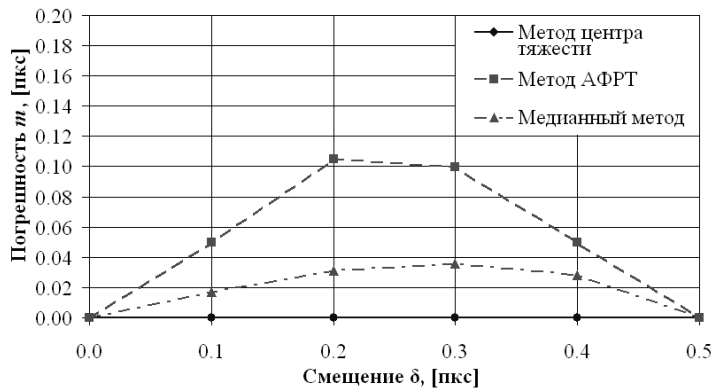


Рис. 3. Сравнительный график погрешностей.

В работе приведено исследование влияния размера элемента МПИ на точность определений. На рис. 4 приведены результаты вычислений координаты максимума функции $y(x)$ по значениям интегральных сумм $f(x_i)$ тремя исследуемыми методами (для $n=3, 9$).

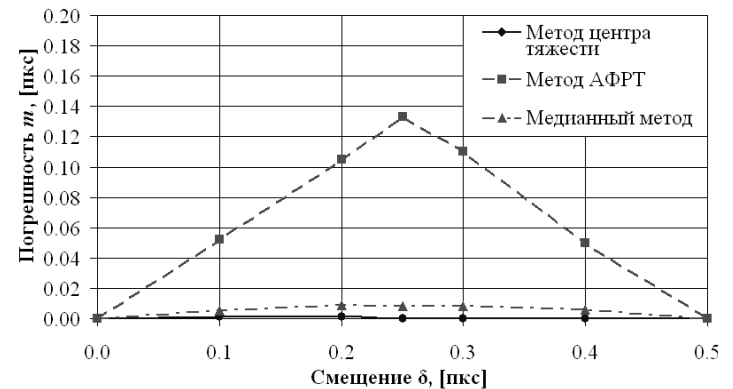
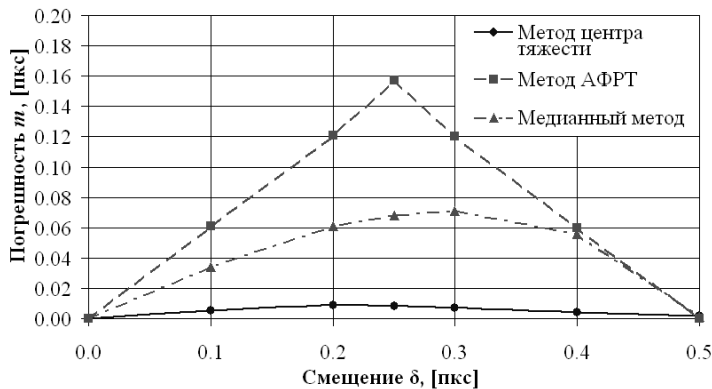


Рис. 4. Результаты вычислений при распределении исходной функции на 3 и 9 пикселей.

Погрешности определения координат изображения, очевидно, зависят от диаметра изображения. Так при увеличении кружка рассеяния увеличивается количество элементов, на которое распределяется энергия сигнала, но уменьшается уровень сигнала на выходе каждого элемента, что приводит к увеличению влияния шумов. При уменьшении кружка возрастает влияние погрешностей дискретизации. Вследствие этого возникает необходимость определения оптимального значения диаметра кружка рассеяния при наблюдениях ТИИ с помощью МПИ, что и сделано в диссертационном исследовании.

Для определения влияния расфокусировки изображения на точность определения положения изображения ТИИ выполнены расчеты значений величин интегральных сумм

$f(x)$ для функции (1), имитирующей исходный сигнал. При этом функция (1) распределялась на $n=3, 5, 7$ и 9 пикселей (размер пикселя оставался неизменным) таким образом, чтобы значение интеграла (определяемое энергией сигнала) оставалось постоянным (см. рис. 5).

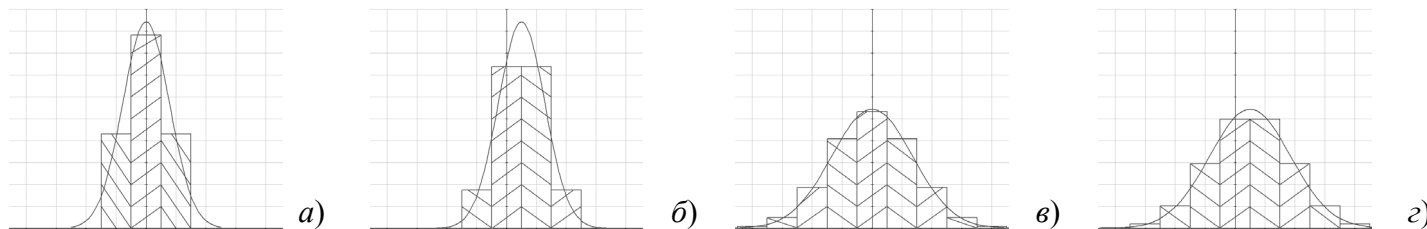


Рис. 5. Распределение исходной функции.

На рисунке 5 представлены: график исходной функции и интегральные суммы (заштрихованные прямоугольники), (а, в) - без смещения изображения, (б, г) - при смещении на $0,5$ пикселя, (а, б) - при распределении исходной функции на $n=3$ элемента, (в, г) - на $n=9$ элементов.

Результаты вычислений координаты максимума функции $y(x)$ по значениям интегральных сумм $f(x_i)$ тремя методами приведены на рис. 6 (для $n=3, 9$).

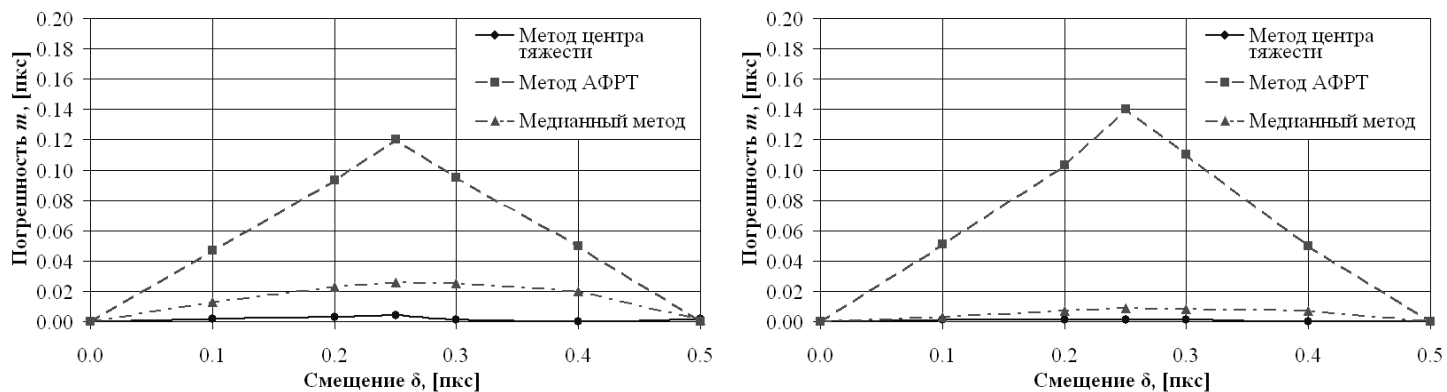


Рис. 6. Результаты вычислений при распределении исходной функции на 3 и 9 пикселей.

По результатам исследования сделан вывод, что необходимо добиваться увеличения степени расфокусировки для достижения более высоких точностных характеристик.

Следует отметить, что по данным исследований установлено, что величина смещения (координата центра) для малого числа пикселей, формирующих изображение, зависит от формы сигнала, от величины смещения и практически не может быть получена с необходимой точностью. Поэтому сигнал с распределением на малое число пикселей исключен из рассмотрения.

Кроме методических погрешностей, присущих каждому методу, в оцениваемых координатах реального изображения ТИИ присутствует погрешность, обусловленная

наличием шумов приемного устройства. Для учета влияния суммарного шума, получаемого на выходе с каждого элемента МПИ, для отдельно взятой интегральной суммы с помощью генератора случайных чисел задавалась реализация шумового заряда с СКП, не превышающей 10% величины исходного заряда (интегральной суммы). Полученные значения шумовой составляющей сигнала суммировались со значениями интегральных сумм, полученные значения подвергались обработке. Вычисления выполнялись для 100 реализаций шума. Для каждого вычисленного значения координаты ТИИ по серии из 100 реализаций сигнала со случайным шумом для каждого метода вычислялись СКП определения координат.

Из приведенных на рис. 7 графиков СКП делаются выводы, что при увеличении размеров изображения шумовая компонента влияет на результат сильнее, чем при стигматичном изображении, при этом большей устойчивостью к шуму при различном диаметре кружка рассеяния обладает метод аппроксимации ФРТ.

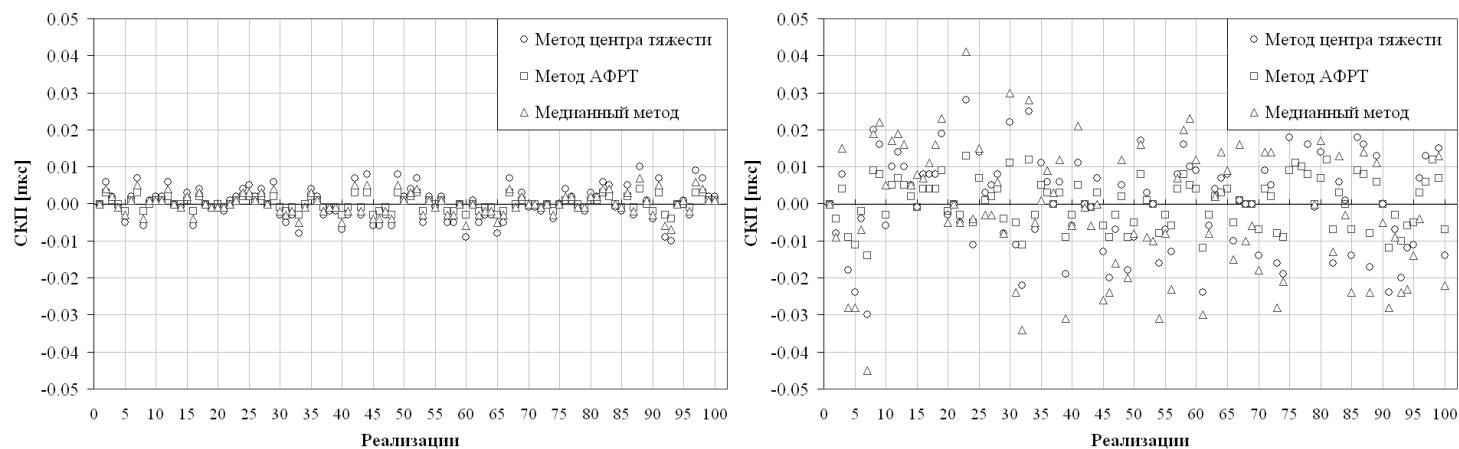


Рис. 7 Оценка влияния шумов при распределении исходной функции на 3 и 9 пикселей.

На основании результатов теоретических исследований, полученных в данной главе, делаются следующие выводы:

1. Размер изображения ТИИ, т.е. число пикселей, формирующих изображение, влияет на точность определения координат. С увеличением размера изображения (с 3 до 9 пикселей) методическая погрешность уменьшается в 2-3 раза.
2. При оценивании ошибок координат изображения ТИИ установлено наличие систематических ошибок методического характера, обусловленных дискретной структурой МПИ.
3. Современные МПИ способны обеспечить достаточный уровень пространственного разрешения при изображении, распределяющимся $\sim 5 \times 5$ пкс и более. Установлено, что

минимальную погрешность определения на модельных сигналах дает метод центра тяжести, остальные методы дают погрешности, не превосходящие 0,1 величины пикселя (при $n=3$), что в угловой мере приводит к погрешности в 0,5" для переносных инструментов, типа современных электронных тахеометров.

4. Точность определения координат зависит от отношения сигнал/шум и от линейных размеров элемента МПИ. При высоком уровне шума вклад методической погрешности в суммарную погрешность оказывается значительным практически для всех рассматриваемых методов, поэтому необходимо обеспечивать получение сигнала с высоким отношением сигнал/шум.

Глава 3. Исследования электронных тахеометров, оснащенных матричным приемником излучения

В главе приводятся результаты экспериментальных исследований МПИ, а также электронных тахеометров. Целью проведения исследований являлось получение точностных характеристик для разработки оптимальной методики видеоизмерений в поле зрения зрительной трубы и выполнения азимутальных астронаблюдений.

Лабораторные исследования МПИ выполнялись в метрологической лаборатории ФГУП «ГСПИ» Минатома РФ, при этом производились следующие виды работ:

- исследование зависимостей точности регистрации положения центра изображения ТИИ от яркости и спектрального состава излучения изображения наблюдаемого объекта;
- исследование точности измерения углов в поле зрения МПИ;
- определение масштаба снимка и его постоянства по полю зрения.

Исследования качества оптического изображения и МПИ (рис. 8) проводились при помощи коллиматора ($f = 1000$ мм), точечной диафрагмой с источником света (мощность источника света меняется при помощи реостата) и набором светофильтров.

Целью полевых исследований являлось подтверждение результатов лабораторных исследований, а также проведение дополнительных, отличных от лабораторных, исследований. При этом определялись зависимости точности определения положения изображений от звездной величины и спектрального класса наблюдаемых звезд, а также определялся масштаб снимка и его постоянство по полю зрения.



Рис. 8. Тахеометр Topcon GPT-7003i при исследованиях МПИ.

В каждом исследовании проводился анализ и интерпретация результатов обработки цифровых снимков, получаемых с МПИ электронного тахеометра Topcon GPT7003i.

По результатам лабораторных исследований МПИ установлено:

- диапазон изменения яркости, в пределах которого возможны точные измерения с применением МПИ тахеометра Topcon GPT-7003i, равен 0÷4 звездной величины;
- существует вполне определенная зависимость случайной погрешности определений от спектрального состава излучения наблюдаемого объекта (рис. 9). Зависимость случайной погрешности, определявшаяся по наблюдениям звезд различных спектральных классов, имеет вид, представленный на рис. 10;

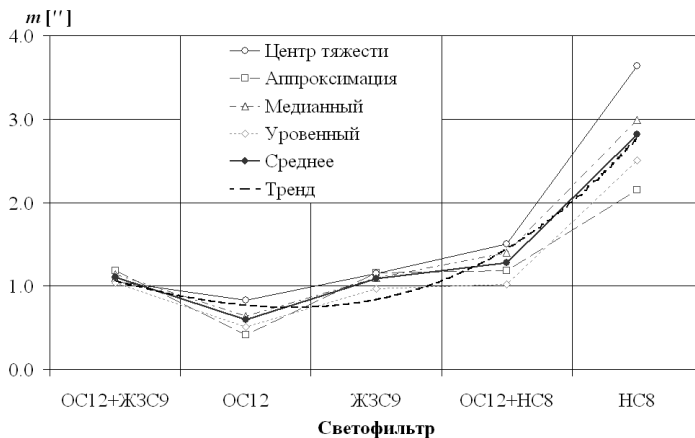


Рис. 9. График зависимости СКП от спектрального состава ТИИ, полученный по результатам лабораторных исследований.



Рис. 10. График зависимости СКП от спектрального класса, полученный по наблюдениям звезд.

- СКП измерения угла в поле зрения трубы при помощи МПИ (для ТИИ с блеском $\sim 2^m$) составляет в линейной мере $\sim 0,1$ пкс, что в угловой мере, для тахеометра типа Topcon GPT-7003i, соответствует величине $\sim 0,5''$;
- среднее значение масштаба постоянно по полю зрения и равно $4,675 \pm 0,031 ["/\text{пкс}]$.

По результатам наблюдений звезд установлено, что:

- методы определения положения центра изображения ТИИ (звезд) имеют тенденцию одинаково реагировать на изменение звездной величины, определенной зависимости СКП для разных методов от наблюдаемых звездных величин (в интервале $0 \div 4^m$) не обнаружено;
- имеется определенная зависимость СКП (m) определения положения изображения звезды от ее спектрального класса (рис. 10). Данный вывод согласуется с выводом, сделанным по результатам исследований на оптической скамье (рис. 9). Погрешности для спектрального класса связаны со спектральной чувствительностью МПИ;
- среднее значение масштаба по полю зрения составило $4,664 \pm 0,006 ["/\text{пкс}]$, что согласуется с данными лабораторных исследований;
- предельная регистрируемая звездная величина оказалась равной 4^m .

Исследования погрешности измерений горизонтальных и вертикальных углов, погрешности работы осевых систем, определение коллимационной погрешности и ее постоянства на разных зенитных расстояниях осуществлялись путем измерения эталонных углов на коллиматорном стенде УК-1 (рис. 11).

Стенд предназначен для метрологических испытаний точных теодолитов и электронных тахеометров. В проводимых исследованиях в качестве визирных целей из семи коллиматоров использовались три (К2, К3, К4), расположенные в одной вертикальной плоскости (на угловом удалении $\sim 25^\circ$ друг от друга), и один (К5), смещенный по азимуту примерно на 30° (рис. 11). Тахеометром при 2^x кругах многократно измерялись задаваемые коллиматорами направления.

Исследование электронного уровня, обеспечивающего автоматическую двухосную компенсацию наклона, выполнялось на экзаменаторе конструкции ЦНИИГАиК (рис. 12) по видоизмененной методике способа Васильева.

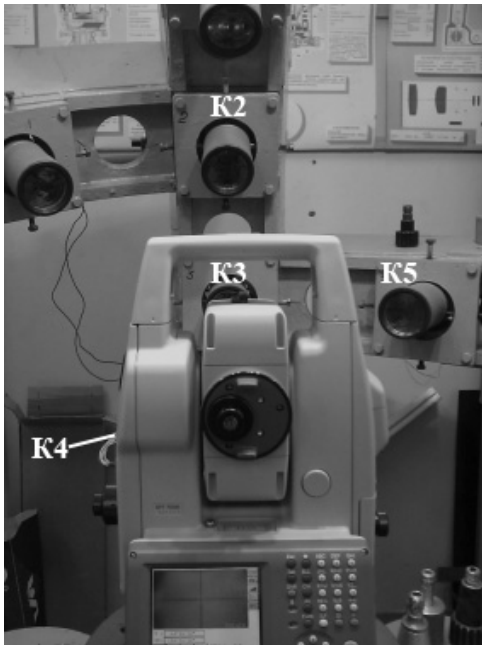


Рис. 11. Topcon GPT-7003i, установленный на коллиматорном стенде.



Рис. 12. Topcon GPT-7003i, установленный на экзаменаторе.

В результате лабораторных исследований тахеометра установлено:

- СКП измерения горизонтальных направлений тахеометром одним приемом при двух положениях круга составляет $2,7''$, СКП измерения вертикального угла - $2,5''$, что значительно больше СКП измерения угла в поле зрения МПИ, что свидетельствует о перспективе повышения точности измерений в случае применения МПИ в качестве микрометричного устройства;
- значение коллимационной погрешности при наблюдениях целей на различных зенитных расстояниях не превосходит допусков инструкции при высокоточных измерениях азимутов;
- рабочий диапазон электронного уровня составляет $4'$, цена деления электронного уровня (рис. 13) меняется в пределах $0,15''$.

Таким образом, по результатам выполненных в данной главе лабораторных инструментальных исследований и полевых наблюдений получены основные данные, характеризующие качество и возможности тахеометра как полевого астрономического инструмента нового типа при его использовании для выполнения точных автоматизированных наблюдений.

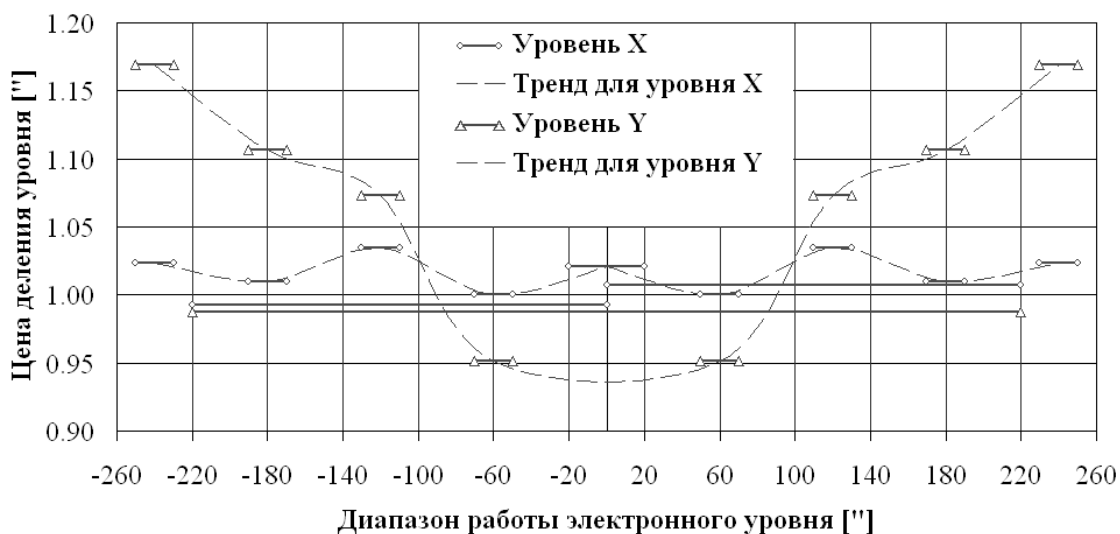


Рис. 13. Результаты определения цены деления электронного уровня.

Глава 4. Реализация метода видеоизмерений в геодезической астрономии

В главе приведены результаты исследования способа Ф.Н. Красовского для точного определения астрономического азимута, результаты разработки модифицированного способа Красовского и экспериментальных наблюдений с ним. Выполнена разработка методики определения точного астрономического азимута при помощи электронных тахеометров, а также реализован на практике метод видеоизмерений.

Начиная с середины XX века усилия специалистов в области геодезической астрономии направлены на совершенствование существующих способов астрономических определений путем автоматизации процессов наблюдений небесных светил. Данная работа заключалась в применении новых инструментов и приборов, создании новых методов астрономических определения широты, долготы и азимута, создании средств и методов для регистрации изображений небесных светил или моментов их прохождений, использовании современных вычислительных средств при обработке результатов наблюдений.

Как показали проведенные в диссертационной работе исследования, на сегодняшний день основные характеристики электронных тахеометров отвечают современным требованиям астрономо-геодезических наблюдений.

Способ Ф.Н. Красовского наиболее удобен для решения поставленных задач. Суть способа заключается в измерении горизонтального угла между вертикалами двух звезд, нахождении значения часового угла одной из звезд (Полярной). По значению часового угла и известной широте пункта наблюдения можно получить азимут звезды, а затем и азимут земного предмета, при этом необходимо знать широту пункта наблюдений.

Применение способа определения широты совместно со способом Красовского позволяет определять точный астрономический азимут на пунктах с неизвестными координатами без дополнительной привязки к Всемирному времени.

По результатам исследований выгоднейших условий наблюдений, проведенной априорной оценки точности и экспериментальных наблюдений с помощью астрономических теодолитов (АУ 2/10, ДКМЗ-А) обосновывается вывод, что модифицированный способ Красовского, предлагаемый автором, позволяет решать поставленную задачу.

Результаты экспериментальных определений астрономического азимута модифицированным способом Красовского с помощью электронных тахеометров Topcon GTS-802A и GPT-7003i приведены на графиках рис. 14 и рис. 15 и в табл. 1.

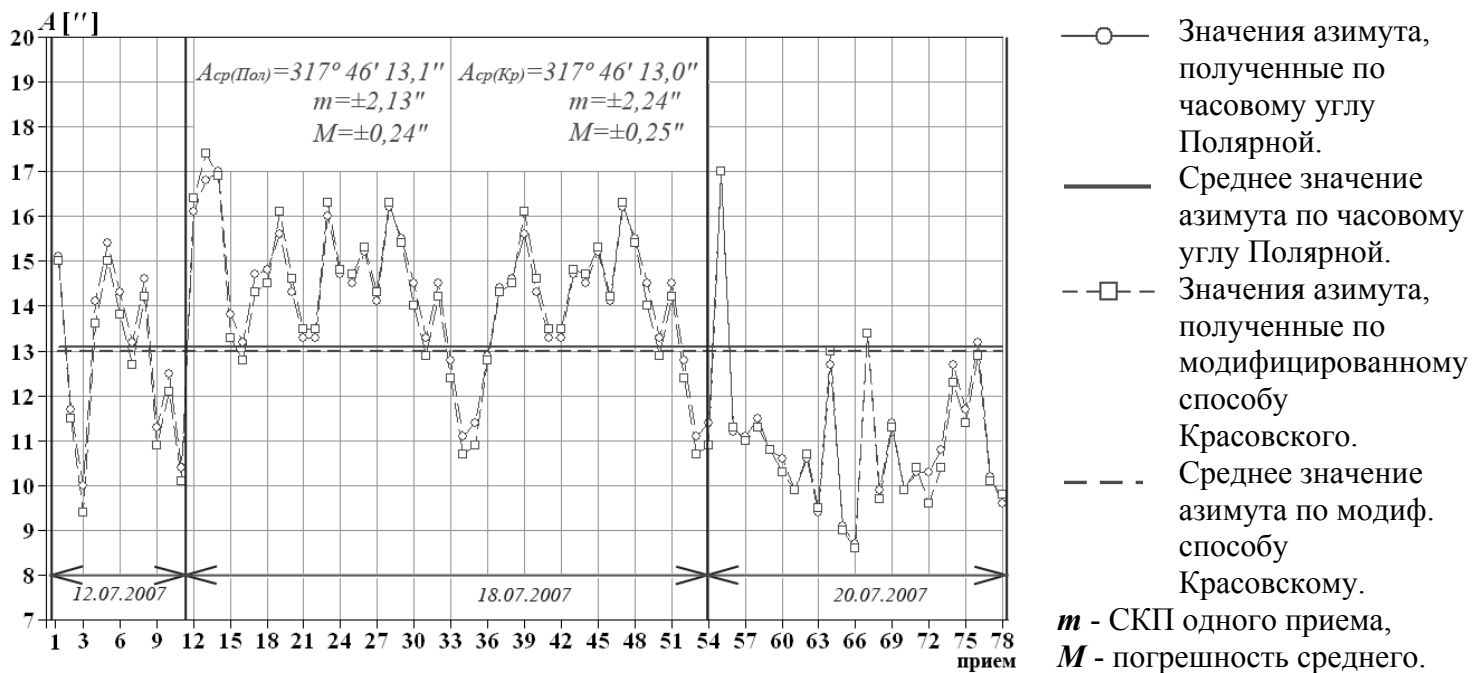


Рис. 14. Результаты определения астрономического азимута земного предмета с помощью Topcon GTS-802 с 12.07 по 20.07.2007 г. Визуальные наблюдения.

СКП визуальных определений азимута одним приёмом составили $m = \pm 1,5 \div 2,0''$ для электронного тахеометра Topcon GTS-802A и $m = \pm 2,5 \div 3,0''$ для Topcon GPT-7003i, что соответствуют угловой точности данных инструментов. На графиках представлены значения азимутов земных предметов, полученные по часовому углу Полярной, а также в результате совместного определения азимутов и широт пунктов наблюдений модифицированным способом Красовского.

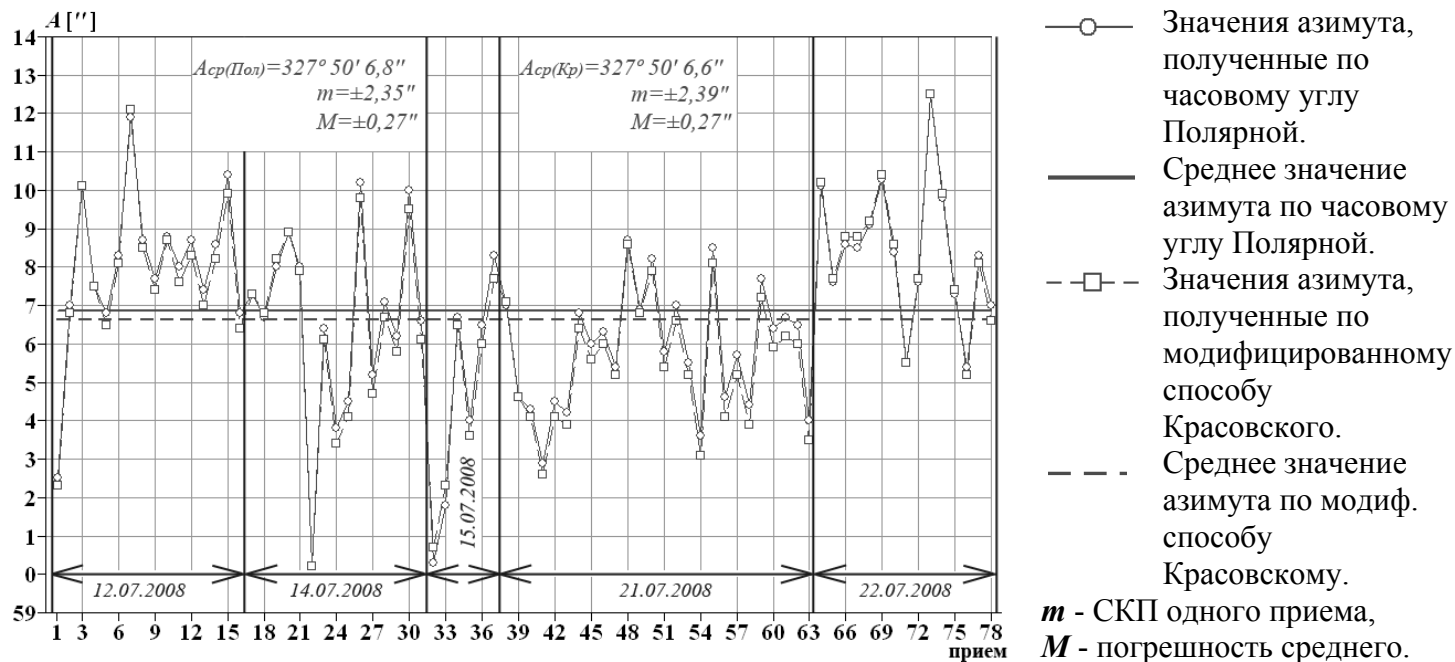


Рис. 15. Результаты определения астрономического азимута земного предмета с помощью Торсон GPT-7003i с 12.07 по 22.07.2008 г. Визуальные наблюдения.

В июле 2008 г. проведена серия наблюдений на тахеометре Торсон GPT-7003i с применением МПИ, расположенного в зрительной трубе прибора.

Обобщенные результаты обработки наблюдений с помощью Торсон GPT-7003i с 12.07 по 22.07.2008 г. представлены на рис. 15 - 16 и в таблице 1.

На графиках рис. 15 представлены результаты, когда наблюдения звёзд и земного предмета выполнялись визуально. Результаты определения астрономического азимута земного предмета тем же инструментом с применением метода видеоизмерений представлены на рис. 16.

На графиках рис. 15 выявляются систематические изменения результатов визуальных наблюдений азимута земного предмета.

При применении МПИ видно, что колебания значений азимута в приёмах и колебания от суток к суткам оказались меньше, чем в случае визуальных наблюдений. СКП определения азимута одним приёмом при этом уменьшилась в 1,5-2 раза.

Среднее значение азимута за пять ночей, полученное модифицированным способом Красовского с применением метода видеоизмерений отличается от среднего при визуальных наблюдениях на $0,2''$, а его отличие от результата, полученного по часовому углу Полярной, не превышает $0,4''$.

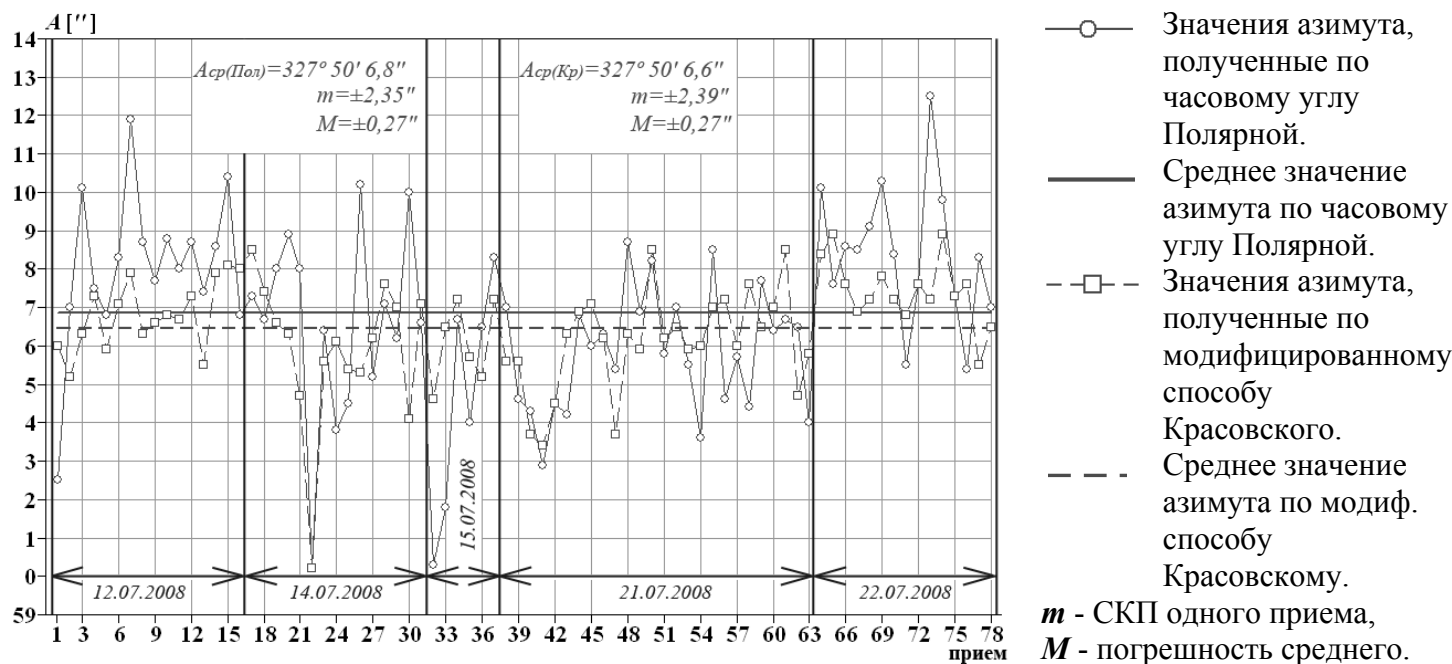


Рис. 16. Результаты определения астрономического азимута земного предмета с помощью Торсон GPT-7003i с 12.07 по 22.07.2008 г. Метод видеоизмерений.

Таблица 1 – Обобщенные результаты определения астрономического азимута модифицированным способом Красовского с помощью электронных тахеометров

Год	Инструмент	Дата	Число приёмов	Среднее значение азимута	СКП одного приема, m ["]	Погрешность среднего, M ["]
2007	GTS-802A	12.07	11	317° 46' 12,57"	1,93	0,58
		18.07	43	317° 46' 14,20"	1,64	0,25
		20.07	24	317° 46' 10,98"	1,78	0,36
		12.07 - 20.07	78	317° 46' 12,98"	2,24	0,25
2008	GPT-7003i	12.07	16	327° 50' 07,84" (06,81")*	2,09 (0,91)*	0,52 (0,23)*
		14.07	15	327° 50' 06,37" (05,87")*	2,55 (1,95)*	0,66 (0,50)*
		15.07	6	327° 50' 04,47" (06,07")*	2,71 (1,08)*	1,11 (0,44)*
		21.07	26	327° 50' 05,51" (06,10")*	1,62 (1,31)*	0,32 (0,26)*
		22.07	15	327° 50' 08,44" (07,43")*	1,91 (0,88)*	0,49 (0,23)*
		12.07 - 22.07	78	327° 50' 06,64" (06,45")*	2,39 (1,40)*	0,27 (0,16)*

* в скобках приведены значения при наблюдениях с применением метода видеоизмерений.

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о перспективности применения метода видеоизмерений в геодезической астрономии.

Для автоматической обработки результатов наблюдений по способу Красовского разработан программный пакет POLARIS (Processing Observation of Light source and Azimuths Receipt from Imaging Station – обработка изображений точечных источников

излучения и наблюдений азимута, получаемых с электронного тахеометра, оснащенного МПИ). Программный продукт (рис. 17) разрабатывался с 2005 года. Программное обеспечение написано в среде программирования Microsoft Visual Studio на языке C# и включает в себя:

- 1) модуль импорта данных, получаемых при наблюдениях на электронных тахеометрах;
- 2) модуль обработки результатов наблюдений различными способами (по часовому углу Полярной, по способу Ф.Н. Красовского, по модифицированному способу Красовского);
- 3) модуль обработки цифровых снимков, содержащих изображения ТИИ;
- 4) модуль составления рабочих эфемерид для облегчения выполнения астрономических наблюдений.

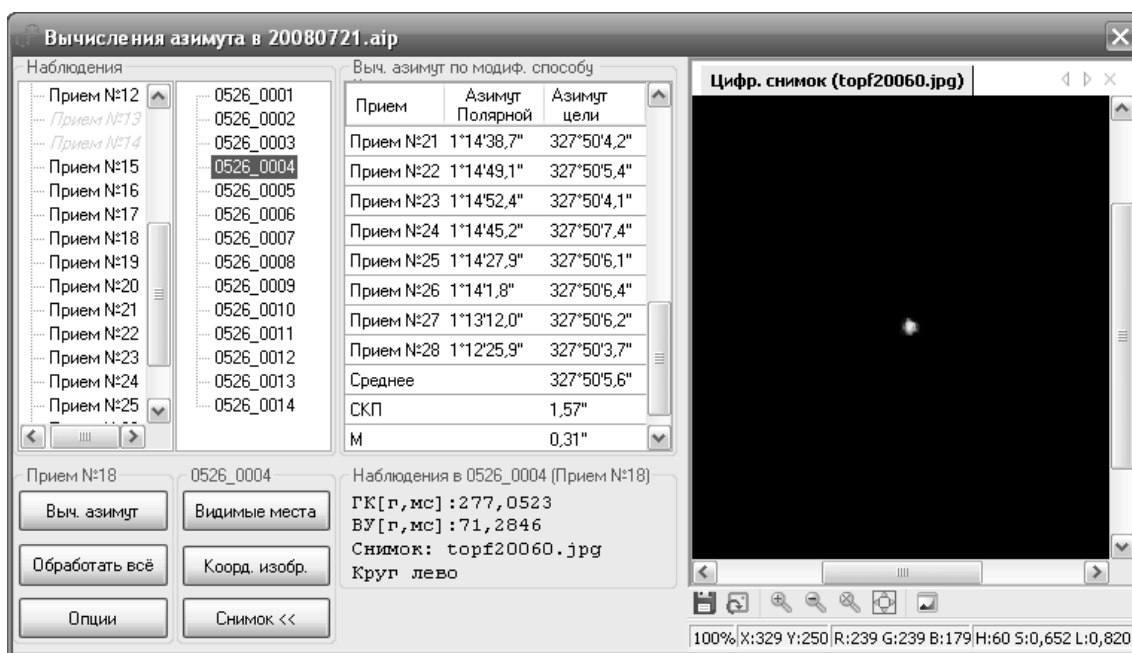


Рис. 17 Вид интерфейса модуля обработки результатов наблюдений.

В настоящее время программный пакет POLARIS позволяет:

- считывать результаты наблюдений с электронных тахеометров фирмы Topcon;
- осуществлять поиск и исключать грубые ошибки, в том числе, ошибки результатов наблюдений;
- обеспечивать автоматическое обнаружение на цифровых снимках изображений ТИИ (звёзд и земного предмета), определять координаты их центров с субпиксельной точностью и вводить соответствующие поправки в отсчеты по кругам инструмента;
- производить обработку результатов и оценку точности в реальном времени.

Реализация метода видеоизмерений и модифицированного способа Красовского, применение роботизированных электронных тахеометров с возможностями регистрации изображений в поле зрения зрительной трубы является существенным шагом к полной автоматизации определений точных астрономических азимутов.

Заключение. Итоги диссертационной работы, полученные автором, показывают, что главная цель и основные задачи исследования полностью достигнуты.

Исследования серийных электронных тахеометров, проведенные в работе, применение разработанных алгоритмов определения положения центра изображения ТИИ, исследования и последующая реализация модифицированного способа Красовского, применение электронных тахеометров с возможностью регистрации изображений в поле зрения позволили создать основу для получения полностью автоматизированной видеоизмерительной системы определения астрономического азимута. Полученные результаты обладают высокой точностью, подтвержденной на основе измерений с применением астрономических теодолитов.

Таким образом, в качестве основных можно выделить следующие результаты диссертационного исследования:

- теоретически обоснована и практически подтверждена возможность применения современных геодезических приборов, оснащенных матричным приемником излучения, для целей геодезической астрономии;
- разработан до возможности практического применения способ определения точного астрономического азимута на пункте с неизвестными координатами с использованием переносных астрономических теодолитов, оснащенных матричным приемником излучения;
- разработана методика лабораторных и полевых экспериментальных исследований точности микрометрических методов видеоизмерений;
- создан программный продукт, позволяющий реализовать предложенные в диссертации методы и алгоритмы.

Итоги диссертационного исследования в полной мере изложены в результатах, выносимых на защиту. Результаты экспериментальных исследований и полевых наблюдений полностью подтвердили теоретические выводы, все основные результаты

обосновывают возможность применения разработок в практике производственных определений астрономического азимута.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- Брагин А.А. Исследование способов определения координат центра изображения точечного источника излучения // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка.–2009.–№ 5.–С. 73-80.
- Брагин А.А., Луповка В.А. Определение точного астрономического азимута по способу Ф.Н. Красовского // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2010.– № 2.– С. 42-50.
- Брагин А.А., Луповка В.А. Определение точного астрономического азимута на пункте с неизвестными координатами //Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2010.– № 4.– С. 51-54.
- Брагин А.А., Луповка В.А. Определение астрономических азимутов с помощью электронных тахеометров // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2010.– № 5.– С. 25-31.
- Баранов В.Н., Брагин А.А. Возможность применения современных технологий в целях автоматизации и повышения точности астрономических определений//Землеустройство, кадастр и мониторинг земель.– 2009.– №1.– С.84-88.
- Баранов В.Н., Брагин А.А. О возможностях применения ПЗС структур в геодезии // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель.– 2009.– №6.– С.71-76.
- Брагин А.А. Возможности применения ПЗС структур для целей автоматизации астрономических наблюдений // Тез. докл. межд. научн.-техн. конф. «Геодезия, картография и кадастр – XXI век», посвященной 230-летию основания Московского государственного университета геодезии и картографии.– М.: МИИГАиК, 2009.– С. 34-35.