

Федеральное агентство по образованию России
Южно-Уральский государственный университет
Архитектурно-строительный факультет
Кафедра градостроительства

А. П. ВОРОШИЛОВ

**СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ
И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТАХЕОМЕТРЫ
В ОБЕСПЕЧЕНИИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ
РАБОТ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ
по образованию в области строительства
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению 270100 «Строительство»*

Челябинск
АКСВЕЛЛ
2007

УДК 528.4 (075.8)
В75

В75 Ворошилов А.П.

Спутниковые системы и электронные тахеометры в обеспечении строительных работ: Учебное пособие. — Челябинск: АКСВЕЛЛ, 2007. — 163 с.

Рассмотрены современные геодезические технологии, основанные на использовании навигационных спутниковых систем, геодезических спутниковых приёмников и электронных тахеометров. Изложены основы устройства и режимы работы геодезических GPS-приёмников, наиболее распространенных типов электронных тахеометров, а также вопросы планирования, проведения измерений и их математической обработки при производстве геодезических работ в строительстве.

Пособие предназначено для инженеров-строителей, геодезистов, а также для студентов строительных специальностей вузов и колледжей, для специалистов, работающих с современными геодезическими данными.

Ил. 41, табл. 10, список лит. — 30 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией архитектурно-строительного факультета ЮУрГУ.

Рецензенты: Ф.Е. Резницкий, В.Е. Коновалов.

УДК 528.4 (075.8)

© Ворошилов А.П., 2007.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

1.1. Автоматизация полевых измерений 8
1.2. Технология обработки геодезических измерений 13
1.3. Особенности применяемых систем координат 19
Контрольные вопросы и задания к главе 1 22

Глава 2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

2.1. Спутниковые радионавигационные системы 25
2.2. Пространственная геоцентрическая система координат ... 32
2.3. Пространственная трилатерация 36
2.4. Измерение времени прохождения сигнала 39
2.5. Основные источники погрешностей
в геодезических спутниковых определениях 43
2.6. Относительные и дифференциальные методы
спутниковых определений 48
2.7. Геодезические приёмники 55
2.8. Планирование и проведение измерений 61
2.9. Обработка результатов спутниковых измерений 69
Контрольные вопросы и задания к главе 2 76

Глава 3. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ И ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

3.1. Электронные тахеометры 77
3.1.1. Тахеометры 3Та5Р УОМЗ 81
3.1.2. Тахеометры TS3300DR Trimble 86
3.1.3. Тахеометры SET30R Sokkia 90
3.2. Поверки электронного тахеометра 95
3.3. Производство измерений электронным тахеометром 101

| | |
|---|-----|
| 3.4. Обработка результатов измерений | 108 |
| 3.5. Безотражательные лазерные дальномеры | 113 |
| Контрольные вопросы и задания к главе 3 | 115 |

Глава 4. КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

| | |
|--|-----|
| 4.1. Интеграция средств геодезических измерений | 117 |
| 4.2. Производство измерений при внецентренной установке станции | 121 |
| 4.3. Совершенствование технологии геодезических разбивочных работ | 128 |
| 4.4. Передача на монтажные горизонты осей и отметок электронными тахеометрами | 134 |
| 4.5. Измерение осадок зданий и сооружений электронными тахеометрами | 140 |
| 4.6. Измерение крена зданий электронным тахеометром | 146 |
| 4.7. Съёмка электронным тахеометром планового и высотного положения подкрановых путей | 149 |
| Контрольные вопросы и задания к главе 4 | 156 |
| Литература | 157 |
| Список сокращений | 159 |

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы геодезических измерений и графического отображения полученной информации на бумажных носителях остались в прошлом. Современное геодезическое обеспечение инженерно-строительных изысканий, проектирования и строительства различных объектов, а также инвентаризации, кадастра и оценки объектов недвижимости базируется на использовании принципиально новых геодезических приборов и технологий, геодезических информационных систем пространственных баз данных. Все полевые измерения и съёмки выполняются сейчас электронными приборами с автоматической регистрацией результатов, автоматизированы и все последующие процессы геодезического производства.

Замена традиционных средств измерений на электронные привела к появлению новых методов и технологий геодезических работ. Так, применение спутниковых радионавигационных систем и геодезических приемников принципиально изменило методику построения опорных геодезических сетей, а также создания на их основе опорных межевых, маркшейдерских и разбивочных построений. При этом отпала необходимость обеспечивать видимость между пунктами построения, строить высокие сигналы, проводить громоздкие измерения. Резко сократились сроки выполнения геодезических работ, снизилось влияние многих погрешностей, в том числе зависящих от исполнителя.

Спутниковые методы позиционирования в комплексе с тахеометрами и другими электронными приборами получили широкое распространение и в геодезическом обеспечении инженерно-строительных изысканий и проектирования. А применение электронных тахеометров, цифровых и лазерных нивелиров, безотражательных дальномеров на строительной площадке меняет технологию геодезического обеспечения строительства на всех его этапах. При этом изменилась методика разбивочных работ, построения плоскостей и линий, передачи осей и отметок на монтажные горизонты, определения пространственного положения конструкций, проведения исполнительных съёмок.

Совершенствуются методы измерения осадок, различных смещений и деформаций в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Если на геодезических предприятиях и в организациях, занимающихся обеспечением землеустройства и кадастров, переход на новые геодезические технологии почти завершен, то во многих строительных организациях он продолжается или находится в начальном состоянии.

Все это требует новых подходов к преподаванию геодезических дисциплин для строительных специальностей вузов. Однако изучение и усвоение студентами современных средств и методов геодезии сталкивается со слабым обеспечением учебного процесса электронными геодезическими приборами и учебной литературой, соответствующей сегодняшнему уровню геодезического производства. Большинство учебников и учебных пособий по инженерной геодезии, отражают традиционное, во многом устаревшее состояние геодезических работ в строительстве и в других видах инженерной деятельности. Издания учебной литературы, посвященной электронным приборам и современным геодезическим технологиям, крайне редки, а для негеодезических вузов – практически отсутствуют. Информация, связанная с новыми геодезическими приборами, распространяется разными фирмами, в том числе в Интернете, но она носит в основном рекламный характер и не раскрывает сути современных геодезических технологий. Это обуславливает необходимость написания пособия, отражающего современные методы и средства геодезии, основательно изменившиеся за последние годы.

В предлагаемом учебном пособии рассмотрены геодезические работы, выполняемые с применением спутниковых навигационных систем и электронных тахеометров, составляющие сейчас основу всех геодезических определений. В пособии объединены материалы для изучения спутниковых навигационных систем, работающих в них геодезических приемников, а также основных типов электронных тахеометров и пакетов программного обеспечения обработки геодезических данных. Особое внимание обращается на их интеграцию в системах современного геодезического производства. В пособии рассматриваются также особенности автоматизации измерений, их обработки и применения систем координат. На примере Челябинской области выполнена оценка величин искажений геодезической информации в местной кадастровой системе координат. Приведены разработки автора по применению электронных тахеометров при проведении геодезических работ в строительстве.

Для изучения разделов, представленных в пособии, необходимо знание основ инженерной геодезии.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Современные технологии геодезических работ сформировались и развиваются на базе автоматизации всех процессов геодезического производства: полевых измерений и топографических съемок, математической обработки результатов измерений и составления планов и карт, создания баз данных геоинформационных систем (ГИС) и получения прикладной геодезической информации.

Современный уровень автоматизации геодезических работ характеризуется широким распространением электронных тахеометров и спутниковых приемников, цифровых аэросъемочных комплексов, полевых портативных компьютеров, многофункциональных пакетов программного обеспечения. Разрабатываются новые типы электронных геодезических приборов. Так, появление лазерных безотражательных дальномеров обусловило разработку, серийные выпуски и применение в съемочных работах геодезических лазерных сканирующих систем, а при производстве высокоточных прикладных измерений – универсальных измерительных систем MON MOS.

Процессы автоматизации геодезических работ стали непрерывными. Результаты измерений электронными приборами автоматически регистрируются, их файлы передаются на ПК, обрабатываются с использованием соответствующих программных комплексов и экспортируются в информационные системы, например, в ГИС, по ним формируются цифровые модели объектов, электронные топографические планы и карты.

Переход с бумажных планов и карт на электронные полностью заменил традиционные в геодезии камеральные работы на автоматизированные технологии векторизации и цифрования топографических данных. На основе электронных планов формируются слои кадастровой, градостроительной и другой информации. Разработан мощный арсенал программных средств, который постоянно расширяется и мо-

дернизируется. Он обеспечивает автоматизацию всех видов камеральных работ.

Многие приборостроительные компании в настоящее время выпускают геодезические системы, включающие электронные геодезические приборы и универсальные пакеты программ, позволяющие оперативно проводить практически на любом объекте все виды геодезических работ в одной системе. Такие системы характеризуются унификацией автоматизированных средств измерений, обработки и формирования информационных баз данных.

Однако основным импульсом к достижению современного состояния геодезических автоматизированных технологий стало повсеместное применение в нашей стране электронных тахеометров и геодезических спутниковых приемников, которым и посвящено данное пособие. Среди них наибольшее распространение в геодезических работах получила продукция Уральского оптико-механического завода (ФГУП ПО «УОМЗ»), компаний Trimble, Sokkia, Leica, Thales, Nikon, Pentax и других. Высокая точность, надежность, простота эксплуатации электронных геодезических средств способствуют дальнейшему быстрому развитию современных геодезических технологий.

Практически все виды геодезических работ проводятся сейчас электронными приборами. С их появлением работа геодезиста перешла на уровень информационного обеспечения пространственными данными инженерной деятельности разных направлений: кадастра и оценки объектов недвижимости, изысканий, проектирования, строительства, эксплуатации застроенных территорий и других. При этом геодезические спутниковые приемники вытеснили традиционные методы (триангуляции, трилатерации, полигонометрии) построения опорных геодезических, маркшейдерских и межевых сетей. Электронные тахеометры заменили собой традиционные средства линейных измерений, а также оптические теодолиты и нивелиры, обогатив при этом методы и технологии ведения полевых работ.

1.1. Автоматизация полевых измерений

Для автоматизации геодезических полевых измерений и съемок применяются, в основном, следующие геодезические приборы:

— спутниковые геодезические приемники систем ГЛОНАСС и GPS;

- электронные тахеометры;
- лазерные сканирующие системы;
- цифровые аэрофотосъемочные комплексы;
- электронные теодолиты;
- лазерные дальнометры, в том числе безотражательные;
- электронные (цифровые) нивелиры;
- приборы поиска и съемки подземных коммуникаций.

Спутниковые геодезические приемники предназначены для определения координат точек местности по принятым от навигационных спутников радионавигационным сообщениям. С их появлением полностью автоматизирован комплекс полевых геодезических работ при построении новых и сущестующих опорных геодезических сетей (ОГС).

Электронные тахеометры применяются для сгущения ОГС, построения сетей съемочного обоснования, тахеометрической съемки, межевания земель, инвентаризации строений, а также в прикладных геодезических работах.

Лазерные сканирующие системы автоматизировали процессы съемки больших массивов точек и используются для детального отображения сложных фасадов зданий, памятников архитектуры и археологии, положения строительных конструкций.

Цифровые аэрофотосъемочные комплексы применяются для цифровой съемки местности с летательных аппаратов. При этом исключаются фотохимические процессы и использование фотоматериалов. Снимаемая информация регистрируется и через высокоскоростные интерфейсы переносится на автоматизированные рабочие места для последующей обработки и хранения. Возможны одновременные панхроматическая, многоспектральная съемки. На основе снятой информации в автоматизированных системах получают электронные топографические и тематические планы и карты различных территорий и объектов.

В электронных теодолитах автоматизированы считывание с ГК и ВК и регистрация результатов угловых измерений. Применяются они взамен оптических теодолитов. В лазерных дальнометрах автоматизированы линейные измерения. При этом на больших расстояниях используются системы отражателей, а на малых расстояниях измерения возможны в безотражательном режиме.

Электронные (цифровые) нивелиры позволяют применять цифровые технологии при измерении превышений. Они автоматически считывают отсчеты со специальных реек, имеющих RAB-код, регистрируют их в памяти, проводят полевую обработку. Выпускаются высокоточные, точные и технические цифровые нивелиры, инварные, фиброглассовые, деревянные и алюминиевые кодовые рейки. Кроме того, широкое распространение в строительных и монтажных работах получили лазерные нивелиры, обеспечивающие построение видимыми лучами горизонтальных, вертикальных и наклонных плоскостей и направлений.

Приборы поиска и съемки подземных коммуникаций позволяют обнаружить электромагнитное поле, которое задается специальным трассопоисковым генератором в трубопроводах, или имеющееся вокруг силовых кабелей. Комплект таких приборов включает генератор, антенну, приемник. Положение подземной трассы определяется достаточно точно и однозначно. На экране приемника отображаются глубина залегания и сила электромагнитного поля, идущего от коммуникации.

Благодаря автоматизации геодезические полевые измерения электронными приборами проводятся за секунды и их доли. Так, в тахеометрах Sokkia применены технологии автоматизации линейных измерений RED-tech, системы датчиков угловых измерений и RAB-коды, обеспечивающие практически мгновенную (менее 0,5 с) выдачу результатов на дисплей. Даже с учетом времени на установку прибора, его центрирования, наведения на точку работа на станции выполняется в течение нескольких минут.

Управление работой электронных приборов сведено до минимума операций. Они просты в эксплуатации, имеют функциональные и операционные клавиши, жидкокристаллические графические дисплеи, закрепительные и наводящие винты, аналогичные теодолиту. В тахеометрах измерения углов и расстояний осуществляется автоматически, а в геодезических спутниковых приемниках автоматически принимается радионавигационное сообщение. Управление приборами можно проводить дистанционно с внешней беспроводной клавиатуры, что позволяет вести качественные измерения в опасных и стесненных условиях.

Геодезические электронные приборы имеют встроенное программное обеспечение, с использованием которого вы-

полняется начальная обработка информации, полученной прибором при автоматическом считывании с лимбов, нивелирных реек, а также с радионавигационных сообщений от спутников. Кроме того, встроенное ПО позволяет быстро решать целый ряд задач непосредственно на станции в режиме реального времени. В результате традиционное назначение геодезических приборов существенно обогатилось новыми функциями и режимами работы.

Результаты измерений регистрируются и записываются в рабочие файлы. Геодезические приборы имеют внутреннюю и внешнюю память, объем которой достаточен для проведения большего числа измерений (до 10000 точек и более). Полевой журнал встроен в прибор и стал электронным. Кроме памяти прибора может использоваться память контроллера. Контроллер является дополнительным к прибору электронным полевым журналом и портативным компьютером.

Результаты измерений, записанные в файлы прибора или контроллера, передаются на компьютер для дальнейшей обработки. При наличии программного обеспечения автоматизация процессов геодезических измерений и обработки стала, как уже отмечалось, непрерывной.

С электронными приборами измерения может проводить один оператор, особенно с применением безотражательных дальномеров и спутниковых геодезических приемников. Появилась возможность проведения точных дистанционных измерений на ранее недоступные и опасные участки объектов, дистанционно выполнять обмеры строений, съемку пространственного положения конструкций, их деформаций.

Непрерывный процесс автоматизации измерений и обработки исключает грубые ошибки, так как в приборах считывание с лимбов или реек проходит без участия оператора, а запись результатов измерений в память и передача файлов на ПК исключает ошибки ручной записи в журналы, набора данных с клавиатуры, вычислений. Кроме того, в электронных приборах автоматически учитывается ряд систематических поправок, повышающих точность самих результатов измерений.

В последние годы появились новые электронные геодезические приборы — лазерные сканирующие системы, которые при съемках сложных объектов становятся наиболее перспективными. Они устанавливаются на штатив аналогично

тахеометру или на летательных аппаратах аналогично фотокамере. Геодезические сканирующие системы применяют для точной съемки строений, архитектурных памятников, фасадов зданий, пространственного положения строительных конструкций, узлов машин и оборудования.

В лазерных сканерах используются безотражательный лазерный дальномер импульсного типа и сканирующая матрица. Измерения проводятся в трехмерном пространстве с высокой скоростью (от 1000 до 10000 измерений в секунду). Импульсы дальномера проходят через систему двух подвижных зеркал, обеспечивающих вертикальное и горизонтальное движение сканирующего луча. Перемещение и вращение зеркал осуществляется традиционными сервомоторами, которые преобразуют в соответствии с поступившим сигналом управления энергию от источников питания в механическую энергию движения зеркал. При этом разворот зеркал и измеренное безотражательным дальномером расстояние на точку сканирования фиксируются, и по ним вычисляются координаты X , Y , Z . Точность определения координат составляет ± 6 мм на расстояниях до 50 м (сканер Leica HDS 3000). Управление работой геодезического сканера осуществляется портативным компьютером. С каждой станции прибора сканирование может проводиться в горизонтальной плоскости на 360° , а в вертикальной — на 270° . В результате съемки определяются пространственные координаты всех отсканированных точек объекта, совокупность которых образует облако точек.

Для «сшивки» результатов сканирования с нескольких станций проводят определение геодезическими методами координат станций и опорных мишеней, установленных на объекте и сканированных со всех станций. Это позволяет провести совместную обработку результатов всех станций, получить единое изображение облаков точек в одной геодезической системе координат.

Облако точек с координатами содержит не только изображение объекта, но и его пространственные данные: превышения, расстояния между точками, прогибы, наклоны, дефекты конструкций, разрушения элементов архитектуры. По сканированным поверхностям можно построить различные сечения.

1.2. Технология обработки геодезических измерений

Для обработки результатов геодезических измерений, полученных электронными приборами, применяются в настоящее время два режима:

- режим реального времени геодезических определений, обработка измерений выполняется сразу на пункте стояния геодезического прибора;

- режим постобработки, которая выполняется на ПК после завершения всех измерений в геодезическом построении.

Обработка результатов измерений в режиме реального времени выполняется чаще всего на полевом портативном компьютере (контроллере) с использованием его ПО и с привлечением дополнительных данных. Основной целью такой обработки является быстрое получение координат или иных данных на пункте установки прибора. Поэтому могут применяться упрощенные алгоритмы, в обработку включают лишь часть построений, связанных с данным пунктом, уменьшается количество избыточных измерений, неполно учитываются внешние условия и некоторые другие параметры построения и процесса измерений.

Постобработка выполняется после передачи результатов измерений с прибора и контроллера на компьютер и осуществляется по полной программе строгих алгоритмов математической обработки и имеющихся программных пакетов. Результаты, полученные в режиме реального времени, также могут быть подвергнуты строгой постобработке.

Полная математическая обработка результатов геодезических измерений, полученных электронными приборами, включает в себя:

- начальную (первичную) обработку непосредственно измеренных величин, выполняется автоматически на основе встроенного ПО прибора или контроллера;

- передачу данных с прибора или контроллера на компьютер с использованием специального ПО передачи данных, учитывающего их формат;

- предварительную обработку полученных результатов в геодезическом построении с оценкой качества полевых измерений;

- уравнивание геодезических построений на объекте с оценкой точности полученных координат или иных данных;
- обработку геодезических измерений, опирающихся на уравненные построения: границ землепользований, снятых пикетов; массивов; точек строений;
- передачу обработанных пространственных данных в информационные системы (ГИС, ЗИС), а также для нанесения их на электронные планы и карты;
- формирование отчетов по выполненным геодезическим работам на объекте.

Вид первичной обработки непосредственно измеренных величин зависит от применяемого прибора, его программно-обеспечения, методов и режимов измерений. Так, в тахеометрах по измеренным угловым данным и расстояниям в соответствующих режимах могут вычисляться и записываться в память прибора горизонтальные проложения, превышения или координаты точки. Предусмотрены режимы измерений и вычислений для решения ряда прикладных геодезических задач. Так, тахеометры SET030R3 оснащены ПО SDR EXPERT, включающим более сорока прикладных и сервисных программ. А в режиме обратной засечки предусмотрены даже уравнивания.

Поэтому уровень данных, полученных после первичной обработки, может быть разным. Однако все они получены по непосредственным измерениям и дополнительным исходным данным и относятся к конкретной станции прибора. В файлах измерений накапливаются такие данные по всем станциям построения. Для идентификации станций в память прибора вносятся их номера (название) и номера и коды снятых точек.

Передача данных с электронного геодезического прибора на компьютер осуществляется через интерфейсный порт прибора и специальный кабель. На компьютере устанавливается программа передачи данных, соответствующая по формату данных конкретному прибору. Перед запуском программы в ее окна устанавливаются параметры передачи: формат данных, скорость передачи, четность и другие. На приборе устанавливается режим интерфейса и те же параметры передачи. Программа запускается. Аналогично выполняется передача исходных данных с ПК в геодезический прибор. При этом формируется в памяти прибора файл исходных данных.

Дальнейшая обработка выполняется в автоматическом режиме в соответствии с имеющимся программным пакетом. Однако перед окончательной математической обработкой необходимо проанализировать полученные данные, их качество, точность. Принять решение, если потребуется, направленное на повышение точности построения: отбраковать отдельные измерения, снизить их вес при уравнивании или провести перенаблюдение, дополнительные измерения. Поэтому сначала проводится предварительная обработка, а затем уравнивание.

Цель предварительной обработки геодезических построений: введение необходимых поправок в измеренные данные, контроль качества измерений по невязкам фигур, подготовка информации для уравнивания. Измеренные расстояния и угловые направления приводятся к центрам знаков, редуцируются на поверхность относимости (принятый эллипсоид), а затем — на плоскость в проекции Гаусса — Крюгера. Перед обработкой необходимо установить, в какой системе координат будет выполняться обработка геодезического построения. При обработке в системах СК-95 или СК-42 редукиция на поверхность относимости и в плоскость проекции будут выполняться. При обработке в местной системе координат эти редукиции не проводятся, если геодезическое построение расположено в пределах действия местной системы, а сама система координат введена на плоскости. Приведение результатов измерений к центрам знаков обязательны, если применялась внецентренная установка прибора или внецентренное расположение на пунктах построения отражателя и визирной цели. При этом вычисляются и вводятся поправки за центрировку прибора и редукицию визирной цели (отражателя). Приводятся к центрам пунктов измерения, опирающиеся на стенные знаки. При обработке результатов спутниковых измерений перевычисляются из одной системы в другую координаты пунктов, поэтому поправки в измеренные величины за редукицию на поверхность относимости и в плоскость проекции не вводятся.

Уравнивание геодезического построения выполняется по методу наименьших квадратов (МНК). В программных пакетах реализован чаще всего алгоритм параметрического способа уравнивания. Цель уравнивания: получить наилучшие при условии МНК оценки значений измеренных вели-

чин и их функций (координат определяемых пунктов построения) с оценкой их точности. Для уравнивания вводятся координаты исходных пунктов, которые при уравнивании должны оставаться неизменными, используются предварительно обработанные массивы измеренных данных, точностные характеристики.

Алгоритм уравнивания включает в себя следующие действия.

1. Вычисление приближенных координат определяемых пунктов. Для этого используются координаты исходных пунктов и геометрические связи с определяемыми пунктами (ходы, засечки). Приближенные координаты можно также ввести готовые перед уравниванием.

2. Вычисляются веса измеренных данных по формулам:

$$P_\beta = 1; \quad P_S = \frac{m_\beta^2}{m_S^2}, \quad (1.1)$$

где m_β , m_S — средние квадратические погрешности (СКП) измерения горизонтальных углов β и расстояний S соответственно.

Значения m_β и m_S оцениваются по невязкам фигур на стадии предварительной обработки. Если в геодезическом построении число невязок для надежной оценки точности недостаточно, то значения m_β и m_S назначаются по точности применяемых приборов.

3. Составляются параметрические уравнения поправок

$$A\delta X + L = V, \quad (1.2)$$

где A — матрица уравнений поправок; δX — вектор поправок к приближенным значениям координат; L — вектор свободных членов; V — вектор поправок к измеренным элементам.

Матрица A имеет размерность $n \times k$, где n — число измеренных элементов, k — число определяемых координат.

4. Решение системы (1.2) выполняется под условиями МНК по алгоритму

$$\delta X = -(A^T P A)^{-1} \times A^T P L = -R^{-1} A^T P L, \quad (1.3)$$

где A^T — транспонированная матрица A ; R^{-1} — обратная матрица нормальных уравнений; P — веса измеренных данных.

Координаты определяемых пунктов вычисляются по формуле

$$X = X_0 + \delta X, \quad (1.4)$$

где X_0 — приближенные значения координат.

5. Оценка точности проводится путем вычисления m_X — СКП координат определяемых пунктов:

$$m_{X_i} = \mu \sqrt{Q_{ii}} \quad (1.5)$$

где μ — СКП единицы веса; Q_{ii} — обратный вес координаты X_i , определяется по элементам матрицы R^{-1} .

При этом

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i^2}{n - k}}, \quad (1.6)$$

где V_i — поправки к измеренным данным, вычисленные по соотношениям (1.2); $(n - k)$ — число избыточных измерений в сети.

В программных пакетах обработки геодезических сетей реализован чаще всего метод итераций, позволяющий N раз уточнять приближенные координаты пунктов на основании выражений (1.3), (1.4). Итерации заканчивают, если после последнего уравнивания не происходит уменьшения поправки V и значения μ .

Все вычисления по предварительной обработке и уравниванию построения автоматизированы. Для выявления и локализации недопустимых погрешностей в обрабатываемых массивах используются специальные алгоритмы, снижающие риск получения грубых результатов.

Следует отметить, что при малом числе избыточных измерений в геодезическом построении оценка точности координат по формулам (1.6) и (1.5) будет носить формальный характер.

После уравнивания опорного геодезического построения на объекте проводится математическая обработка опирающихся на него построений второго уровня и материалов съемок. В геодезических работах по межеванию и инвентаризации земель вычисляются координаты границ земельных участков по результатам измерений, проводится их контроль, вычисляются площади участков по координатам и геодезические данные: дирекционные углы, расстояния линий границ. Создаются и печатаются документы: план границ земельного участка, государственный акт на участок, таблицы, кадастровые формы и другие данные.

По материалам обработки результатов тахеометрической съемки, а также растровых файлов картматериалов создается и редактируется цифровая модель местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР). На их основе формируется топографический план с использованием электронных библиотек точечных, линейных и площадных условных знаков. При этом материалы межевания, инвентаризации объектов, съемки подземных коммуникаций и других специальных работ распределяются по слоям информационной нагрузки планов, объединенных в иерархическую структуру, включая графические и текстовые данные. По ЦММ и условным знакам полностью строится план в электронном виде, а также разрезы, продольные и поперечные профили. В современных программных пакетах учитываются топологические отношения данных, обеспечивающие их связь, корректность контуров, линейно-узловые представления информации. Полнофункциональные графические редакторы полностью формируют топографический план в соответствии с нормативными требованиями, а также чертежи его отдельных слоев, профилей, поперечников. Материалы выдаются на печать в виде готовых стандартных топографических планов и чертежей.

Для автоматизации обработки результатов геодезических измерений и создания электронных планов и карт применяются многофункциональные программные пакеты: CREDO, Trimble Geomatics Office, Spectrum Survey, ПРИМА, MapInfo, Ингео и другие. На их основе выполняется сопровождение камеральных геодезических работ в автоматическом режиме.

1.3. Особенности применяемых систем координат

В техническом задании на выполнение геодезических работ указывается система координат, в которой должны быть получены представленные результаты. Автоматизация обработки геодезических измерений требует четкого понимания применяемых в Российской Федерации, в регионе, на территории городов, районов или промышленных предприятий систем координат. Это позволяет оптимально подобрать и использовать соответствующие модули программного обеспечения, задать необходимые для пересчета координат данные. Кроме того, необоснованное применение некоторых систем координат приводит к существенным искажениям полученной в них информации.

В РФ с 1.07.2002 года применяется общегосударственная система геодезических координат 1995 года, которая обозначается СК-95. До указанного времени, начиная с 1946 года, применялась СК-42. Полный переход из СК-42 в СК-95 не завершен, поэтому встречаются ведомственные и локальные геодезические работы, выполняемые в старой системе координат, что приводит к нарушению принятых в стране постановлений и к путанице в геодезической информации. Расхождения координат одних и тех же пунктов в двух системах могут достигать нескольких метров, а по оси Y и больших значений.

СК-95 введена на поверхности референц-эллипсоида Красовского. Его оси установлены параллельно осям пространственной геоцентрической системы ПЗ-90, а координаты пункта «Пулково» совпадают в СК-95 с координатами в старой государственной системе СК-42. Формулы преобразования из ПЗ-90 в СК-95 рассмотрены в разделе 2.2.

СК-95 получена по материалам совместного уравнивания астрономо-геодезических, космических и доплеровских определений в геодезических сетях по их состоянию на 1991...93 годы. По сравнению с ранее действующей СК-42 пункты опорных геодезических сетей в СК-95 передают координаты на расстояния свыше 1000 км на порядок точнее, при этом отсутствуют региональные деформации сетей, включая имеющиеся снижения их точности до 0,2...0,5 м и более в местах примыкания к рядам триангуляции 1 класса.

Положение пунктов в СК-95 может быть определено следующими координатами:

- $(X, Y, Z)_{95}$ — пространственными прямоугольными;
- $(B, Z, H)_{95}$ — геодезическими широтой, долготой и высотой на референц-эллипсоиде Красовского;
- $(x, y)_{95}$ — плоскими прямоугольными геодезическими координатами в проекции Гаусса — Крюгера;

H_γ — нормальными высотами в Балтийской системе высот 1977 года.

При производстве геодезических работ следует обращать особое внимание на систему координат при привязке к пунктам опорных геодезических сетей, так как пункты сетей сгущения в каталогах могут быть представлены в СК-42.

Геодезические работы в строительстве чаще всего выполняются в местных системах координат (МСК). Местные системы введены на территории отдельных городов, районов и имеют ограничения по их распространению по осям x и y в пределах заданных границ. Введение этих систем выполнено по-разному: перемещением поверхности относимости по высоте, перенесением осевого меридиана по оси y и его разворотом, смещением начала координат по осям x и y , а также комбинацией смещения и разворотов. Каждая местная система имеет свои формулы перехода в СК-42 и СК-95. Прикладные геодезические работы проводятся, как правило, в установленной на данной территории МСК. Эти системы были введены так, чтобы можно было не учитывать поправки в измеренные величины, вызванные проектированием их на поверхность относимости и на плоскость в проекции Гаусса — Крюгера.

Кроме названных МСК введены сравнительно недавно для целей земельного кадастра региональные (областные) МСК на некоторых территориях. Они образованы путем расширения трехградусных зон проекции Гаусса — Крюгера до границ региона (области) по оси y без каких-либо ограничений. Предполагалось сначала использовать такие системы в СК-95, но к началу геодезических работ по обеспечению государственного земельного кадастра каталоги координат в СК-95 не были готовы. Поэтому региональные системы запущены в СК-42. Следует подчеркнуть, что геодезическая и кадастровая информация в этих системах может иметь искажения по сравнению с принятой государственной системой

координат и фактическими данными, особенно вблизи границ растянутых зон.

Оценим величины искажений в региональных кадастровых системах координат (КСК) без учета перехода в СК-95. Рассмотрим их на примере Челябинской области.

Длины D_k линий в КСК не будут совпадать с фактическими расстояниями S на местности на величину ΔD , состоящую из поправок:

$$\Delta D = \Delta D_h + \Delta D_H + \Delta D_{ГК}, \quad (1.7)$$

где ΔD_h — поправка за наклон (превышение) линий; ΔD_H — поправка за редукцию расстояния на поверхность относимости; $\Delta D_{ГК}$ — поправка за редукцию расстояния на плоскость в проекции Гаусса — Крюгера.

При этом $D_k = S + \Delta D$, а составляющие поправки ΔD можно оценить по формулам:

$$\Delta D_h = -\frac{h^2}{2S}; \quad (1.8)$$

$$\Delta D_H = -\frac{H_m - H_o}{R} \times D; \quad (1.9)$$

$$\Delta D_{ГК} = \frac{Y_m^2}{2R^2} \times D \quad (1.10)$$

где D — горизонтальное проложение линии S ; h — превышение между ее крайними точками; H_m — средняя отметка точек линии; H_o — отметка поверхности относимости; R — средний радиус кривизны референц-эллипсоида Красовского в районе работ; Y_m — среднее удаление линии от осевого меридиана.

Поправка ΔD_h может быть оценена по превышению h , которое определяется по каталогу координат, и не связана с системой координат.

Поправка ΔD_H в соответствии с формулой (1.9) возрастает с увеличением средней отметки района работ. В Челябинской области H_m меняется от 120 метров на востоке

(Октябрьский район) до 1003...1406 м на западе в горных районах (Саткинский, г. Златоуст и другие). Поэтому искажения ΔD_H могут достигать 0,2 м на 1 км.

Поправка $\Delta D_{ГК}$ в соответствии с формулой (1.10) возрастает с удалением Y_m от осевого меридиана КСК. В Челябинской области наибольшее значение Y_m имеет на западе город Аша, для которого $\Delta D_{ГК}$ достигает 0,38 м на 1 км, и на востоке — в Октябрьском районе, достигая искажений 0,58 м на 1 км. Даже в областном центре, г. Челябинске, искажения длин линий $\Delta D_{ГК}$ в КСК составляют 0,08...0,12 м, а в прилегающем к нему Красноармейском районе 0,13...0,32 м на 1 км. Поэтому длины линейных сооружений (автомобильных и железных дорог, линий электропередач, трубопроводов), имеющих немеридианальное направление, будут искажены в КСК на величины, достигающие 40 м на линии Челябинск — Аша и 74 м на пути Шумиха — Челябинск — Аша.

Искажение длин линий приводит и к искажению площадей. Так, по Ашинскому району в КСК площади искажены примерно на 106 га, а по Октябрьскому району на 201 га. Аналогичную оценку можно провести по любому району.

Следует отметить, что приведенные здесь оценки искажений геодезических данных в КСК выполнены только с учетом одной величины $\Delta D_{ГК}$. Величины искажений значительны, поэтому необходим их точный учет, особенно при инвентаризации промышленных предприятий и линейных сооружений, а использование такой КСК в геодезическом обеспечении недопустимо.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 1

1. Назовите основные направления автоматизации современных геодезических работ.
2. В чем состоит непрерывность автоматизации основных процессов геодезического обеспечения строительного производства?
3. В каких геодезических приборах наиболее полно осуществлена автоматизация полевых геодезических измерений? Какие процессы в них автоматизированы?

4. Выделите основные факторы, повышающие качество геодезических работ при измерениях электронными приборами.

5. Какие приборы считаете наиболее перспективными для геодезических работ на строительной площадке и почему?

6. Перечислите основные этапы математической обработки результатов геодезических измерений, выполненных электронными приборами.

7. В чем отличие режима «реального времени» от режима постобработки при математической обработке результатов геодезических измерений?

8. На каком этапе проводится уравнивание при обработке геодезических измерений?

9. В каких системах координат может выполняться обработка геодезических измерений в строительных работах?

Глава 2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

2.1. Спутниковые радионавигационные системы

Системы спутниковых определений координат первоначально развивались для навигационных целей и обеспечивали точность, не превышающую нескольких метров. Однако современные геодезические приёмники, методы математической обработки позволяют определять плановые координаты с погрешностями 5...10 мм, высотные — 15...30 мм и меньше. Их точность удовлетворяет требованиям построения опорных геодезических и межевых сетей, обеспечения кадастровых, землеустроительных, изыскательских и других инженерно-геодезических работ. При этом не требуется обеспечивать взаимную видимость между пунктами, строить над ними высокие сигналы, проводить комплекс точных угловых и линейных измерений. Спутниковые измерения выполняются в любых погодных условиях в течение нескольких минут, что существенно упростило производство полевых работ. Однако для наблюдения навигационных спутников (НС) небесный свод над приёмником должен быть достаточно свободен от застройки и растительности.

Для геодезических определений координат точек местности и различных объектов применяются спутниковые радионавигационные системы (СРНС). Геодезические приёмники работают в основном в системе GPS (Global Positioning System), которая создана и находится под управлением и контролем служб США. Система, являясь глобальной, обеспечивает возможность определения точных координат 24 часа в сутки, она постоянно развивается и модернизируется.

В нашей стране создана СРНС ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система), которая находится под уп-

равлением и контролем служб РФ. Она создавалась в интересах Министерства обороны, однако в 1999 году ей официально придан статус военного и гражданского назначения. Работы по созданию этой СРНС были начаты в середине 60-х годов, а с 1982 года проводились её испытания. В 1995 году практически завершено развертывание системы. К сожалению, за последнее десятилетие число эффективно работающих НС в ГЛОНАСС существенно сократилось, а восстановление системы до проектного штатного уровня (24 НС) шло медленными темпами. Поэтому геодезических приёмников, работающих в ГЛОНАСС, в настоящее время мало. Вместе с тем при разработке ГЛОНАСС использован высокий фундаментальный уровень отечественной науки, благодаря качеству заложенных в ней идей и проектов система обладает потенциалом, превосходящим по ряду параметров GPS. Ряд приборостроительных компаний выпускают геодезические приёмники, работающие в двух системах — GPS и ГЛОНАСС. Опыт их использования показал, что даже в неполной комплектации ГЛОНАСС они превосходят по эксплуатационным показателям односистемные. Наличие даже одного НС ГЛОНАСС в рабочем созвездии спутников существенно повышает точность в режиме RTK. Восстановление ГЛОНАСС ускорилось в 2007 году, появились новые НС «Глонасс-М», разрабатываются «Глонасс-К». В последнее время появились разработки отечественного геодезического приёмника ГЛОНАСС/GPS ГЕО-161 Российским институтом радионавигации и времени. Кроме использования в качестве самостоятельной навигационной системы ГЛОНАСС дополняет GPS, что увеличивает число одновременно наблюдаемых спутников, улучшает геометрические факторы используемых созвездий НС, а в конечном итоге повышается точность геодезических определений.

Разработан проект СРНС Европейского сообщества GALILEO. Решение приступить к её разработке Евросоюз принял ещё в 1999 году, однако оперативной эта система должна стать к 2008 году. Общая стоимость проекта оценивалась в более чем три миллиарда евро. Появление ещё одной навигационной спутниковой системы расширит возможности технологий спутниковых геодезических определений.

СРНС включает в себя три сегмента:

— космический с орбитальной группировкой навигационных спутников;

- наземный комплекс управления и контроля;
- сегмент потребителя.

Космический сегмент GPS состоит из 24 основных и нескольких резервных НС, расположенных на шести орбитах, близких к круговым. В плоскости каждой орбиты спутники равномерно разнесены по долготе через 60 градусов, это позволяет одновременно наблюдать четыре и более НС с любой точки планеты. Период обращения спутников по орбитам 12 часов, высота над поверхностью Земли около 20000 километров.

Полная орбитальная группировка ГЛОНАСС также включает 24 НС, но в трёх орбитальных плоскостях по 8 спутников в каждой. Период обращения 11 часов 15 минут 44 секунды, высота орбиты над поверхностью Земли 19100 км. Время активной работы НС на орбите составляет в среднем 3,5 года. Внешний вид навигационного спутника ГЛОНАСС представлен на рис. 2.1 [25].

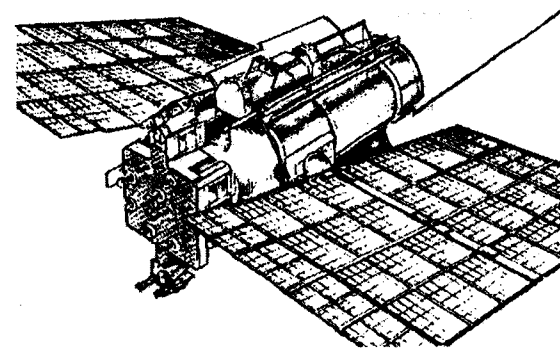


Рис. 2.1. Спутник ГЛОНАСС

Питание всех подсистем производится от солнечных батарей, ширина которых в раскрытом виде составляет 7,23 метра. Служебные системы и специальная аппаратура спутника расположены в цилиндрическом гермоконтейнере диаметром 1,35 метра. Если рассматривать НС в положении штатной ориентации, то в нижней части находится платформа с антенно-фидерными устройствами и уголковыми отражателями, а в верхней — топливные баки и штанга магнитометра. Запуск осуществляется сразу тройки НС, один остаётся на рабочей позиции, а два других разводятся в соседние рабо-

чие точки. Приведение спутника в проектную орбитальную позицию осуществляется длительно в несколько этапов, включающих операции определения параметров орбиты, коррекции, торможения и другие. После приведения в заданное положение с требуемой точностью уточняются параметры орбиты, проводится высокоточная синхронизация бортовой шкалы времени, определяются временные поправки с закладкой их на борт НС. Только после этого спутник включается в сегмент СРНС.

Наземный комплекс управления и контроля в GPS состоит из сети станций слежения, расположенных по всему миру. Имеется главная станция, контрольные станции слежения за НС и станции закладки данных на борт спутника. Станции слежения оснащены высокоточной аппаратурой и регистрируют сигналы, поступающие от всех НС системы, передают результаты на главную станцию, где они обрабатываются. По ним рассчитываются параметры орбит, поправки бортовой шкалы времени, уточняются параметры модели тропосферы и ионосферы. Вычисленные необходимые поправки передаются на борт НС. Проводится непрерывный мониторинг работы спутников.

Благодаря надёжному комплексу контроля и управления обеспечивается постоянная бесперебойная работоспособность системы, периодически обновляется содержание радионавигационных сообщений всех спутников, уточняются их эфемериды и параметры синхронизации. Служба мониторинга включает НС GPS и ГЛОНАСС.

Геодезический сегмент потребителей состоит из геодезических приёмников, пакетов программного обеспечения, наземных постоянно действующих базовых станций (сетей), сообщества пользователей. Всю аппаратуру, принимающую радионавигационные сигналы спутников, по назначению, определяемым величинам и точностным характеристикам можно подразделить на геодезическую, навигационную и туристско-бытовую. Геодезические приёмники могут работать в одной системе (например, GPS или ГЛОНАСС), в двух системах: GPS + ГЛОНАСС. А в дальнейшем предполагается использование трёх систем: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO. Производятся измерения на одной частоте L1 или на двух частотах L1 и L2, определения выполняются по кодовой или фазовой информации полученного сигнала.

Наибольшую точность обеспечивают геодезические двухчастотные приёмники, работающие одновременно по фазе и кодам. Навигационные приёмники наряду с координатами определяют дополнительные навигационные параметры движущегося объекта, их точность ниже геодезических и оценивается величинами от долей до десятков метров. Туристско-бытовые приёмники обеспечивают более низкую точность.

Навигационные спутники с участием наземного комплекса управления и контроля формируют **радионавигационное сообщение**, сигналы которого непрерывно передаются потребителям от всех НС и несут фазовую и кодовую информацию в виде P и C/A кодов. Кроме того, радионавигационное сообщение содержит оперативную цифровую информацию: признаки достоверности данных, эфемериды НС, поправки к ним, частотно-временные поправки к бортовой шкале, время, к которому относятся эфемеридные данные и поправки, альманах спутников, ионосферные поправки и другие. Совокупность всех сигналов, излучаемых системами НС, образует в околоземном пространстве радионавигационное поле, в котором работает принимающая аппаратура.

СРНС постоянно развиваются и совершенствуются. Начаты работы по пополнению и модернизации ГЛОНАСС, выпуску работающего в этой системе геодезического оборудования. В GPS проводится совершенствование кодовой информации, добавлен C/A-код на L2, M-код на L1 и L2, вводится третий гражданский сигнал на L5. Модернизируется орбитальная группировка НС запуском спутников Block II F и Block III, повышается точность поправок на службах слежения и контроля.

Аппаратура потребителя принимает от НС GPS радионавигационное сообщение, которое передается кадрами ёмкостью 1500 бит и длительностью 30 секунд. Каждый кадр состоит из пяти субкадров (блоков) по десять слов, слово занимает 30 бит. Длительность субкадра 6 секунд. Каждый субкадр начинается словом TLM (телеметрия), оно содержит признаки работоспособности НС и системы. Далее идёт HOW (hand-over word) — ключ, который содержит данные временной метки.

Первый субкадр содержит признаки кодовой информации на частоте L2, характеристики точности спутника в ис-

кусственных единицах, параметры временных поправок НС, коэффициенты модели ионосферного влияния.

Второй и третий субкадры содержат данные эфемерид НС. Эти эфемериды являются предвычисленными и могут быть уточнены при постобработке данными, опубликованными на сайте GPS Интернета.

Четвёртый субкадр содержит служебные и резервные сообщения, которые закрыты для гражданских пользователей, а также параметры времени ионосферной модели в системе UTC.

Пятый субкадр содержит альманах спутников системы и информацию об их работоспособности. Альманах включает в себя информацию обо всех спутниках системы для планирования последующих наблюдений и содержит приближённые параметры эфемерид. Этот массив информации является суперкадром, так как занимает 37500 бит и длится 12,5 мин. В процессе измерений альманах записывается приёмником автоматически, если за время его работы блок информации альманаха прошёл.

Эфемериды НС — астрономические данные об орбите и положении на ней спутника в заданный момент времени (эпоху наблюдения). Эфемериды всех спутников навигационной системы формируются по данным наземных станций слежения и передаются станциями закладки информации в память бортовых компьютеров НС примерно через каждый час. Эфемериды каждого спутника радионавигационного сообщения относятся к эпохе t_0 , указанной в кадре, и содержат GPS следующие данные: корень квадратный из большой полуоси эллипса орбиты; эксцентриситет орбиты; прямое восхождение восходящего узла орбиты и скорость его изменения; угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора и скорость его изменения; среднюю аномалию на данную эпоху; отклонение среднего движения спутника от предвычисленного; элементы для вычисления поправки в аргумент широты, а также в радиус и угол наклона орбиты спутника.

По полученным приёмником эфемеридам вычисляют прямоугольные координаты НС по формулам теоретической астрономии (небесной механики). На практике это осуществляется программным обеспечением, поставляемым потребителю с геодезическими приёмниками. В GPS за положением спутников системы и их орбитами проводится постоян-

ный контроль в сети контрольных пунктов, в том числе в точной международной сети NGS (национальной геодезической службы США). По их данным формируются точные эфемериды, которые соответствуют времени контроля траектории фактического движения спутников. Поэтому они доступны по прошествии некоторого времени с момента работы приёмника потребителя на объекте.

ГЛОНАСС также имеет модуляцию несущей частоты кодами СТ и ВТ. СТ-код стандартной точности аналогичен С/А-коду GPS, ВТ-код высокой точности аналогичен Р-коду.

Каждый НС ГЛОНАСС имеет атомный стандарт частоты, на основе которого формируются бортовая шкала времени и радионавигационные сигналы с частотами L1, L2, соответственно равными 1600 МГц и 1250 МГц.

Радиопередатчики навигационных сигналов спутников работают на переключаемых несущих частотах с номерами $i = 1, 2, \dots, 24$. В результате образованы узкополосные радионавигационные сигналы в диапазоне 1602,0...1616,0 МГц и широкополосные радионавигационные сигналы в диапазонах 1597,4...1620,6 МГц и 1215,0...1261,6 МГц.

Узкополосный сигнал является открытым для гражданских потребителей и содержит кадры из 15 строк. Один кадр длится 30 секунд, а каждая его строка — 2 секунды. Первый символ каждой строки является начальным для относительного кода, а последние 8 символов служат для проверки и корректировки ошибочных символов строки. В одном кадре передается полный объем служебной информации: признаки достоверности; время начала кадра; эфемеридные данные (координаты спутника и их производные в прямоугольной геоцентрической системе) на момент времени t_0 ; частотно-временные поправки на этот же момент, которые состоят из относительной поправки к несущей частоте сигнала и из поправки к бортовой шкале времени спутника; времени t_0 , которое кратно 30 минутам от начала суток.

Альманах системы содержит время, к которому он относится, параметры орбиты, номер пары несущих частот, поправки шкалы времени. Суперкадр альманаха занимает 5 кадров и длится всего 2,5 минуты, что позволяет более оперативно принимать и обновлять альманах по сравнению с GPS.

Наземный комплекс управления содержит в ГЛОНАСС сеть станций слежения, контроля фаз, квантово-оптических

и других измерений. Он проводит мониторинг всех орбит, уточняет эфемеридные данные НС.

2.2. Пространственная геоцентрическая система координат

В спутниковой геодезии определение координат проводится в пространственной системе координат X, Y, Z (рис. 2.2), начало которой совпадает с центром общего земного эллипсоида (ОЗЭ). Ось Z направлена по малой оси ОЗЭ, ось X лежит в плоскости геодезического меридиана Гринвича и направлена в точку его пересечения с плоскостью экватора ОЗЭ. Ось Y дополняет систему координат до правой, при этом $Y \perp X; Y \perp Z$. В настоящее время применяются два ОЗЭ, что приводит к двум близким, но несовпадающим абсолютно системам: WGS-84 и ПЗ-90.

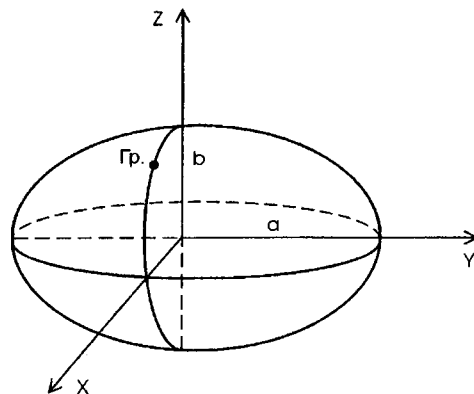


Рис. 2.2. Пространственная геоцентрическая система координат

Геодезические определения координат проводят сейчас в основном в GPS, в которой применяется система координат относительно ОЗЭ WGS-84. В ней

$$a_1 = 6378137 \text{ м}; \quad \alpha_1 = \frac{a_1 - b_1}{a_1} = 1 : 298,257223563;$$

$$f_{M_1} = 398600,8 \times 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2,$$

где a — большая, b — малая полуоси, α — полярное сжатие ОЗЭ, f_{M_1} — геоцентрическая гравитационная постоянная.

В ГЛОНАСС в Российской Федерации применяют ОЗЭ «Параметры Земли 1990 г.» (ПЗ-90). В ней

$$a_2 = 6378136 \text{ м}; \quad \alpha_2 = \frac{a_2 - b_2}{a_2} = 1 : 298,257839303;$$

$$f_{M_2} = 39860044 \times 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2.$$

Значения f_M используются при вычислении координат X, Y, Z спутника по их радионавигационным эфемеридам.

Для преобразования прямоугольных пространственных координат из первой системы во вторую применяется соотношение, которое в матричной форме имеет вид

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \end{pmatrix} + (1 + \Delta m) \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_1, \quad (2.1)$$

где $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_1, \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_2$ — координаты в 1-й и 2-й системах; $\begin{pmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \end{pmatrix}$ —

вектор смещения начала 2-й системы относительно 1-й; Δm — изменение масштаба систем; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — угловые элементы разворота 2-й системы относительно 1-й для обеспечения их параллельности (в радианной мере).

По данным анализа результатов измерений в двух системах координат и применения совмещенного приемника ГЛОНАСС/GPS получены следующие элементы матричного преобразования системы ПЗ-90 в систему WGS-84 [23]:

$$\Delta x_0 = 0,0; \Delta y_0 = 0,0; \Delta z_0 = 1,0 \text{ м}; \Delta m = 0,00;$$

$$\omega_x = 0,0; \omega_y = 0,0; \omega_z = -1,0 \cdot 10^{-6} \text{ радиан.}$$

Поэтому формулы преобразования координат этих систем имеют вид:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS-84} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -1,0 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 1,0 \cdot 10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ПЗ-90}; \quad (2.2)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ПЗ-90} = - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & +1,0 \cdot 10^{-6} & 0 \\ -1,0 \cdot 10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS-84}. \quad (2.3)$$

Все геодезические работы на территории РФ выполняются в общегосударственной системе координат на референц-эллипсоиде Красовского в СК-42 и в СК-95. В них

$$a_3 = 6378245 \text{ м}; \quad \alpha_3 = \frac{a_3 - b_3}{a_3} = 1 : 298,3.$$

Элементы матричного преобразования из системы ПЗ-90 в СК-42 имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \Delta x_0 &= +25,0; \quad \Delta y_0 = -141,0; \quad \Delta z_0 = -80,0 \text{ м}; \\ \Delta m &= (0,00 \pm 0,25) \cdot 10^{-6}; \quad \omega_x = 0,0''; \\ \omega_y &= -0,35'' = -1,7 \cdot 10^{-6} \text{ рад}; \quad \omega_z = 0,66'' = -3,2 \cdot 10^{-6} \text{ рад}. \end{aligned}$$

Система координат СК-95 установлена так, что ее оси параллельны осям геоцентрической системы ПЗ-90, а начало совпадает с СК-42 в пункте Пулково. Поэтому формула (2.1) для вычисления пространственных координат в СК-95 имеет вид

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{СК-95} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ПЗ-90} - \begin{pmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

где $\Delta X_0 = 25,90$; $\Delta Y_0 = -130,94$; $\Delta Z_0 = -81,76 \text{ м}$.

Пространственные геоцентрические координаты X, Y, Z связаны с геодезическими координатами B, L на референц-эллипсоиде и геодезической высотой H над поверхностью эллипсоида соотношениями

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cdot \cos L; \\ Y &= (N + H) \cos B \cdot \sin L; \\ Z &= \left(\left(\frac{b}{a} \right)^2 N + H \right) \sin B, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где
$$N = \frac{a^2}{(a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B)^{\frac{1}{2}}};$$

a, b — большая и малая полуоси эллипсоида. Обратные преобразования имеют вид:

$$\begin{aligned} L &= \arctg \frac{Y}{X}; \\ B &= \arctg \frac{Z + (e')^2 b \cdot \sin^3 \Theta}{P - e' \cdot a \cdot \cos^3 \Theta}; \\ H &= \frac{P}{\cos B} - N, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}; \quad (e')^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}; \quad P = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad \Theta = \arctg \frac{Z \cdot a}{P \cdot b}.$$

На практике для вычисления B и H используют также метод итераций.

Координаты B, L должны быть преобразованы в плоские прямоугольные координаты x, y в проекцию Гаусса — Крюгера, которые и применяют в качестве плоских прямоугольных геодезических координат в РФ. Плоские прямоугольные координаты x, y по геодезическим B и L можно вычислить по формулам, приведенным, например, в работе [23].

Преобразование координат предусмотрено в большинстве программных пакетов обработки геодезических данных. Так, в ПО CREDO ТРАНСКОР выполняется переход между пространственными геоцентрическими системами WGS-84 и ПЗ-90, а из них — в геодезические координаты B, L и в плоские прямоугольные x, y в системах СК-95, СК-42. Программа определяет также параметры трансформации по пунк-

там опорных сетей, если координаты их известны в разных системах координат.

Следует обратить внимание на определение высот. Величины H , вычисленные по пространственным прямоугольным координатам, формулы (2.5) и (2.6), представляют собой геодезическую высоту: высоту точки земной поверхности над рассматриваемым эллипсоидом, отсчитанную по нормали к его поверхности. Однако высоты, полученные по материалам нивелирования земной поверхности и приводимые в геодезических каталогах и на топографических картах, относятся к системе нормальных высот, которая применяется в нашей стране. Нормальные высоты в РФ отсчитываются от поверхности квазигеоида Земли (рис. 2.3) в Балтийской системе высот 1977 года.

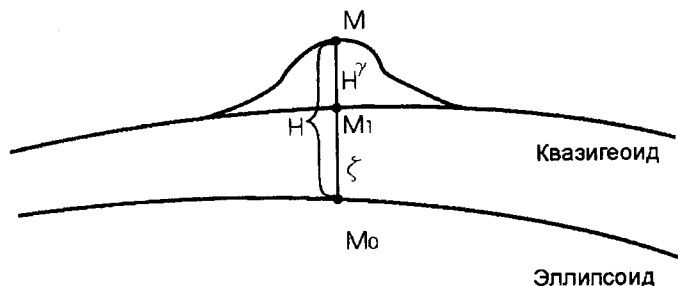


Рис. 2.3. Системы высот

При этом геодезическая высота H определяется соотношением

$$H = H^\gamma + \zeta, \quad (2.7)$$

где H^γ — нормальная высота точки; ζ — аномалия высоты (превышение квазигеоида над эллипсоидом). Величина ζ связана с аномалией гравитационного поля и меняется в зависимости от координат и составляющих уклонений отвесной линии. В целом значения ζ для разных территорий РФ определены. Однако для ОЗЭ и референц-эллипсоида Красовского они могут не совпадать.

2.3. Пространственная трилатерация

В основе определений координат точек местности по навигационным спутникам лежит геодезическое построение

трилатерации. Так как это построение рассматривается в пространственной системе координат X, Y, Z , то представляет собой пространственную трилатерацию (рис. 2.4). При этом координаты НС, участвующие в построении, известны по их эфемеридам. Требуется определить координаты точки P . В трилатерации должны быть измерены расстояния «НС — точка P », которых требуется для решения задачи не менее четырех.

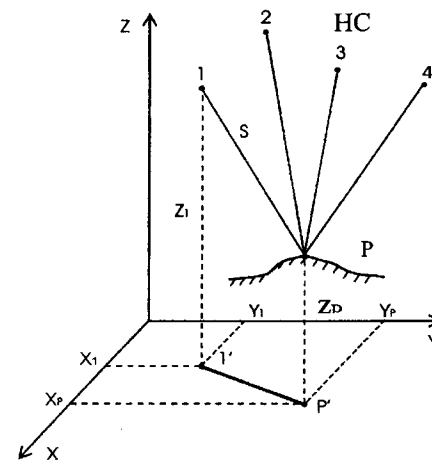


Рис. 2.4. Пространственная трилатерация

Для уравнивания геодезических пространственных построений трилатерации параметрическим способом составляются уравнения связи измеренных (S) и определяемых (X_p, Y_p, Z_p) параметров. Для линии S_{iP} по рис. 2.4 можно записать

$$S_{iP}^2 = (X_i - X_p)^2 + (Y_i - Y_p)^2 + (Z_i - Z_p)^2, \quad (2.8)$$

где S_{iP} — измеренное расстояние от i -го спутника до точки P ; X_i, Y_i, Z_i — пространственные координаты этого спутника; X_p, Y_p, Z_p — пространственные координаты точки P .

Аналогичные уравнения составляются на другие спутники построения. Поэтому число таких уравнений будет равно числу засекаемых с точки P спутников. От каждого НС приемник получает и фиксирует радионавигационное сообщение.

Расстояние S_{iP} определяется на основании формулы

$$S_{iP} = c(\tau_{iP} - \Delta T_P) = D_{iP} - c \cdot \Delta T_P, \quad (2.9)$$

где c — известная скорость распространения радионавигационного сигнала; τ_{iP} — измеренное приемником время прохождения сигнала; ΔT_P — поправка часов приемника в точке P ; D_{iP} — псевдодальность (pseudorange).

ΔT_P характеризует расхождение шкал времени НС и приемника. При этом все НС синхронизированы между собой с достаточной точностью. Синхронизация всех приемников с НС привела бы к их существенному удорожанию. Поэтому ΔT_P остается в выражении (2.9) неизвестным, а вместо расстояния S_{iP} приемником фактически измеряется псевдодальность D_{iP} .

Измеренная псевдодальность содержит значительные систематические погрешности, для основных из них определяют с требуемой точностью значения по специальной методике и учитывают в виде поправок δD_{iP} в псевдодальность. Для измеренных псевдодальностей уравнения (2.8) примут вид

$$D_{iP} = \sqrt{(X_i - X_P)^2 + (Y_i - Y_P)^2 + (Z_i - Z_P)^2} + c\Delta T_P + \delta D_{iP}, \quad (2.10)$$

в которых содержится четыре неизвестных величины: X_P , Y_P , Z_P , ΔT_P . Значит, уравнений вида (2.10) должно быть не менее четырех. В геодезических определениях используют всегда больше четырех НС, это позволяет уравнять построение пространственной трилатерации по методу наименьших квадратов.

Построение пространственной трилатерации представляет собой обратную пространственную линейную засечку, в которой вместо исходных «твердых» пунктов традиционного построения на местности используются НС, координаты которых определены по эфемеридным данным радионавигационного сообщения и в решении задачи считаются известными. Аппаратура потребителя принимает сигналы от достаточного числа спутников, обрабатывает их, измеряет псевдодальность D , получает поправки δD , вычисляет на их основе координаты точки стояния приемника X_P , Y_P , Z_P . По пространственным координатам вычисляются геодезические

координаты B_P и L_P и высота точки P над общим земным эллипсоидом \dot{N}_P в системе координат WGS-84 или ПЗ-90. Эти координаты перевычисляют на референц-эллипсоид Красовского и в плоскость проекции Гаусса — Крюгера, а также в местную систему координат.

В некоторых геодезических работах используются спутниковые измерения только для определения плановых координат X и Y . В этом случае количество неизвестных сокращается, можно уменьшить и число необходимых НС. Однако при этом необходимо знать геодезическую высоту H над используемым эллипсоидом, так как от H непосредственно зависят пространственные координаты X и Y в соответствии с выражениями (2.5). Значит, погрешности геодезической высоты приведут к увеличению погрешностей плановых координат X и Y определяемой точки.

2.4. Измерение времени прохождения сигнала

Время τ прохождения сигнала от спутника до приёмника должно быть измерено с погрешностями меньше, чем 1×10^{-10} секунды. Достичь такую точность можно на основе шкалы атомного времени и специального временного обеспечения спутниковой системы.

Одна секунда атомного времени в метрологии равна 9192631770 периодам колебаний, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями атома цезия 133. В системах ГЛОНАСС и GPS применяется всемирное координированное атомное время UTC (Universal Time Coordinated), которое измеряется атомными часами, но скоординировано с реальным астрономическим временем. Шкала атомного времени поддерживается атомными часами и является равномерной. Однако реальное астрономическое время, отслеживаемое международной службой вращения Земли, не столь равномерно, как атомное, и за несколько лет их отличие достигает одной секунды. Тогда равномерно текущее атомное время согласуют с астрономическим, изменив показания атомных часов ровно на 1 секунду.

Полученное время и называют координированным, кроме того, UTC является всемирным (гринвичским) временем.

Временное обеспечение спутниковой системы включает:
— формирование шкалы времени системы ГЛОНАСС, GPS;

— формирование бортовой шкалы времени на каждом спутнике;

— определение частотно-временных поправок к шкале каждого НС, их передача на борт для включения в радионавигационное сообщение.

Стабильность шкалы времени ГЛОНАСС обеспечивает Центральный синхронизатор на основе сверхточного водородного атомного стандарта частоты и радиотехнических измерительных станций. Относительная среднеквадратическая погрешность среднесуточных значений частоты не превышает 3×10^{-14} .

Шкала времени GPS определяется цезиевыми стандартами Главной станции управления и контроля. В этой системе установлено время GPST, которое ведет отсчет от 0 часов 6.01.1980 года.

Бортовая шкала времени формируется на каждом спутнике системы атомным стандартом частоты. Чаще всего применяется цезиевый генератор частоты, установленный на спутнике. Он задаёт стандарт частоты f_0 , с которым когерентно связаны несущие частоты $L1$ и $L2$ радионавигационного сообщения. Так, в GPS на спутниках генерируются колебания с частотой $f_0 = 10,23$ МГц. Сигналы НС образованы несущими частотами:

$$L1 = f_0 \times 154 = 1575,42 \text{ МГц} ; \lambda_1 = 19 \text{ см} ,$$

$$L2 = f_0 \times 120 = 1227,60 \text{ МГц} ; \lambda_2 = 24 \text{ см} .$$

Стабильность бортовой шкалы времени может оказаться недостаточной для точных определений координат. Поэтому её уточняют поправками, которые определяют на наземных станциях слежения и передают на борт каждого НС по каналам станции связи. Полученные частотно-временные поправки существенно повышают точность измерения времени прохождения сигнала от спутника и достаточно точно синхронизируют шкалы времени всех НС системы. Определяют поправки к бортовой шкале времени относительно шкалы времени ГЛОНАСС и шкалы времени GPST, их закладывают на борт НС несколько раз в сутки. Эти поправки содержатся в радионавигационном сообщении, идущем от НС к потребителю.

Время прохождения сигнала от спутника до приёмника потребителя измеряется двумя способами, называемыми кодовым и фазовым:

— по запаздыванию, которое определяется сопоставлением принятых псевдослучайных кодов и их копий, генерируемых в приёмнике;

— по разности фаз на несущих частотах принятого и опорного сигналов.

В системе GPS передатчики НС излучают два непрерывных сигнала на частотах $L1$ и $L2$. Используется фазовая манипуляция этих несущих частот, позволяющая формировать модуляцией два специальных дальномерных кода (Р-код и С/А-код) на каждой частоте.

Р-код (protected) обеспечивает метровую точность определения координат, а при дифференциальных методах измерений — дециметровую, но является защищенным, доступ к нему ограничен. С/А-код (clear acquisition) открыт для пользования, но обеспечивает меньшую точность. Раньше он передавался только на $L1$, его точность была снижена до сотен метров преднамеренно (селективный доступ). Р- и С/А-коды представляют собой двоичную псевдослучайную последовательность с тактовой частотой 10,23 МГц и 1,023 МГц соответственно. Сигналы GPS занимают в L -диапазоне две полосы шириной по 20,46 МГц, в центре которых находятся частоты $L1$ и $L2$.

Измерение времени прохождения сигнала от спутника до приёмника потребителя кодовым способом осуществляется сопоставлением кодов полученного сигнала и их копий, генерируемых приёмником. Временная задержка τ между одинаковыми участками кода в радионавигационном сообщении проиллюстрирована на рис. 2.5, где схематично показаны сигналы, имеющие кодовую модуляцию. Сигнал (а) поступил на приёмник со спутника, сигнал (б) — его копия, генерируемая приёмником. Смещение кодов на идентичных по форме сигналах и является временной задержкой τ — временем прохождения сигнала без учета поправок шкалы времени НС и приёмника.

Кодовый способ не обеспечивает высокой точности, поэтому геодезические приёмники работают в основном по фазе несущей частоты. Однако многие из них используют кодовую информацию сигнала при обработке фазовых измерений.

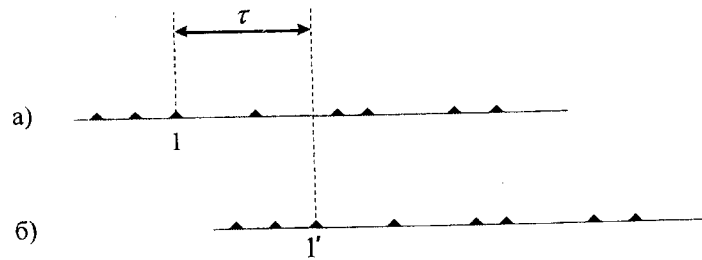


Рис. 2.5. Сопоставление кодов:
 а) код сигнала, полученного от НС;
 б) код опорного сигнала приемника

Измерение времени прохождения сигнала по фазе несущих частот $L1$ и $L2$ основано на том, что фаза φ электромагнитного колебания со стандартной частотой является функцией времени. Если измерить фазы φ_1 и φ_2 на несущей частоте приёмником, то время прохождения сигнала τ определяется из соотношения

$$\tau = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi \times f} + N \times T, \quad (2.11)$$

где φ_2 — фаза сигнала, полученного от спутника; φ_1 — фаза его копии, генерируемой приёмником; f — несущая частота ($L1$ или $L2$); N — число целых периодов колебаний T , совершённых за время τ .

Формула (2.11) содержит число N целых периодов, которое неизвестно. Поэтому возникает неоднозначность в определении τ . Для разрешения неоднозначности применяются специальные приёмы и методики измерений и их математической обработки, усложняющие технологию работ при определении координат этим способом. Они будут рассмотрены в разделе 2.9 пособия. Использование кодовой информации сигнала при обработке фазовых измерений также направлено на разрешение неоднозначности в определении τ .

Высокая точность фазовых измерений обусловлена стабильностью несущих частот, а также погрешностью измерения фазы, равной примерно 1° . Длина волны сигнала (λ) соответствует периоду T , или $\Delta\varphi = 360^\circ$. Тогда в линейной мере погрешность $m_{\Delta\varphi} = 1^\circ$ составляет 0,53 мм на $L1$ и 0,67 мм на $L2$. Даже при наличии погрешностей от других источников точность определения координат по фазе несущей остаётся в пределах нескольких миллиметров.

В рассмотренных способах измерения используется опорный сигнал, генерируемый приёмником. В геодезических определениях необходим опорный сигнал со стабильными несущими частотами, идентичными $L1$ и $L2$. Поэтому геодезические приёмники содержат точные генераторы опорных сигналов, чаще всего кварцевые. Относительная погрешность их частот составляет 1×10^{-10} . Кварцевым опорным генератором обеспечивается шкала времени приёмника. Поправки к этой шкале относительно шкалы системы при измерениях остаются неизвестными. Как отмечалось, они входят в уравнение (2.10) и определяются при их совместном решении при постобработке.

2.5. Основные источники погрешностей в геодезических спутниковых определениях

Точностные характеристики полученных координат точек местности зависят от погрешностей измерения времени прохождения сигналом пути НС — приёмник, погрешностей эфемерид, погрешностей пространственной трилатерации, погрешностей шкалы времени, ионосферных и тропосферных влияний, а также от применяемых приёмников, режимов и методов геодезических GPS определений. Сначала рассмотрим основные источники погрешностей при абсолютных геодезических определениях.

Средняя квадратическая погрешность положения пункта в пространстве X, Y, Z определяется из уравнивания пространственной трилатерации соотношением

$$M^2 = \begin{pmatrix} M_X^2 \\ M_Y^2 \\ M_Z^2 \end{pmatrix} = \mu^2 \begin{bmatrix} Q_{XX} & K_{YX} & K_{ZX} \\ K_{XY} & Q_{YY} & K_{ZY} \\ K_{ZX} & K_{YZ} & Q_{ZZ} \end{bmatrix} = \mu^2 Q, \quad (2.12)$$

где μ — СКП единицы веса; Q_{XX}, Q_{YY}, Q_{ZZ} — обратные весовые коэффициенты определяемых координат; K_{ij} — ковариационные моменты.

При $K_{ij} = 0$ матрица значений Q представляет собой след обратной матрицы нормальных уравнений

$$Q = (A^T \times P \times A)^{-1}, \quad (2.13)$$

где A — матрица коэффициентов уравнений поправок, составленная по частным производным функции (2.10); P — весовая (ковариационная) матрица погрешностей измерений псевдодальностей; A^T — транспонированная матрица.

СКП единицы веса μ в формуле (2.12) обуславливается в основном погрешностями измерения псевдодальностей. Если μ задать априори, то СКП положения пункта определяется элементами $Q_{ij}^{1/2}$, которые отражают влияние геометрии построения и распределения весов измеренных величин на точность координат. Так как в пространственной трилатерации с одной точкой P (рис. 2.4) геометрия построения определяется расположением спутников, то, предполагая измерения равноточными, элементы $Q_{ij}^{1/2}$ можно рассчитать по альманаху спутников на проектируемый момент наблюдений. Из соотношения (2.12) следует, что $Q_{ij}^{1/2}$ являются коэффициентами, понижающими точность уравненных значений μ за счет геометрического фактора. В построениях пространственной трилатерации можно принять $Q_{xx} = Q_{yy}$, они характеризуют точность координат горизонтальных (плановых) определений, а Q_{zz} — высотных. При этом Q_{zz} в несколько раз превышает Q_{xx} в пространственной трилатерации. В обработке геодезических GPS определений распространено программное обеспечение американских фирм, поэтому рассмотренные коэффициенты геометрического влияния получили названия:

PDOP (Position Dilution of Precision) — геометрический фактор снижения точности при определении местоположения в пространстве; HDOP (Horizontal Dilution of Precision); VDOP (Vertical Dilution of Precision) — его горизонтальная и вертикальная составляющие

$$HDOP = \sqrt{Q_{xx} + Q_{yy}}; \quad VDOP = \sqrt{Q_{zz}}; \quad (2.14)$$

$$PDOP = \sqrt{Q_{xx} + Q_{yy} + Q_{zz}}. \quad (2.15)$$

При уравнивании построений в качестве дополнительного неизвестного в исходные уравнения (2.10) входит поправка

часов приемника, поэтому матрица Q в общем случае четвертого порядка. Для времени рассматривается аналогичный коэффициент $TDOP = \sqrt{Q_{TT}}$.

Подбирая рабочие созвездия спутников для GPS-определений по альманаху, следует стремиться к уменьшению соответствующих коэффициентов DOP. Оптимальный PDOP обеспечивается, если три НС расположены невысоко над горизонтом и примерно симметрично относительно четвертого НС, находящегося в зените. Коэффициенты быстро возрастают, если спутники «собираются» в одном участке неба или «выстраиваются» в прямую линию. Однако существуют конфигурации, уменьшающие HDOP и увеличивающие VDOP, а также уменьшающие VDOP и увеличивающие HDOP, что следует учитывать при планировании измерений.

Суммарная СКП m_D псевдодальности в спутниковых определениях образована несколькими наиболее значимыми составляющими:

$$m_D^2 = m_{\text{Э}}^2 + m_{\text{ВС}}^2 + m_{\text{ТР}}^2 + m_{\text{ИОН}}^2 + m_{\text{МН}}^2 + m_{\text{АН}}^2 + m_{\text{Ц}}^2, \quad (2.16)$$

где $m_{\text{Э}}$ — СКП эфемеридных данных; $m_{\text{ВС}}$ — СКП поправки времени спутника (синхронизации частотно-временной шкалы); $m_{\text{ТР}}$, $m_{\text{ИОН}}$ — СКП учета задержки распространения радиоволн в тропосфере и ионосфере; $m_{\text{МН}}$ — составляющая СКП, вызванная влиянием многолучевости; $m_{\text{АН}}$ — составляющая СКП, вызванная смещением фазового центра антенны приемника; $m_{\text{Ц}}$ — СКП центрирования.

Современный уровень развития спутниковых навигационных систем, применение наукоемких технологий в геодезических работах, действие Международной геодезической GPS службы, достижения геодезического GPS приборостроения позволили свести указанные погрешности к их минимальным значениям. Так, СКП эфемеридных данных и СКП поправки часов спутника удалось снизить за счет наземных станций слежения, равномерно расположенных по всему земному шару. Эти станции принимают сигналы спутников GPS, по которым проводят высокоточные измерения расстояний до всех НС. Результаты измерений собираются главной станцией, обрабатываются и используются для точных расчетов эфемерид и текущих поправок к ним. Так же определяются корректирующие поправки бортовой шкалы

времени НС. Полученные поправки эфемерид и шкалы времени передаются ежесуточно через наземные станции связи на каждый НС, они далее войдут в полученное приемником от этого НС радионавигационное сообщение и будут учтены при обработке позиционирования. При этом обеспечивается точность поправок эфемерид выше 5 см, а поправок шкалы времени — выше 2×10^{-10} сек.

Тропосферную составляющую СКП снижают путем соответствующих поправок, которые рассчитывают на основании модели тропосферного влияния на распространение радиосигнала. Так, тропосферная поправка в первом приближении определяется по формуле

$$\delta D_{\text{Тр}} = 8,8 \operatorname{cosec} \nu, \quad (2.17)$$

где ν — угол возвышения (наклона) наблюдаемого НС над горизонтом.

Ионосферная составляющая частично компенсируется в измерениях на двух частотах L1 и L2 при вычислении результирующего значения псевдодальности D по формуле:

$$D = \frac{D_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2} \cdot D_2}{1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}}, \quad (2.18)$$

где f_1 и f_2 — частоты несущих сигналов L1 и L2; D_1 и D_2 — псевдодальности, измеренные на этих частотах [25].

Дальнейшее повышение точности осуществляется за счет совершенствования моделей тропосферных и ионосферных влияний и уточнения соответствующих поправок на станциях слежения и контроля. Так, тропосферная поправка дается по данным этих станций каждые два часа с точностью 4 мм. Влияние ионосферной составляющей компенсируется дополнительно в разностях основных уравнений типа (2.10), которые составляются для фазовых измерений с двух пунктов с короткой базовой линией. Эта компенсация особенно важна для одночастотных приемников.

Влияние многолучёвости (многопутности) на СКП псевдодальности вызвано отражением сигнала от объектов, рас-

положенных вблизи точки стояния приемника, это создает интерференцию отраженных лучей с сигналом, пришедшим от спутника. В результате вырастает погрешность фаз несущего сигнала. Для ее снижения в настоящее время выпускают антенны приемников со специальными встроенными отражателями, обеспечивающими подавление возможной многолучёвости. Кроме того, расположение геодезических пунктов не рекомендуется проектировать вблизи объектов с крупными металлическими и отражающими поверхностями, а также где работают мощные радиотехнические устройства на частотах, близких и кратных L1 (1575 МГц). Возможны и другие помехи и шумы при приеме спутникового сигнала. Многие современные геодезические приемники могут устойчиво работать со слабым GPS сигналом, но уровень его не должен быть ниже 6.

Составляющая $m_{\text{АН}}$ в (2.16) вызвана тем, что геометрический центр антенны, находящийся на ее оси вращения, не совпадает с электронным (фазовым) центром, который принимает сигнал и для которого фактически определяются координаты. Для точных и высокоточных геодезических измерений это смещение фазового центра должно быть учтено. В таких работах следует применять приемники с миллиметровой стабильностью фазового центра антенн. Смещение фазового центра указывается в паспорте прибора и учитывается в обработке через программное обеспечение приемника.

При точных статических методах позиционирования приемник устанавливается на штативе. Погрешности центрирования $m_{\text{Ц}}$ снижаются за счет применения выверенных оптических и лазерных центриров. При кинематических и псевдокинематических методах антенна или приемник с антенной устанавливаются на вехе. При наклоне вехи и ее смещении с точки также возникают погрешности центрирования, так как геометрический и фазовый центры антенны при этом будут смещены относительно пункта. Поэтому веха должна быть закреплена над точкой с помощью ножек бипода. Фазовый центр антенны приемника обычно бывает поднят над точкой, поэтому необходимо измерить высоту антенны. Это измерение бесконтрольное, поэтому должно выполняться тщательно и два раза, в начале и в конце сеанса наблюдений. Фазовый центр не совпадает с точкой относимости антенны и по высоте. Высота антенны и ее

высотное смещение фазового центра учитывается через ПО при обработке измерений.

2.6. Относительные и дифференциальные методы спутниковых определений

Определение местоположения по глобальным спутниковым системам принято называть позиционированием. Если в навигации позиционирование включает определение координат и вектора скорости объекта, то в геодезии — только координат. В навигации в основном позиционирование выполняется движущимся приёмником, расположенным на транспортном средстве. Такое позиционирование называется кинематическим.

В геодезии наиболее распространён статический режим, при этом позиционирование выполняется с установленного над точкой и остающегося неподвижным приёмника. Применяются также модификации статического и кинематического позиционирования.

Спутниковые определения координат могут быть абсолютными и относительными. Глобальные спутниковые системы позиционирования позволяют работать в автономном режиме без привязки к пунктам ОГС. Такие измерения будут абсолютными, однако точность их невысокая, поэтому выполняются они в основном кодовыми приёмниками. Обеспечить геодезическую точность при абсолютном методе позиционирования сложно, так как все систематические погрешности (эфмеридные, шкалы времени, модели ионосферы и тропосферы) войдут в определяемую псевдодалность и в координаты, а СКП составит несколько метров.

Статический режим применяется в геодезии в основном при относительных определениях, требующих высокой точности. Используются точные геодезические приёмники, а измерения выполняются на опорном и определяемых пунктах по фазе несущей частоты сигнала. При относительных определениях необходимо два приёмника, один из них устанавливают на опорном пункте с известными координатами (пункте ОГС), другой — на определяемом. Приёмник на опорном пункте называют *reference*-приёмником или базовой станцией, а на определяемом — *rover*-приёмником. Следует отметить, что эти разграничения в названиях приёмников распространены в кинематических и близких к ним режимах, в статике они носят условный характер.

В относительных статических определениях часто используют несколько базовых станций. Применяют три и более приёмников: два устанавливаются на опорных пунктах, координаты которых точно определены и увязаны между собой, а один или два — на вновь определяемых пунктах. Приёмниками засекается пять и более НС. Измерения продолжаются, пока не будет выполнено разрешение неоднозначности, а число спутников и геометрия их расположения не обеспечат требуемую точность позиционирования. Поэтому статические измерения должны быть заранее спроектированы с использованием альманаха, а пункты установки приёмников выбраны так, чтобы сигнал от спутников не блокировал здания, кроны деревьев, а металлические поверхности не создавали многолучевость. Участки неба должны быть максимально открыты вплоть до горизонта. Для статических измерений каждый приёмник устанавливают над точкой на штативе, подставку центрируют по оптическому центру и измеряют высоту антенны. Иногда выполняют несколько сеансов повторных измерений, что повышает качество результатов. Так, в соответствии с инструкцией [11] наблюдения на пунктах при построении каркасной опорной сети проводятся в два сеанса с повторной центровкой антенн приёмников и изменением высоты их установки. Продолжение каждого сеанса от 1 до 3-х и более часов. Измерения на базовом и определяемых пунктах должны выполняться примерно в одно и то же время. Это обеспечивается с помощью мобильной связи и удлинения сеансов работы приёмника на базовом пункте.

В режиме статики используют постобработку и специальное ПО. При совместной обработке наблюдений с базовой и определяемой точек систематические погрешности, имеющие близкие и постоянные значения, в разностях, на которых основаны алгоритмы обработки, исключаются. К ним относятся: погрешности эфмерид и шкалы времени одного и того же спутника, погрешности тропосферных и ионосферных влияний. Следовательно, точность относительных определений будет выше, чем абсолютных.

В относительных измерениях определяют приращения координат между опорным и определяемым пунктами, поэтому важной характеристикой таких измерений является вектор базовой линии. Это трёхмерный вектор приращений

координат между опорным и определяемым пунктами. Координаты от опорного пункта к определяемому передаются через базовую линию, длина которой определяется из построений на этих двух пунктах пространственной трилатерации с использованием одних и тех же НС. СКП передачи координат зависит от длины базовой линии и напрямую включает в себя погрешности координат исходного пункта. Погрешности исходных данных будут пренебрегаемо малыми, если координаты базового пункта надёжно определены в геодезических сетях более высокого класса или разряда. Длина базовой линии должна быть ограничена до величин, соответствующих требуемой точности и методу спутниковых определений. Для геодезических приёмников обычно указывают, на какое значение возрастает СКП определения координат с увеличением на 1 км базовой линии D . Например, в режиме статики: $M_{x,y} = (5 + 1 \times D)$ мм для $D < 10$ км; $M_{x,y} = (5 + 2 \times D)$ мм для $D \geq 10$ км.

В соответствии с инструкцией [11] длина базовой линии при построении заполняющей геодезической сети рекомендуется 5...15 км. С увеличением длины базовой линии увеличивают продолжительность сеанса наблюдений.

К статическим методам относятся режимы быстрой статики и реокупации.

Быстрая статика применяется при коротких базовых линиях, а также при некотором снижении требований к точности. Например, координаты границ землепользования достаточно определить с СКП 0,1 м. В этих случаях продолжительность сеанса наблюдений сокращается до 20 минут и менее. Координаты пункта будут определены в режиме статики, но с меньшей точностью.

Реокупация — измерения, предполагающие возвращения и повторные наблюдения на данном пункте. Программа постобработки предусматривает совместную обработку данных приёмника, полученных в разное время на одном и том же пункте.

Метод «Stop and Go» («Стоять — идти») использует также два приёмника: один неподвижный, а второй перемещается с краткими остановками для позиционирования на определяемых пунктах. Особенность этого метода состоит в том, что оба приёмника непрерывно производят фазовые измерения, в том числе во время перемещения второго приёмника. В конце серии измерений (в течение часа) проводят замыка-

ние хода: подвижный приёмник возвращается в начальный пункт (реокупация), с которого начал измерение. Такая процедура непрерывного позиционирования ускоряет инициализацию, измерения идут быстро, а замыкание обеспечивает контроль и некоторое повышение точности. Проводится совместная обработка файлов результатов позиционирования обоими приёмниками. Следует отметить, что точность методов с элементами кинематики ниже относительных статических определений. Однако она вполне удовлетворяет требованиям съёмки и межевания земель.

Для обеспечения точности, однозначности исходных данных, упрощения технологии геодезических полевых работ созданы на отдельных территориях специальные активные сети базовых станций. Так, на территории Германии действует 260 базовых станций службы SAPOS, расстояния между станциями от 10 до 50 км. Это обеспечивает сплошное покрытие всей территории страны системой базовых станций. При решении любых геодезических задач GPS позиционирование выполняется одним приёмником и одним оператором в любом месте. Координаты определяются с сантиметровой точностью и выше в течение нескольких минут [16].

Аналогичные системы базовых станций создаются и на ряде территорий России. В Москве и Московской области начала функционировать спутниковая система межевания земель (ССМЗ). Такая же создаётся в северо-западном регионе (Санкт-Петербург, Ленинградская и Новгородская области). В Московскую ССМЗ входят базовые (референсные) станции, оснащенные GPS приёмниками RS500, спутниковой приёмной двухчастотной антенной AT504 в виде плоского диска, аппаратной связью, вычислительным центром. Базовые станции располагаются на расстоянии 30...80 км одна от другой в помещениях, где поддерживается заданный диапазон температуры и работа аппаратуры в течение суток. Аппаратура работает в автономном режиме и не требует присутствия оператора. Информация со всех базовых станций ССМЗ передается в вычислительный центр. ССМЗ обеспечивает определение координат новых пунктов на территории её действия одним приёмником и одним исполнителем. В ССМЗ осуществляют прокат GPS приемников пользователям [17].

В настоящее время для быстрых измерений в геодезии применяются методы дифференциальных спутниковых оп-

ределений. Они основаны на введении дифференциальных поправок, определяемых базовой станцией, в результаты измерений, выполненных на перемещающихся с пункта на пункт приёмниках. В основе дифференциальных методов лежит практическое постоянство основных систематических погрешностей измерений, выполненных на один и тот же НС с близко расположенных пунктов. Эти систематические погрешности определяются на базовом пункте по измеренным псевдодальностям, его координатам и координатам спутника, по ним формируются дифференциальные поправки в измеренные в это же время псевдодальности на определяемом пункте.

Режим реального времени определения координат RTK (Real Time Kinematic) также основан на введении в псевдодальность дифференциальных поправок. Их передают по каналам связи от базовой станции или активной сети станций на определяемые пункты. Позиционирование в RTK длится несколько секунд, поэтому приёмник (или его антенну) устанавливают над определяемым пунктом на вехе, имеющей круглый уровень. Результаты позиционирования обрабатываются сразу на пункте на полевом компьютере (контроллере), имеющем программное обеспечение. При этом учитываются полученные дифференциальные поправки. RTK не требует постобработки, хотя в ряде случаев она применяется дополнительно для повышения точности результатов. Приёмник перемещают на следующий пункт объекта. Так как базовая станция — пункт ОГС, то координаты будут определены относительно его. Поэтому такие определения являются дифференциальными относительными.

В зонах действия активной сети базовых станций (ССМЗ, SAPOS и др.) позиционирование в RTK можно выполнять одним приёмником, перемещая его при съёмке с пикета на пикет. В сети ССМЗ дифференциальные поправки получают с ВЦ системы, которые ПО интерполирует по нескольким базовым пунктам, то есть применяется сетевая структура коррекции данных.

При установленной связи с ВЦ и достаточном количестве НС определение координат пикета занимает несколько секунд. С учётом времени на переходы с пикета на пикет, установку вехи с антенной в вертикальное положение, нажатие кнопки управления, пометки в абрисе съёмка пикета зани-

мает минуты. Связь ВЦ с пользователями, работающими в режиме реального времени, осуществляется по мобильной связи «Мобильные Теле Системы» (МТС). Применяется система пакетной передачи данных GPRS, если территория покрыта GSM связью. Используются для передачи данных также радиомодемы, а при постобработке связь с ВЦ можно установить через Интернет.

В дифференциальных режимах спутниковых определений, в том числе в RTK, погрешности положения пункта зависят от погрешностей дифференциальных поправок, применяемых приёмников, режимов обработки, длины базовой линии и других факторов. Точность таких определений существенно возрастает в пределах действия активных спутниковых геодезических сетей. В технических характеристиках геодезических приёмников обычно указывают СКП в режиме RTK. Например, большинство приёмников Trimble обеспечивают $M_{x,y} = (10 + 2 \times D)$ мм, где D — длина базовой линии, км.

Отдельно следует остановиться на навигационных дифференциальных подсистемах, которые в последние годы развиваются очень быстро. Они применимы в геодезических работах, если не требуется высокой точности позиционирования.

Существуют широкозонные дифференциальные подсистемы WAAS, EGNOS, MAAS, GNSS, а также региональные и локальные подсистемы. Последние могут обеспечивать дециметровую точность.

WAAS (Wide Area Augmentation System) — американская дифференциальная подсистема, обеспечивающая североамериканский континент и Северную Атлантику. Она включает наземные широкозонные контрольные станции, ведущие мониторинг за состоянием сигналов GPS спутников. С них проводятся двухчастотные измерения псевдодальностей для всех НС системы. Информация передается на главную станцию, где обрабатывается, определяются дифференциальные поправки к эфемеридным данным, шкалам времени, к параметрам ионосферной модели. Эти поправки через станции передачи данных передаются на геостационарные космические аппараты (ГКА). ГКА передают GPS-подобный сигнал пользователям (в диапазоне L1 на частоте 1575,42 МГц), который увеличивает доступность, точность и надёжность навигационных определений дополнительными измерениями

ми псевдодальностей до ГКА. Кроме того, ГКА передает сформированные наземными контрольными станциями дифференциальные поправки.

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) — европейская дифференциальная подсистема, выполняющая аналогичные WAAS функции на Европейском континенте. Основу EGNOS составляют геостационарные спутники связи, ретранслирующие навигационный сигнал, соответствующий L1 GPS. EGNOS предусматривает работу с HC систем ГЛОНАСС, GPS и GALILEO. ГКА EGNOS IOR имеют зону покрытия, охватывающую европейскую и часть азиатской зоны России.

MSAS (Multi-Transport Satellite based Augmentation System) — многофункциональная широкозонная дифференциальная подсистема Японии. Её назначение и функции в основном аналогичны WAAS и EGNOS, она обеспечивает дифференциальной информацией регион Японии и Тихого океана между Азией и Америкой. Геостационарные космические аппараты этой подсистемы многофункциональные. Их зона действия охватывает большую часть азиатской территории Российской Федерации, прилегающие моря и акватории Тихого океана.

Многие геодезические приёмники предусматривают возможность работы как с базовой станцией при точных работах, так и с использованием сигналов геостационарных спутников дифференциальных подсистем при требованиях к точности в несколько метров. Так, приёмник Pro Mark 2, выпускаемый ПО УОМЗ, обеспечивает в статике при работе с базовой станцией точность 5 мм + 1 ppm, а в режиме WAAS/EGNOS — 3...5 м. Имеются многоканальные геодезические приёмники, принимающие по 9...12 каналам сигналы GPS спутников и дополнительно несколько каналов для сигналов WAAS/EGNOS. Метровая точность каналов дифференциальных определений удовлетворяет требованиям рекогносцировки, поиска пунктов геодезических сетей и коммуникаций.

Региональные и локальные дифференциальные подсистемы имеют меньший радиус действия, чем широкозонные, состоят из меньшего числа контрольно-корректирующих станций и геостационарных спутников, передающих потребителю GPS-подобные сигналы и дифференциальные поправки. Они чаще всего предназначены для обеспечения навигации

в конкретных условиях региона и для выполнения других видов работ. Применение таких дифференциальных подсистем в геодезии может обеспечить точность определения координат порядка нескольких дециметров. В европейских странах созданы подсистемы, формирующие дифференциальные поправки: OmniSTAR, LandSTAR, EuroFix и другие.

В качестве примера можно привести спутниковую дифференциальную подсистему OmniSTAR компании Furgo. Она базируется на сети контрольно-корректирующих (дифференциальных) станций и геостационарных спутниках, передающих полученные со станций дифференциальные поправки. При этом формируются направленные пучки передачи над определенными территориями. OmniSTAR обеспечивает на территории Западной и Восточной Европы передачу RTK-поправок для геодезических определений с сантиметровой точностью. Такая система распространяется и на южные регионы РФ, так как в 2004 году введены в действие дифференциальные станции в Харькове и в Баку. При удалении от дифференциальных станций до 1000 км точность определения координат составляет 0,5—2 м. Однако на большинстве территорий действия системы обеспечивается дециметровая точность даже при использовании кодовых приёмников. Это позволяет применять дешёвые и простые в эксплуатации приёмники типа GPS Pathfinder Pro XR для сбора кадастровой информации и инвентаризации трубопроводов без организации базовой станции [13].

2.7. Геодезические приёмники

Для определения координат точек местности с точностью, удовлетворяющей геодезическим требованиям, применяются специальные геодезические приёмники. Такие приёмники осуществляют захват сигнала от навигационных спутников, измеряют по фазе несущей частоты псевдодальность, по ней и по дополнительно полученной информации вычисляются координаты.

В геодезии используются фазовые приёмники, так как в настоящее время только они обеспечивают миллиметровую и сантиметровую точность позиционирования. Наряду с фазовыми существуют кодовые приёмники, работающие по P- и C/A-кодам, они широко распространены в навигации, но в

геодезии имеют ограниченное применение. Следует отметить, что современные геодезические приёмники измерения ведут по фазе и дополнительно по кодам сигнала, ускоряя тем самым процесс позиционирования.

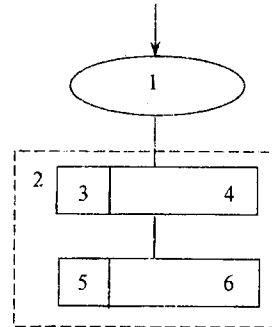
Приёмники подразделяют на двухсистемные, работающие по спутникам ГЛОНАСС/GPS одновременно или отдельно, и односистемные, работающие только по НС одной системы. В настоящее время наиболее распространены в геодезии односистемные GPS-приёмники. Вместе с тем в РФ с 2003 года начал выпуск двухсистемного приемника GEO-161, имеющего ряд преимуществ, к двухсистемным относятся также приёмники типа Legacy-E-2484 и другие. С развитием систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO многосистемные приёмники в геодезических работах станут более перспективными.

Кроме того, геодезические приёмники подразделяют на одно- и двухчастотные, одно- и многоканальные. В одночастотных измерения псевдодалности выполняются по одной частоте сигнала, а в двухчастотных — на частотах $L1$ и $L2$ одновременно. Двухчастотные приёмники требуют меньше времени на инициализацию и позиционирование, обеспечивают высокую точность. К двухчастотным приёмникам относятся Trimble 4000Ssi, Trimble 5700, Trimble 5800, Z-MAX и другие.

Одноканальные приемники захват сигналов осуществляют последовательно по каждому НС. Многоканальные одновременно отслеживают и принимают сигналы от созвездия спутников, включающего до 8—12 НС. В настоящее время выпускаются, в основном, многоканальные приемники, которые имеют дополнительные каналы приема сигналов от геостационарных спутников.

Схематично структура геодезического спутникового приёмника представлена на рис. 2.6. Антенный блок принимает радионавигационные сообщения от НС. Приёмник генерирует сигнал, который сравнивается с сигналом, полученным от спутника. В измерительном блоке определяются разность фаз этих двух сигналов и кодовая задержка. Вычислительный блок проводит первичную обработку полученной информации от всех НС в течение всего времени позиционирования и записывает её в блок памяти прибора. Управление работой всех блоков приёмника осуществляется автоматически.

а) Сигнал НС



б) Сигнал НС

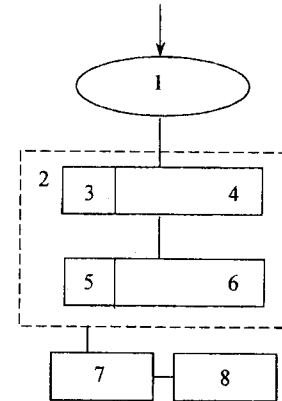


Рис. 2.6. Блок-схемы приёмников:

- а) режим постобработки; б) режим реального времени;
 1 — антенный блок; 2 — приёмник; 3 — генератор опорного сигнала;
 4 — измерительный блок; 5 — блок первичной обработки;
 6 — блок памяти; 7 — контроллер с ПО режима RTK;
 8 — блок связи с базовой станцией

На рис. 2.6 представлены две блок-схемы приёмников, которые различаются применяемым режимом обработки результатов измерений. Если приёмник работает в режиме постобработки, то результаты измерений заносятся в блок памяти приёмника, а по завершении наблюдений передаются в компьютер для постобработки. Для передачи в компьютер приёмник имеет специальные порты подключения и кабель. При полевых работах можно к приёмнику подключить контроллер, с клавиатуры которого вносится информация о пунктах, особенностях наблюдений, высоте антенны.

Если приёмник работает в режиме реального времени, то подключение контроллера обязательно. Кроме того, приёмник должен иметь блок связи, по которому передаётся необходимая для обработки информация с базового пункта на определяемый. Контроллер должен быть оснащён программным обеспечением обработки в режиме RTK. Для связи используют специальные радиомодемы (например, Trimmark Trimble) или каналы мобильной связи.

В настоящее время геодезические приёмники выпускаются разных конструкций. В ряде приборов антенный блок

отделён от приёмника, применяются лёгкие антенны, которые устанавливаются на раздвижной веже и могут быть вынесены над закрывающими небосвод объектами. К таким приёмникам относятся Trimble 5700, Thales 6500, ProMark-2 и другие. В других приборах (Trimble 4600, STRATUS Sokkia) антенна и приёмник объединены в одном корпусе, куда вставляются также элементы питания. Такие приёмники имеют только панель управления, состоящую из клавиши включения и небольшого табло. Наиболее информативна панель управления приёмников Stratus (рис. 2.7), которая позволяет контролировать автоматически протекающий процесс измерений.

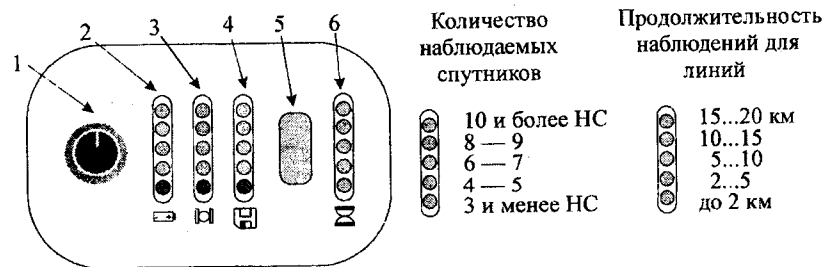


Рис. 2.7. Панель управления приемника Stratus:
 1 — клавиша включения; 2 — уровень зарядки аккумулятора;
 3 — количество наблюдаемых спутников; 4 — объем свободной памяти; 5 — инфракрасный порт; 6 — шкала продолжительности наблюдений

В геодезических приёмниках применяются специальные конструкции антенн с высокой стабильностью фазового центра, чувствительные к GPS сигналам. Для подавления многолучёвости от местных предметов антенны имеют отражающее устройство, применяются микрополосковые конструкции. Такие антенны с высокой стабильностью фазового центра и подавлением влияния многолучёвости могут обеспечивать миллиметровую точность определения координат.

В качестве источников питания используются компактные литиево-ионные аккумуляторы (Stratus) или элементы типа AA (Trimble 4600).

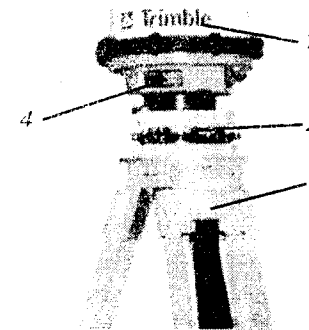


Рис. 2.8. Геодезический приемник Trimble 4600LS на штативе:
 1 — одночастотный приемник со встроенной антенной;
 2 — подставка с подъемными винтами; 3 — штатив;
 4 — панель управления

Геодезические приёмники устанавливаются над точкой на штативе (рис. 2.8) или на веже с круглым уровнем (рис. 2.9). При установке на веже применяется бипод, который делает положение вежи и приёмника устойчивым.

В геодезических работах в нашей стране распространены приёмники ProMark-2 (рис. 2.10), выпускаемые УОМЗ совместно с зарубежными компаниями. Он имеет 10 параллельных каналов, работает по кодам и фазе несущей L1, может отслеживать спутники систем WAAS и EGNOS. Приёмник имеет внешнюю антенну, дисплей, клавиатуру, интерфейсный порт, карту памяти, программное обеспечение Ashtech Solutions. Приёмники ProMark-2 и -3 в режиме статики позволяют определять координаты в плане с погрешностью 5 мм + 1 ppm, а по высоте 10 мм + 2 ppm. Время наблюдений варьируется от 20 до 60 минут, в зависимости от длины базовой линии. В режиме кинематики («Stop and Go») время наблюдений на точке составляет около 15 секунд, а для инициализации достаточно 5 минут.

Наряду с рассмотренными основными геодезическими приёмниками в настоящее время выпускаются малые геодезические приёмники, работающие в дифференциальном режиме и обеспечивающие точность 0,1...0,5 м. Такая точность может удовлетворять в ряде случаев требованиям кадастровых съёмок и инвентаризации земель, особенно вне городских территорий.

К малым дифференциальным геодезическим приёмникам относятся: Trimble GPS Pathfinder Pro XR, Pro XRS, Power, Trimble Ag 132, Geo Explorer CE.

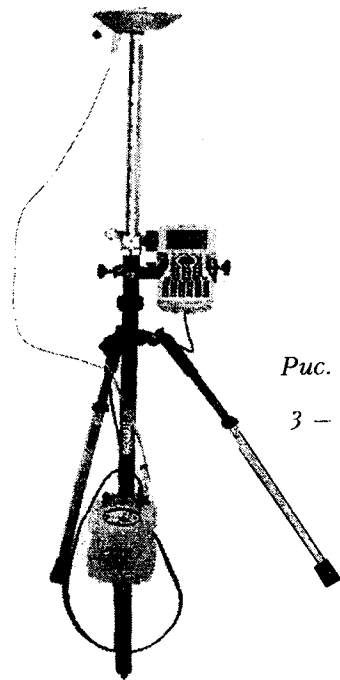


Рис. 2.9. Геодезический приёмник TTS5700:
1 — антенна; 2 — выдвижная вежа;
3 — контроллер; 4 — крепление контроллера;
5 — кабель соединения контроллера с приёмником; 6 — бипод;
7 — кабель соединения антенны с приёмником; 8 — приёмник

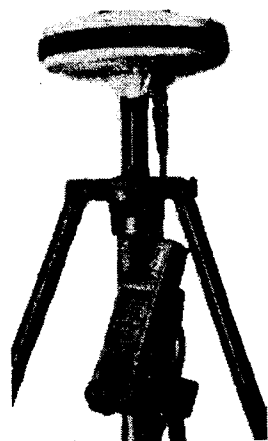


Рис. 2.10. Геодезический приёмник ProMark-2

Эти 12-канальные приёмники имеют малый вес и размеры и дешевле примерно в 1,5 раза основных геодезических приёмников. Они работают в RTK с дифференциальными поправками от FCC, радиомаяков в системах WAAS, OmniSTAR, LandSTAR и других. Приёмники этих серий могут принимать информацию при большом удалении от базовых станций как в кодовом режиме (с метровой точностью), так и с обработкой фазы (с дециметровой точностью) в форматах дифференциальных поправок Pro XRS, RTCM SC-104. Наблюдения должны проводиться не менее чем по 5 спутникам при значении PDOP не более 6, отношении сигнал/шум лучше 6, при углах возвышения НС выше 15°.

В RTK работа такими приёмниками выполняется с контроллером и соответствующим программным обеспечением. Для полевых работ существует несколько типов ПО, обрабатывающих результаты позиционирования малыми дифференциальными приёмниками, например, Asset Surveyor для контроллера TSC1 и др.

Кроме того, системы GPS Pathfinder включают в себя ПО Pathfinder Office, позволяющие проводить планирование, обработку, редактирование и экспорт полученных данных.

2.8. Планирование и проведение измерений

Планирование геодезических работ при использовании GPS приёмников преследует две основные цели: выбор местоположения на объекте опорных и определяемых пунктов; составление графика и программы наблюдений на конкретные дни с учетом радиовидимости и геометрии расположения навигационных спутников.

Планирование геодезических работ начинают с изучения технического задания, в котором регламентируются содержание, основные технические условия, сроки, объем и затраты на проведение работ. Уточняются назначение и требования к точности проектируемого геодезического построения на объекте, система координат и высот.

Проводится сбор материалов топографо-геодезической обеспеченности данной территории, используя данные и архивы территориальной инспекции Госгеонадзора, городских и районных отделов управлений по градостроительству и архитектуре, земельных комитетов, маркшейдерских и про-

ектных отделов промпредприятий. Собираются и анализируются данные по существующим пунктам ОГС, их состоянию, делаются выписки координат и высот из каталогов с указанием года сдачи сети в эксплуатацию, данные оценки точности по материалам уравнивания. Получают топографические карты крупного масштаба или планы, содержащие изображение всей территории района работ.

На топографической карте (планах) наносят существующие пункты ОГС, которые могут быть использованы в данном проекте. Анализируется их состояние, выбираются опорные (базовые) пункты с хорошими условиями для GPS наблюдений, относительно которых будут проводиться определения новых пунктов. По карте проектируются новые пункты с учетом возможности перемещений (подъезда на автотранспорте), отсутствия препятствий и других ограничений для работы приемника, возможностей длительной сохранности пункта. Таким образом, на карте наносится местоположение опорных (базовых) и вновь определяемых пунктов, а также базовых линий проектируемого геодезического построения. Выбираются и обосновываются типы центров для закрепления пунктов на объекте в соответствии с действующими инструкциями [10—12].

При развитии ОГС следует проектировать вектора базовых линий так, чтобы они образовывали построение фигур трилатерации, замкнутые ходы или их сочетание. Это обеспечивает контроль по невязкам и повышение точности при обработке. Два приемника на исходных пунктах и один на определяемом дают базовые линии, образующие треугольник векторов.

Графики наблюдений составляются на основании количества наблюдаемых НС, геометрического фактора их расположения на период выполнения работ, а также высоты их прохождения над горизонтом. Для этого используют альманах спутников, который получают через приемник, обрабатывают на соответствующем программном обеспечении. Выбираются благоприятные даты и время наблюдений.

Альманах навигационных спутников — информационный файл спутников, передаваемый в радионавигационном сообщении совместно со спутниковым сигналом, содержащий приближенные эфемериды всех работающих спутников. Данные альманаха обновляются в GPS ежедневно и передаются

с каждого НС примерно через 12,5 мин. Альманах содержит также информацию о состоянии («здоровье») спутников. Если информация об отказах или неисправности вошла в альманах на конкретный НС, то приемник автоматически не будет отслеживать и принимать его сигналы.

Период обращения НС по орбите равен половине звездных суток, поэтому появление спутника в одно и то же время суток повторяется с точностью до минут. Сохраняется PDOP созвездия НС. Альманах действителен в течение длительного времени (до месяца и более), однако он должен уточняться через несколько суток, так как могут появиться новые НС, а некоторые из включенных в проект окажутся исключенными из рабочего альманаха.

Альманах, полученный приемником, записывается автоматически в его память. В дальнейшем он обрабатывается в программном обеспечении компьютера, поэтому альманах нужно экспортировать в компьютер. Для обработки полученного альманаха следует ввести дату, время и приближенные координаты района работ (с точностью до 15 км или 10 минут по широте).

В спутниковых системах применяется всемирное координированное время UTC. На территории Российской Федерации используется местное время T , которое связано с UTC формулами:

$$T = UTC + N + 1^h; \quad T_{\text{л}} = UTC + N + 2^h, \quad (2.19)$$

где $T_{\text{л}}$ — местное летнее время, действующее с апреля по октябрь в границах крайних дат, публикуемых ежегодно; T — местное зимнее время; N — номер часового пояса ($N = 4$ для областей Урала).

Разница между UTC и местным временем составляет для областей Урала 5^h в пределах действия зимнего времени и 6^h — летнего.

Обработка альманаха дает на выходе количество видимых спутников на проектируемую дату, их высоту над горизонтом, азимут, коэффициенты геометрического влияния PDOP. Отбраковка спутников для вычисления PDOP проводится по углу наклона над горизонтом. В соответствии с инструкцией [11] высота НС над горизонтом не должна быть меньше 15° . В приемниках Trimble по умолчанию отбраковываются НС

с высотой менее 15° для работ с постобработкой и менее 13° для работ в RTK. Предельное значение коэффициента PDOP зависит от требуемой точности определения координат нового пункта. Для достижения сантиметровой точности требуется PDOP < 4, а для топографических съемок достаточно PDOP < 6. Предел допустимого PDOP (маску по PDOP) устанавливают в приемнике перед началом измерений. По материалам обработки альманаха выбирается наиболее благоприятное время для наблюдений: оно имеет 5 и более наблюдаемых спутников с минимальным коэффициентом PDOP.

На запроектированных пунктах с ограниченным обзором небосвода из-за наличия препятствий время наблюдений уточняется. Для этого с карты снимаются границы и верх препятствия.

По карте (плану) с запроектированной точки наблюдений измеряется транспортом азимут на крайние точки границ препятствия и вычисляется угол наклона на верх препятствия по формуле:

$$\gamma = \arctg \frac{h}{d}, \quad (2.20)$$

где h — высота препятствия, полученная по условным обозначениям и надписям на карте (плане); d — расстояние до препятствия.

Составляется полярная диаграмма видимости небосвода. Важно нанесение на нее препятствий с углом наклона над горизонтом больше 15° . На диаграмму наносят также положение спутников с указанием времени их появления в закрытой препятствиями зоне. Диаграмму можно получить на основе программного обеспечения (например, Plan, Trimble). Это время исключается из программы работ на всех пунктах, участвующих в планируемом сеансе наблюдений.

Программное обеспечение Plan, Trimble позволяет вывести на экран следующие графики: Elevation — углы наклона (возвышения) спутников GPS над горизонтом в течение суток или заданного интервала времени; PDOP, HDOP, VDOP — коэффициенты снижения точности, вызванные геометрией созвездия, на те же моменты времени; Sky Plot — траектории НС на небесном своде над заданной точкой; диаграмму препятствий на пунктах.

Составляется рабочая программа наблюдений на конкретные даты с учетом одновременно работающих приемников на опорном (базовом) и определяемых пунктах. Показываются все проектируемые связи базового и передвижного приемников, время работы на пунктах, маршруты перемещения приемников. Исходя из требований точности выбирается метод измерений (статика, быстрая статика, «Stop and Go», RTK), тип приемников, примерная продолжительность сеансов наблюдений, их количество.

Измерения в режиме реального времени (RTK) необходимо дополнительно обеспечить связью между базовым и определяемым пунктом, программным обеспечением RTK и полевым компьютером.

Разработанный проект уточняется при рекогносцировке и обследовании существующих пунктов ОГС. При этом следует максимально использовать пункты ранее созданных сетей, однако наличие на существующих пунктах металлических и деревянных сигналов и пирамид нежелательно. Они создают дополнительные помехи и экранирующие препятствия для приема спутниковых сигналов. При обязательном использовании в программе работ такого пункта проектируется внецентренная установка приемника на рабочей точке и ее геодезическая привязка к центру пункта. В некоторых случаях наружный сигнал разбирают.

При рекогносцировке уточняются места закладки новых пунктов, типы центров. При использовании стенных знаков на застроенных территориях выбирается рабочий центр, с которого обеспечиваются требования для спутникового позиционирования. После рекогносцировки и обследования пунктов можно скорректировать программу измерений с использованием того же модуля планирования.

Проектируемая продолжительность наблюдений зависит от требований точности, длины базовой линии и применяемого приемника. Удлинение времени наблюдений вызвано необходимостью полного разрешения неоднозначности фазовых измерений. Для двухчастотных приемников разрешение неоднозначности осуществляется в течение 10–15 минут даже на длинных базах. Для одночастотных приемников этого времени может оказаться достаточно лишь на коротких базах до 1 км. На длинных базовых линиях разрешение неоднозначности требует длительных наблюдений в течение 1 часа и бо-

лее (табл. 2.1). При этом минимальная продолжительность проектируется лишь в режиме быстрой статики.

Таблица 2.1

Проектируемое время наблюдений

| Длина базовой линии, км | Продолжительность сессии, мин. |
|-------------------------|--------------------------------|
| 0,1...1,0 | 10...30 |
| 1,1...5,0 | 20...60 |
| 5,1...10,0 | 20...90 |
| 10,1...30,1 | 30...120 |

Большая продолжительность наблюдений позволяет повысить точность координат определяемого пункта. При высоких требованиях к точности измерения планируют в несколько сессий (приемов), включая повторные измерения с возвращением на определяемый пункт.

Перед полевыми работами необходимо обеспечить комплектность и проверить работоспособность приборов: два или три приемника, соответствующие им штативы, подставки (трегеры), оптические центриры, измерители высоты антенны, полевой компьютер (контроллер) с программным обеспечением. Уровни и оптический центрир должны быть поверены и отъюстированы, подготовлены батареи питания, а для аккумуляторных — проведена их зарядка.

При проведении измерений один или несколько приёмников устанавливаются на пунктах с известными координатами, один или несколько — на определяемых.

Антенна или приёмник с вмонтированной антенной устанавливается на подставку на штативе, которая должна быть отцентрирована по оптическому центриру. Антенны на пунктах сети рекомендуется ориентировать в одном направлении, это снижает влияние смещения их фазового центра. Так, при установке антенны её риска должна быть сориентирована на север. Высота антенны над маркой центра пункта измеряется дважды (до и после наблюдений). До включения приёмника надо проверить уровень заряда аккумулятора и подключить контроллер, если измерения будут выполняться с контроллером. После включения появляется главное меню контроллера.

Проводятся рабочие установки, с помощью которых komponуются действия для программы измерений. Рабочие установки — миссии (mission) могут быть сформированы в камеральных условиях, особенно для выполнения однотипных наблюдений, в полевых условиях при необходимости их можно скорректировать. Рабочие установки содержат набор параметров, используемых при спутниковых определениях приёмником: режим работы, предельные значения (маски) угла возвышения НС, PDOP, соотношения сигнал/шум, интервал регистрации данных и другие. Интервал регистрации спутникового сигнала (дискретность) устанавливается в пределах 1...15 секунд. Более короткий интервал приводит к записи в файлы измерений большого объёма избыточной информации и к нерациональному расходованию памяти приёмника. Интервал записи на hard-приёмнике ставят равным или в целое число раз превышающем интервал записи referens-приёмника.

С клавиатуры контроллера вводится информация о точке стояния. Сведения о пунктах местности, подлежащих позиционированию, можно также ввести заранее в проекте спутниковых определений. После включения осуществляется автоматический запуск работы приёмника.

Автоматически проводится захват сигналов НС и инициализация приёмника. В многоканальных приёмниках наблюдаются все видимые или определенные альманахом спутники. Инициализация — процесс предварительного разрешения неоднозначности фазовых измерений при включении приёмника. Признаком завершения инициализации является приём сигналов от достаточного числа спутников, появление допустимого значения PDOP на дисплее контроллера. Инициализация выполняется в одночастотных приёмниках в течение примерно 10 минут. Продолжительность сеанса измерений на определяемом пункте зависит от длины базовой линии и требуемой точности работ. Сеанс, непрерывную регистрацию сигналов НС, называют также сессией (session) спутниковых наблюдений. Сессия будет завершена, если в течение установленного времени не было сбоев, а показания PDOP оставались в допуске. При высоких требованиях к точности работа на станции проводится в несколько сессий. Контролировать ход сессии можно с помощью контроллера или панели управления (см. рис. 2.7). Результаты наблюдений

ний автоматически записываются и сохраняются в памяти приёмника.

Если в наблюдениях на пункте произошли сбой или какой-то параметр вышел за пределы допуска, время позиционирования увеличивают. В исключительных случаях используют метод реокупации, состоящий в возвращении на проблемный пункт. При этом общее время наблюдения можно разбить на два или несколько этапов сессии, которая будет осуществлена на пункте с перерывом.

По окончании наблюдений следует проверить запись названия пункта, его обозначение в файле. Записывают высоту антенны, время начала и окончания сессии, номер приёмника, исполнителя, необходимые примечания. Станцию сворачивают и перемещаются на следующую определяемую точку. Опорная станция продолжает работать, пока все определяемые относительно её пункты не будут отнаблюдены. Проектом определяется последовательность перемещения по определяемым пунктам rover-приёмника. В первую очередь определяют вектора базовых линий, входящих в замкнутые ходы и фигуры трилатерации.

Допускается внецентренная установка приёмника на существующие и вновь определяемые пункты, а при закреплении их стенными центрами — установка приёмника на рабочий центр. Если закреплённый рабочий центр расположен неудачно для спутниковых наблюдений, его выбирают вновь. Точки внецентренной установки привязывают к основному центру пункта дополнительными геодезическими измерениями с контролем.

Внецентренная установка приёмника применяется, если на пункте имеются металлический сигнал и другие препятствия для спутниковых наблюдений. Передачу координат с пункта ОГС на внецентренную точку проще всего выполнить методами обратной линейно-угловой и полярной засечки с измерением электронным тахеометром углов и расстояний.

После наблюдения всех определяемых пунктов referens- и rover-приёмники выключают. Их файлы наблюдений передают в ПК в проект для совместной обработки.

Проведение измерений методом «Stop and Go» требует дополнительной организации работ, так как оба приёмника, базовый и передвижной, должны непрерывно принимать сигналы от четырех и более НС с допустимым PDOP. Базо-

вый приёмник устанавливается на пункт, который будет исходным в данных измерениях, а подвижный можно закрепить на специальной вехе. В приёмник загружают режим «Stop and Go», его параметры работы, прибор устанавливают на первом определяемом пункте.

Инициализацию проводят оба приёмника, затем rover-приёмник, включенный и инициализированный, перевозят и устанавливают для наблюдений во все определяемые пункты. Поскольку новая инициализация на каждом пункте не требуется, наблюдения проходят быстро. Для контроля рекомендуется в наблюдения rover-приёмником включать пункты с известными координатами. Если сигнал от спутника потерян из-за экранирования местными предметами или при передвижении произошел скачок фазы, необходимо остаться на пункте и повторить инициализацию этого приёмника. Затем продолжать определение новых пунктов. Все перемещения и особенности наблюдений фиксируют в журнале измерений. Рекомендуется реокупация на пункт инициализации rover-приёмника в течение часа.

Режим «Stop and Go» применяют в тех случаях, когда при перемещениях с пункта на пункт на объекте не возникают препятствия для радиосигналов от наблюдаемых спутников. Поэтому он распространен на малых площадях, когда определяемые точки расположены недалеко друг от друга: при съёмке пикетов, при определении координат поворотных точек границ небольших земельных участков.

2.9. Обработка результатов спутниковых измерений

Результаты спутниковых наблюдений передаются с приёмника или его контроллера на компьютер для постобработки. Постобработка информации, полученной приёмниками от НС, проводится в два этапа: предварительная обработка и уравнивание геодезического построения (окончательная обработка).

Предварительная обработка включает: обработку файлов спутниковых наблюдений, оперативный контроль и оценку качества выполненных построений, выявление пунктов, на которых необходимо повторить наблюдения, подготовку данных для уравнивания.

Окончательная обработка включает совместное уравнивание измерений на пунктах объекта на основе метода наименьших квадратов, вычисление уравнинных координат пунктов с оценкой их точности, преобразование в требуемую систему координат.

В настоящее время применяется широкий арсенал программных средств для постобработки спутниковых измерений: Trimble Geomatics Office, Spectrum Survey (Sokkia), Aschtech Solutions, 3S PACK (Thales), Geo Office (Leica), SKI и другие. Проведена определенная унификация, позволяющая обрабатывать разными программами информацию большинства типов приемников. Для этого применяются специальные универсальные форматы: данных измерений — RINEX (Receiver Independent Exchange), представления данных в ПО — SINEX (Software Independent Exchange). Современные программные пакеты поддерживают экспорт данных в универсальных форматах. Например, пакет Trimble Geomatics Office может принимать и обрабатывать GPS-данные приемников в форматах Trimble и RINEX; пакет 3S PACK — в форматах Thales и RINEX. Формат RINEX не зависит от конкретного приемника и унифицирует форматы файлов GPS-измерений, метеоданных, навигационных сообщений.

Большинство программ обработки спутниковых геодезических измерений содержат следующие основные модули:

- планирование измерений на основе обработки альманаха НС и данных о препятствиях на пунктах объекта;
- передача результатов измерений с приемников в ПК для постобработки;
- предварительная обработка, контроль качества измерений;
- окончательная обработка;
- организация базы данных и сервисные функции.

Используя программное обеспечение, создают проект, в рамках которого будут вводиться данные и осуществляться постобработка.

Модуль передачи данных предназначен для управления процессом передачи результатов измерений и преобразования данных из компактного формата приемника в формат, используемый в ПО. Информация в память приемника записана в виде файлов базовой (опорной) и передвижной станций. Она содержит кодovou, фазовую, эфемеридную и иную

информацию, полученную от НС, а также данные о станции. Полевые файлы с приемников переписывают в базу открытого для обработки проекта. В передаче данных используется окно ПО, корректируются названия и номера пунктов, делаются предусмотренные программой установки.

Постобработка выполняется в соответствии с содержанием файлов. В специально организованных окнах ПО указывается рабочая временная зона, опорные и мобильные пункты, участвующие в обработке, вводятся координаты опорных станций. Корректируются допуски (маски), выбираются модели учета тропосферных и ионосферных влияний, вариант использования эфемеридных данных. Указывается вариант обработки «код — фаза». В обработку одновременно принимается кодovая и фазовая информация сигналов, но предусмотрен выбор только кодovых или только фазовых данных. Выбираются частоты сигналов: L1, L2, L1 + L2 — в соответствии с типом приемников, работавших на объекте, и другие параметры.

Программа предварительной обработки запускается. Вычисляются пространственные координаты спутников по их эфемеридным данным. Можно использовать точные эфемериды, которые публикуются на сайтах GPS в Интернете. После их появления обработку можно повторить, что повысит точность определения координат пунктов объекта. В дальнейшей предварительной обработке проводится разрешение неоднозначностей фазовых измерений и вычисляются вектора базовых линий.

Чаще всего разрешение неоднозначностей проводится в процессе вычисления векторов базовых линий в следующей последовательности:

- сравнение кодovых и фазовых данных приемника;
- обработка с использованием третьих разностей фазовых измерений;
- определение вещественных значений чисел неоднозначности и вычисление по ним вектора базовой линии из обработки вторых разностей фазовых измерений;
- приведение вещественных значений неоднозначностей к целым числам, вычисление по ним вектора базовой линии и характеристик точности (СКП вектора).

Первые разности (ПР) фазовых измерений получают при наблюдении одного спутника двумя приемниками. Вторые разности (ВР) — разности ПР для двух спутников, изме-

ренных одновременно. Третьи разности (ТР) — разности ВР для двух разных эпох наблюдений, они позволяют при обработке существенно снизить влияние ряда систематических погрешностей спутниковых измерений.

Вектор базовой линии — трехмерный вектор приращений координат между смежными пунктами i и j спутниковых наблюдений, выполненных в течение одного сеанса. Его длина b_{ij} определяется формулой

$$b_{ij}^2 = \Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta Z_{ij}^2, \quad (2.21)$$

где ΔX_{ij} , ΔY_{ij} , ΔZ_{ij} — приращение пространственных координат. Они определяются путем совместного решения уравнений типа (2.10) для пунктов i и j с использованием ПР, ТР, ВР.

После вычисления векторов программа выводит на экран их длину, направление и точностные характеристики (СКП). Можно вывести и их графическое изображение. Большинство программ позволяют обрабатывать разное число базовых линий, измеренных в разных режимах (статическом, «Stop and Go», RTK).

Если совокупность некоторых векторов образует замкнутое геодезическое построение, то по нему вычисляется невязка f как сумма приращений координат:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2}, \quad (2.22)$$

где $f_x = \sum \Delta X_i$; $f_y = \sum \Delta Y_i$; $f_z = \sum \Delta Z_i$.

По величине f судят о качестве спутниковых измерений в пределах векторного хода.

Программы предварительной обработки проводят автоматическую отбраковку векторов базовых линий, если они содержат недопустимые погрешности. Все это позволяет выполнять оперативный контроль качества спутниковых наблюдений. Если перенаблюдать пункты с плохой базовой линией нет возможности, то ее исключают из окончательного уравнивания или придают ей малый вес.

При обработке измерений можно в ряде случаев повысить точность векторов базовых линий за счет вариации по-

лученной приемниками информации. Так, можно отбраковать избыточные вектора, которые ухудшают точность при последующем уравнивании, изменять в вычислениях количество НС, снижать или повышать критерии отбраковки (маски), тем самым улучшая геометрию рабочего созвездия. В некоторых программах предусмотрены при обработке изменения вариантов ионосферной модели и других внешних влияний. Обработка может проводиться в режиме отдельных базовых линий или их комбинаций для сети пунктов, а также — нескольких сеансов наблюдений. Обработка отдельных линий позволяет локализовать их вектора по величинам погрешностей. Если в каком-то пункте сходятся линии с большими погрешностями, то низкоточный пункт обнаруживается.

Предварительная обработка измерений в режиме кинематики может выполняться на контроллере или полевом компьютере с использованием специальных модулей ПО. Для обработки RTK-режима наблюдений необходима информация с определяемого и базового приемников, а также координаты базовой (опорной) точки. Они поступают с опорной точки по каналам линии связи и позволяют выполнить предварительную обработку в поле непосредственно на точке стояния приемника. Наиболее эффективны постоянно действующие GPS базовые станции, которые круглосуточно записывают в формате RINEX полученную информацию. При отсутствии связи на приемнике пользователь может получить необходимые для обработки данные с такой станции через Интернет. Контроль предварительной обработки кинематических GPS-измерений чаще всего проводится по расхождениям координат пунктов, с которых позиционирование выполнялось два или более раз, а также по контрольным пунктам, координаты которых известны. Результаты RTK-измерений можно подвергнуть постобработке после отбраковки и уточнения данных.

Предварительная обработка позволяет установить по СКП веса базовых линий для последующего уравнивания и вычислить элементы ковариационной матрицы.

Окончательная обработка материалов наблюдений включает в себя: уравнивание полученных геодезических построений, преобразование координат в требуемую СК, оценку точности построения по материалам уравнивания, составле-

ние каталогов, их экспорт в ГИС, в кадастровые и другие системы.

Уравнивание выполняется после предварительной обработки и удовлетворительных результатов контроля. Для окончательной обработки могут применяться модули тех же программных пакетов (Trimble Geomatics Office, Spectrum Survey, Aschtech Solutions) или программы уравнивания и трансформации координат (Credo DAT3 и ТРАНКОР 1) и другие. В программах для окончательной обработки должны быть предусмотрены модули: просмотр и редактирование данных, уравнивание, преобразование координат, экспорт и сервис данных.

Просмотр и редактирование позволяет выводить на экран результаты предварительной обработки в графическом и цифровом виде, редактировать перед уравниванием геометрию построения, идентификаторы точек, варьировать избыточные измерения.

Уравнивание векторов базовых линий выполняется по методу наименьших квадратов в пространственной СК, чаще всего в WGS-84. Вектора базовых линий образуют геодезическую сеть. Уравнивание может выполняться свободной геодезической сети, опирающейся на один исходный пункт, и сети несвободной, опирающейся на избыточное количество пунктов с известными координатами, которые после уравнивания должны сохраниться неизменными. В процессе обработки определяются уравненные по МНК значения координат определяемых пунктов и их СКП, которые сводятся в каталог и могут быть распечатаны в требуемой для отчета форме.

Следует отметить, что с увеличением числа избыточных измерений (число наблюдаемых спутников 5 и более), с использованием избыточных исходных пунктов при уравнивании и избыточных связей по базовым линиям снижаются величины СКП при уравнивании, и тем самым повышается точность определяемых координат. Количество избыточных измерений вырастает также с уменьшением числа определяемых при уравнивании неизвестных. Поэтому возникает желание при решении некоторых задач (например, при определении только плановых координат) исключить из уравнивания определение высот пунктов. Теоретически это возможно в двух случаях:

— достаточно точно известны геодезические высоты H исходных и определяемых пунктов;

— все определения проводятся только в пространственной системе X, Y, Z и пересчет в геодезические системы не требуется.

На практике производство геодезических работ в РФ проводится в системах плоских прямоугольных геодезических координат (СК-95) и в Балтийской системе нормальных высот. Если при уравнивании происходит трансформация координат из одной системы в другие по формулам перехода, то в соответствии с (2.5) используются в вычислении координат B, L и x, y геодезические высоты H , которые остаются неизвестными. Их замена на нормальные высоты не учитывает аномалию высоты (см. рис. 2.3) и приведет к грубым ошибкам обработки построения.

Преобразование координат из одной системы в другую проводится в рамках применяемого ПО. Так, в Credo ТРАНКОР можно выполнить преобразование между системами WGS-84, ПЗ-90, СК-42, СК-95, а также перейти в местную из государственной системы по известным параметрам связи. Все современные геодезические программные пакеты вычисляют данные в геоцентрических, геодезических, государственных и местных системах координат. Если параметры перехода в МСК установлены ненадежно, то в ПО предусмотрена трансформация системы на основе пунктов ОГС, координаты которых известны в двух СК. Для этого используют известные пункты, оконтуривающие зону работ. Модуль ПО «преобразование координат» строит для этих пунктов вектора преобразований из одной СК в другую и по ним — изолинии преобразования. Вектора перехода в МСК для вновь определяемых пунктов вычисляются интерполированием с использованием изолиний преобразований координат.

После выполнения преобразований координат производятся окончательные вычисления всех пунктов объекта и формируется файл отчета, координаты в котором приводятся в системе пользователя в соответствии с техническим заданием. Материалы обработки можно экспортировать с помощью сервисного модуля ПО в ГИС, ЗИС и другие информационные системы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ 2

1. Какие геодезические определения выполняют с использованием спутниковых радионавигационных систем (СРНС)? Как эти определения используются в инженерно-геодезическом обеспечении изысканий, проектирования и строительства?

2. Назовите общее и различия систем ГЛОНАСС и GPS. Какие сегменты входят в их состав?

3. Вычертите схему пространственной трилатерации для абсолютных спутниковых определений. Какие геодезические величины измеряются в этом построении? Назовите известные и определяемые параметры построения.

4. Почему в пространственной трилатерации необходимо наблюдение не менее, чем четырех навигационных спутников?

5. Назовите основные типы геодезических спутниковых приемников. Чем обусловлено применение в геодезических приемниках фазового метода?

6. Пользуясь рисунком геодезического приемника TTS 5700 (см. рис. 2.9.), назовите основные части прибора.

7. Опишите последовательность работ на местности при относительных геодезических определениях в статическом режиме.

8. Опишите последовательность работ на местности при определениях методом «Stop and Go».

9. Что называется вектором базовой линии при относительных спутниковых определениях? На какие параметры полевых работ оказывает влияние длина базовой линии?

10. Перечислите основные этапы математической обработки результатов спутниковых геодезических определений.

Глава 3. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ И ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

3.1. Электронные тахеометры

Электронный тахеометр — геодезический прибор, объединяющий электронный теодолит, светодальномер, регистрирующие и вычислительные устройства, блок памяти и передачи информации. Совмещение в одном электронном приборе дальномера и теодолита позволяет автоматизировать основные геодезические операции процесса измерений и получать в течение долей секунды на дисплее прибора следующие значения:

S — наклонное расстояние;

z (или ν) — зенитное расстояние (или угол наклона);

β (ГУп) — горизонтальный угол (правый или левый), отсчитанный от выбранного начального направления.

Измеренные значения S , z , β могут быть преобразованы в D , h , β или X , Y , H , где D — горизонтальное проложение, h — превышение, X , Y , H — плановые координаты и отметка снятой точки. Для получения на дисплее D , h достаточно нажать соответствующую функциональную клавишу прибора, а для X , Y , H необходимо войти в режим координат, ввести координаты точки стояния и точки начального ориентирования. Таким образом, геодезическая информация на снятую точку может быть выдана на экран или записана в память прибора в трех видах:

S , z , β ; D , h , β ; X , Y , H .*

* В разных моделях электронных тахеометров могут быть разные обозначения одних и тех же величин, выводимых на дисплей. Принятые индивидуальные обозначения будут указаны при рассмотрении конкретных моделей приборов.

Современный уровень оптико-электронного приборостроения обеспечивает высокую точность, качество и быстроту измерений тахеометрами, поэтому они получили особую популярность, практически вытеснив из геодезического производства традиционные приборы. Электронные тахеометры применяют при развитии опорных геодезических, межевых и маркшейдерских сетей, для создания планово-высотного обоснования, проведения тахеометрической съемки, производства геодезических разбивочных работ.

Электронные тахеометры выпускают и поставляют на российский рынок многие ведущие приборостроительные компании мира: Trimble, Sokkia, Leica, Nikon, Topcon, Pentax и другие. Распространены отечественные тахеометры типа 3Та5 (УОМЗ), начат выпуск их новой модели 4Та5. Большинство современных тахеометров измерения выполняют на призму с дальностью до 1...5 км, отражающую пленку (KODAK Gray Card), а также в безотражательном режиме Direct Reflex с дальностью до 70...350 метров. Основные технические характеристики некоторых электронных тахеометров, распространенных в геодезических работах РФ, приведены в табл. 3.1. Дальность и СКП измерения расстояний могут меняться в зависимости от атмосферных условий и фонового излучения. Наряду с приведенными в этой таблице выпускаются высокоточные тахеометры с СКП измерения углов 1...1,5" (TS 5601 DR, TS 3601 DR, SET 1030 R3, NET 1200).

Прибор приводится в рабочее положение с помощью встроенного оптического центра, подъемных винтов подставки, круглого и цилиндрического уровней. В процессе измерений дополнительно наклон вертикальной оси прибора отслеживает двухосевой датчик в двух взаимноперпендикулярных направлениях. За наклон оси автоматически вводятся поправки в отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругу в каждое направление.

Следует отметить, что современные модели тахеометров имеют функцию лазерного целеуказателя, позволяющую видеть лазерный луч при наведении на точки объекта и существенно упрощать разбивочные работы. Кроме того применяется приемный датчик для управления прибором с внешнего беспроводного пульта, например, с внешней клавиатуры SF14. Современные модели SET используют для дальнометрических измерений технологию цифровой обработки сигнала.

Таблица 3.1

Основные технические характеристики электронных тахеометров

| Характеристики | Фирма и модель | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| | УОМЗ | | Trimble | | Sokkia |
| | 3Та5Р | 4Та5 | TS3305DR | TS5602DR | SET2130R SET530R |
| СКП измерения углов: | | | | | |
| — горизонтального, с | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 5 |
| — вертикального, с | 7 | 5 | 5 | 2 | 2 5 |
| СКП измерения расстояний: | | | | | |
| — на призму, мм | $5 + 3 \cdot D \cdot 10^{-6}$ | $3 + 3 \cdot D \cdot 10^{-6}$ | $3 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$ | $2 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$ | $2 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$ $2 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$ |
| — без призмы, мм | — | — | $3 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$ | $3 + 3 \cdot D \cdot 10^{-6}$ | $3 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$ $3 + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$ |
| Дальность измерения: | | | | | |
| — на одну призму, м | 1000 | 1000 | 1500 | 3000 | 5000 |
| — без отражателя, м | — | — | 70 | 100 | 350 |
| Объем памяти: | | | | | |
| — внутренней, точек | 11000 | 10000 | 1900 строк | 8000 | 10000 |
| — карта памяти, Мб | 1 | 1 | 4 | 4 | 8 |
| Вес прибора, кг | 5,4 | 5,4 | 3,5 | 6,7 | 5,3 |

лов RED-tech (Revolutionary Digital Processing Technology), повышающую точность и скорость измерений за счет аналого-цифровых преобразователей и выборочной оцифровки полученного с дистанции сигнала, подбора в соответствии с условиями измерений метода вычисления расстояния по специальному ПО. Для угловых измерений используется автоматическая система отсчета с вертикального и горизонтального кругов. В современных моделях применяется абсолютный датчик угла поворота, работающий по RAB-коду (Random Bi-directional). В результате угловые отсчеты мгновенно выводятся на экран. Большинство электронных тахеометров имеют надежную защиту от проникновения в прибор пыли и влаги, что позволяет вести качественные измерения в неблагоприятных погодных условиях.

В качестве источника питания применяются аккумуляторы, для большинства моделей литиево-ионные малогабаритные. Аккумулятор вставляется в отсек тахеометра, на экране отображается уровень его зарядки. Предусмотрено подключение прибора и к внешним источникам питания.

Электронный тахеометр имеет внутреннюю и внешнюю память, куда можно записать файлы исходных данных и результаты измерений. Объем внутренней памяти указывается в технических характеристиках приборов. Он может быть увеличен за счет компактных карт памяти. Так, в тахеометре SET530R дополнительно устанавливается устройство чтения и записи на карты флэш-памяти в 8 или 16 Мб. Тахеометр типа ЗТа5 имеет только внешнюю память и снабжен специальным узлом сопряжения с картой памяти.

В комплект электронного тахеометра чаще всего входит следующее оборудование:

- кабель для передачи исходной информации с компьютера в память прибора, а файлов измерений — с тахеометра на компьютер или принтер;
- отражательная призма с визирной маркой, набор призм;
- крепление для системы призм;
- трегер (подставка), оптический центрир или адаптер трегера с оптическим центриром;
- комплект пленочных отражателей;
- штативы;
- вехи с уровнем для установки призмы, подпорки для вехи (бипод);

- зарядное устройство для аккумуляторов;
- кабель для подключения к внешним источникам питания.

Измерения расстояний тахеометром выполняются на отражателе, а на малых расстояниях в большинстве приборов используются измерения без отражателя. Применяется однопризменный отражатель, который совмещен с визирной маркой для измерения углов. Измерения больших расстояний проводят на комплект призм, которые устанавливаются на специальном креплении. Однопризменные отражатели можно установить на штатив или веху с круглым уровнем. При использовании штатива подставка или адаптер трегера центрируются по оптическому центриру.

В пределах дальности измерений без отражателя призма не требуется, а наведение осуществляется непосредственно на снимаемую точку объекта. Результаты можно улучшить измерением на пленочные отражатели, которые накладываются на точки объекта.

После установления тахеометра над пунктом, его центрирования и горизонтирования прибор включают нажатием соответствующей клавиши. На дисплее появится начальное сообщение в виде экрана статуса (исходного экрана), содержащего модель тахеометра, его номер, версию ПО, название рабочего файла. Экран статуса позволяет нажатием функциональных клавиш перейти в другие режимы, в том числе в режим измерений.

3.1.1. Тахеометры ЗТа5Р УОМЗ

Электронные тахеометры серии ЗТа5 отечественного производства, они широко распространены в полевых геодезических работах и неплохо зарекомендовали себя в суровых климатических условиях. Приборы модернизируются, имеется их полярный вариант. Тахеометры используют комплектующие (штативы, подставки, стантовые винты, отражатели), применяемые во всех других отечественных приборах. Электронный тахеометр ЗТа5Р представлен на рис. 3.1, а его дисплей и клавиатура — на рис. 3.2.

Дисплей тахеометра ЗТа5Р имеет четыре строки, в которых отображаются буквенные идентификаторы и цифровая информация. На панели управления расположены 15 клавиш, некоторые выполняют несколько функций.

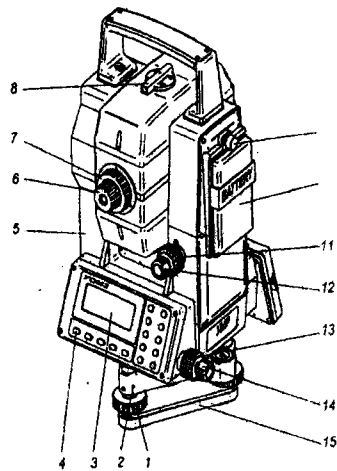


Рис. 3.1. Электронный тахеометр 3ТА5РМ:
 1 — подъемные винты подставки; 2 — регулирующий винт;
 3 — дисплей; 4 — клавиатура; 5 — колонка прибора; 6 — окуляр зрительной трубы; 7 — кольцо кремальеры; 8 — коллиматорный визир; 9 — винт отсека; 10 — отсек кассетного источника питания; 11 — наводящий винт трубы; 12 — закрепительный винт трубы; 13 — круглый уровень; 14 — закрепительный и наводящий винты алидады; 15 — подставка

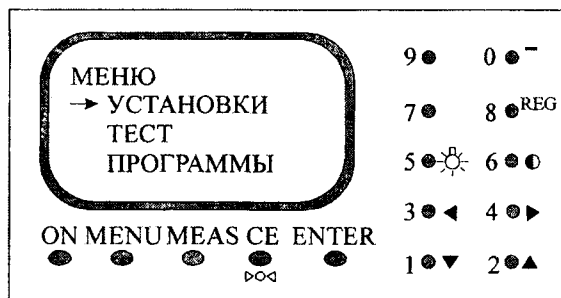


Рис. 3.2. Дисплей и клавиатура 3ТА5РМ:
 ON/OFF — клавиша включения / выключения прибора; MENU — выбор режима работы, выход из него; MEAS — клавиша начала измерений; CE — удаление набранных символов; ENTER — подтверждение ввода, выбор подпрограмм; $\square \square$ — обнуление ГК; 1...9 — клавиши набора цифр; REG — запись в карту памяти, регистрация; \odot — подсветка дисплея; $\blacktriangledown \blacktriangle$ — перемещение курсора по дисплею; \blacktriangleleft — смена режима продолжения работы; \blacktriangleright — смена шаблона дисплея без выхода в главное меню

После включения прибора вслед за исходным экраном автоматически появляется информация о состоянии карты памяти. Если карта памяти готова к работе, то через три секунды появится стандартный вид экрана, позволяющий выбрать УСТАНОВКИ, ТЕСТЫ, ПРОГРАММЫ, предусмотренные в приборе. Для входа в строку из перечисленных на экране перемещают на нее курсор и нажимают клавишу ВВОД (ENTER). В приборе можно выполнить несколько начальных установок, значения и конфигурации которых будут автоматически использованы при измерениях и вычислениях выдаваемых на дисплей результатов. Так вводятся поправки в измеренные расстояния (методанные, постоянная отражателя), выбирается тип вертикальных углов (зенитное расстояние или угол наклона, начало их отсчета), регулируется подсветка и контрастность дисплея. Проводится описание станции. Для этого следует войти в экран МЕНЮ*УСТАНОВКИ в строку ЗАГОЛОВОК СТАНЦИИ (рис. 3.3). Появляется экран для ввода номера станции и высоты прибора (h_i). После набора каждой строки ввод ее осуществляется нажатием ENTER. Появится запрос, будут ли вводиться дата, азимут, координаты станции, для их ввода предусмотрены строки экрана в меню ЗАГОЛОВОК СТАНЦИИ. Ввод координат можно выполнить с клавиатуры или из файла исходных данных карты памяти.

Выполняется далее установка пикета. Для этого необходимо войти в строку УСТАНОВКИ ПИКЕТА экрана МЕНЮ*УСТАНОВКИ. В появившемся экране ввести в указанные на нем строки номер точки, высоту отражателя (h_i). Можно ввести код пикета.

Далее проводится установка режима. Для этого необходимо войти в строку ВЫБОР РЕЖИМА экрана МЕНЮ*УСТАНОВКИ. В приборе предусмотрены четыре режима в виде специальных шаблонов экрана, которые соответствуют разным измеряемым и вычисляемым перед выдачей на экран величинам.

1. Режим измерения углов: N_T ; H_a ; V .

На дисплей будут выданы величины: N_T ; H_a ; V , где N_T — номер снятой точки; H_a — горизонтальный угол, отсчитанный от начального направления, на которое предварительно выставляют по ГК нулевое значение; V — вертикальный угол, тип которого определен в начальных установках.

2. Режим полярных координат: $N_T; H_a; V; D$.
 N_T — номер точки; H_a — горизонтальный угол; V — вертикальный угол; D — наклонное расстояние.
3. Режим прямоугольных координат: N_T, X, Y, H .
 N_T — номер точки; X, Y — ее прямоугольные координаты; H — отметка точки.
4. Режим горизонтального проложения и превышения: $H_a; V; D_o, h$.
 H_a — горизонтальный угол; V — вертикальный угол; D_o — горизонтальное проложение; h — превышение.

Основные переходы между экранами установок и режимов работы осуществляются после нажатия клавиши MENU, подведения курсора, клавиши ENTER.

Например, для выбора второго режима необходимо: нажать клавишу МЕНЮ, подвести курсор к строке УСТАНОВКИ, нажать ENTER. В появившемся на экране списке установок курсор установить на ВЫБОР РЕЖИМА, нажать ENTER. Появится на экране шаблон первого режима. Клавишей ▼ перейти во второй режим. Перед измерением в этом режиме требуется подтвердить выбор клавишей ENTER.

Измерения электронным тахеометром ЗТa5 рассмотрим на примере определения положения точки полярной засечкой, которая применяется и при тахеометрической съемке. Над станцией, координаты которой известны или будут определены обратной засечкой, устанавливается прибор, приводится в рабочее положение (центрируется, горизонтируется, включается). Выполняются начальные установки. Заполняются экраны ЗАГОЛОВОК СТАНЦИИ, УСТАНОВКИ ПИКЕТА. Выбирается режим, например, второй. Измерения начинаются с визирования на начальную (опорную) точку, координаты которой (или дирекционный угол на нее) известны. После наведения на точку центра сетки нитей нажимают клавишу обнуления ГК. Отражатель устанавливают на снимаемую точку. Наводят центр сетки нитей на центр отражателя, нажимают клавишу MEAS. Сигнал от отражателя в прибор поступил, если в четвертой строке дисплея символ «>» смещается вправо. Тогда на дисплее высвечиваются результаты в установленном режиме. Результаты измерений записываются в карту памяти, если нажать клавишу REG. Номер снятой точки увеличивается на единицу для следующего пикета.

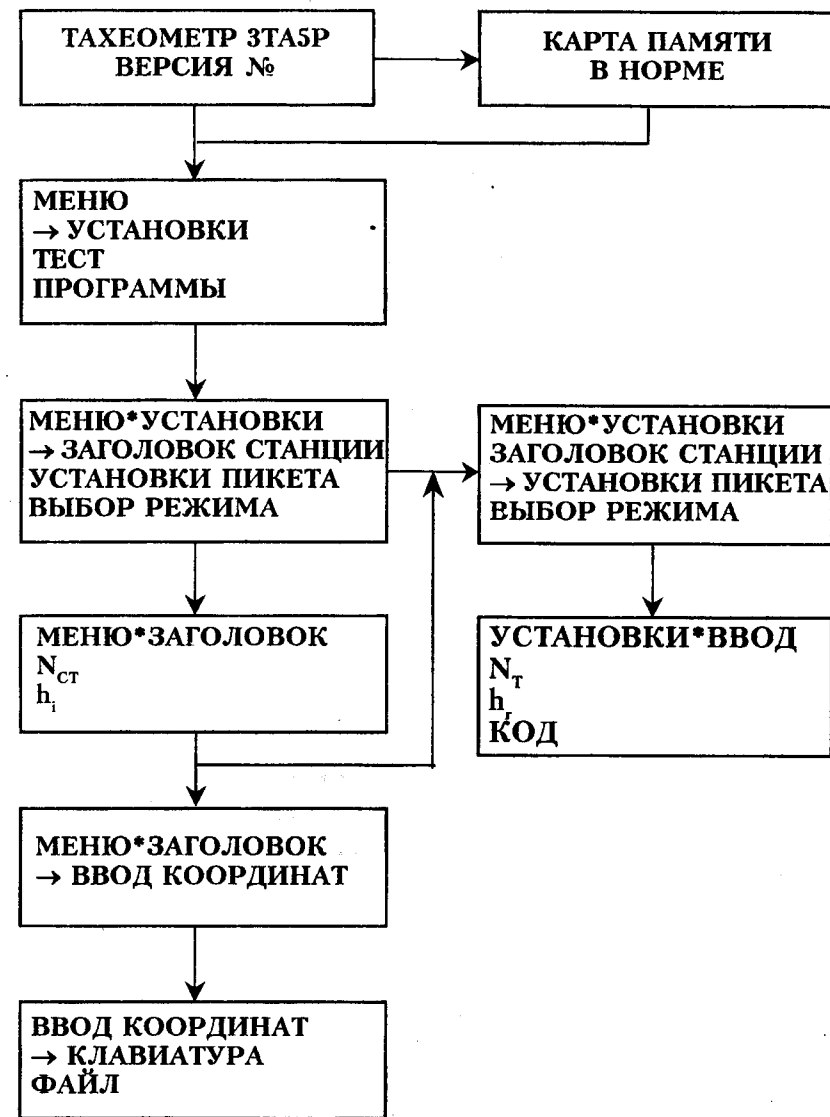


Рис. 3.3. Схема переключения основных стандартных экранов ЗТa5Р

Если режим переключить на четвертый, то дополнительно на экране появится D_o , h . Превышение h вычисляется по формуле тригонометрического нивелирования с учетом h_i , h_r .

Для измерения в режиме координат необходимо предварительно ввести на начальных установках координаты станции, ее отметку (X_o , Y_o , H_o). Для ввода дирекционного угла начального (опорного) направления (НаО) на экране МЕНЮ*УСТАНОВКИ надо войти в строку ВВОД НаО, в появившемся экране набирают значение НаО, нажимают ENTER. Наводят зрительную трубу на точку, соответствующую этому дирекционному углу, нажимают клавишу установки угла. Измерения выполняют аналогично рассмотренному второму режиму, только после нажатия MEAS и звукового сигнала на экран будут выданы N_T , X , Y , H снятой точки. Для их записи также следует нажать клавишу REG.

Электронный тахеометр 3Та5Р имеет дополнительные возможности и ряд прикладных программ, которые в рамках данного пособия не рассматриваются.

3.1.2. Тахеометры TS3300DR Trimble

Электронные тахеометры серии TS3300 выпускаются сейчас с безотражательным измерением расстояний Direct Reflex (DR) до 70 м, свыше которого применяется отражатель. В зависимости от точности угловых измерений их подразделяют на TS3303DR, TS3305DR и TS3306 с СКП 3", 5" и 6" соответственно. Тахеометр TS3305 представлен на рис. 3.4, а его дисплей и клавиатура — на рис. 3.5.

Программное обеспечение прибора позволяет выводить на дисплей не только алфавитно-цифровую, но и графическую информацию, поясняющую режимы и схемы отдельных измерений. Дисплей вмещает 128×32 пикселей, поэтому информация выдается на две экранные страницы по три строки в каждой. Нижнюю (четвертую) строку экрана занимают экранные (программные) клавиши, активизация которых осуществляется расположенными под ними кнопочными клавишами клавиатуры прибора.

Клавиатура тахеометра представлена всего семью клавишами, которые имеют прямые функции (ON, MEAS) и дополнительные, действующие после нажатия SHIFT (ON), их название подписано в нижней строке клавиатуры. Экран-

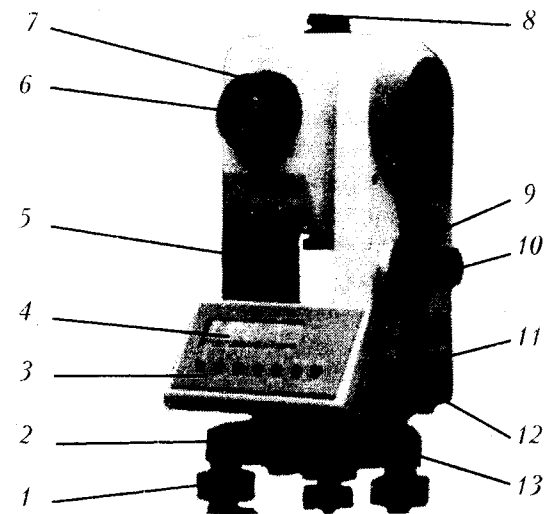


Рис. 3.4. Электронный тахеометр Trimble 3305:
 1 — подъемный винт; 2 — интерфейсный порт; 3 — клавиатура;
 4 — дисплей; 5 — аккумуляторный отсек; 6 — окуляр; 7 — кольцо кремальеры зрительной трубы; 8 — коллиматорный визир;
 9 — наводящий винт трубы; 10 — закрепительный винт трубы;
 11 — наводящий винт алидады; 12 — закрепительный винт алидады;
 13 — трегер

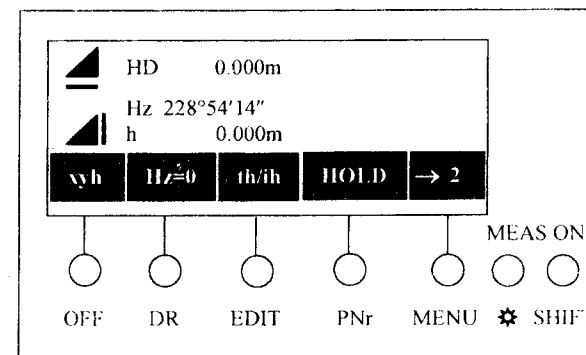


Рис. 3.5. Дисплей и клавиатура TS3305DR:
 ON (SHIFT) — включение прибора (изменение функции клавиши);
 MEAS — начало измерений; SHIFT MENU — вызов главного меню;
 SHIFT PNT — вызов номера и кода точки; SHIFT EDIT — запрос
 о памяти, доступ к ее файлам; SHIFT DR — безотражательный
 режим; SHIFT OFF — выключение прибора

ные клавиши дают возможность переключать на дисплей введенные в них установки, режимы, страницы экрана. Кроме того, через SHIFT MENU можно войти в главное меню установок программ измерений и функций прибора.

Включение прибора выполняется нажатием клавиши ON. На экране появится заставка с логотипом Trimble, номером версии ПО, ранее выполненными основными установками (постоянная призмы, масштаб измерений, температура и давление). Данные установки можно изменить, а также ввести в прибор дополнительные. Для этого, нажав SHIFT MENU, получают экран с перечнем установок и программ и экранными клавишами: ESC — возврат; ↑, ↓ — перемещение курсора; ДА — подтверждение выбора. Например, требуется установить параметры записи данных в память прибора. Курсор подведем на строку УСТАНОВКА ИНТЕРФЕЙСА (рис. 3.6, а). Нажав экранную клавишу ДА, получим экран с перечнем параметров записи данных (рис. 3.6, б). На нем курсор установили на строку ЗАПИСЬ. Если активизировать клавишу МОД экрана, то можно изменить значения указанной установки. При этом используются установки записи: MEM/X — запись во внутреннюю память; V24/X — запись во внешнюю память; ВЫК. — без записи. Величина X обозначает: 1 — запись измеренных значений; 2 — запись вычисленных значений; 3 — запись измеренных и вы-

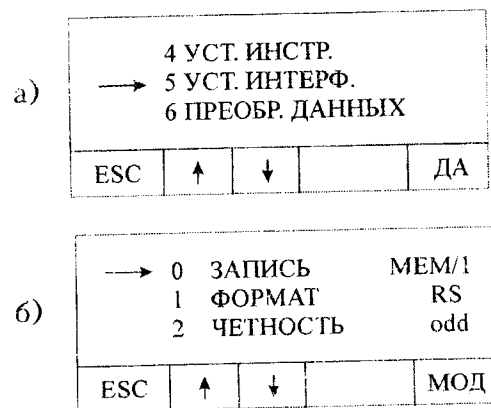


Рис. 3.6. Установки:
а) экран с фрагментом главного меню;
б) экран «установки интерфейса»

численных значений. Так как все значения, полученные в меню прибора, считаются измеренными, то можно в строке ЗАПИСЬ указать MEM/1. ESC возвращает предыдущий экран.

Аналогично выполняются в тахеометре и другие установки: единицы измерений, система отсчета вертикального угла, системы координат, ввод констант, температуры и давления, масштаба и другие.

В тахеометре Trimble используются следующие обозначения величин, выводимых на дисплей: SD — наклонное расстояние; HD — горизонтальное проложение; H_z — горизонтальный угол; V — вертикальный угол; K — код точки; T — номер точки; ih — высота прибора; th — высота отражателя; h — превышение; Z — отметка точки; Zs — отметка станции; m — расстояние в метрах; ft — расстояние в футах; DMS — углы в градусах, минутах, секундах.

В зависимости от типа выводимых на дисплей и записываемых в память прибора данных предусмотрены режимы измерений.

1. Режим SD . На дисплей после измерения выводятся значения: SD , H_z , V .

2. Теодолитный режим. Выводятся только угловые величины H_z и V .

3. Режим HD . Выводятся HD , H_z , h . Вид такого экрана показан на рис. 3.5. Если в этом режиме отметка станции Zs была введена, то на экране будут выданы значения HD , H_z , Z .

4. Координатный режим: X , Y , Z .

После ввода и установки всех необходимых параметров приступают к измерениям. Переключение режимов можно произвести крайней левой экранной клавишей (рис. 3.5). Для ввода номера точки и ее кода следует войти на вторую страницу экрана, нажать $SHIFT PNr$, затем в специальный трафарет экрана набирают код (K) и номер (T) наблюдаемой точки.

Главное меню тахеометра содержит наиболее распространенные в геодезической практике задачи: обратная засечка, полярный способ, разбивка, определение размеров (недоступного расстояния) и другие. Измерения выполняются после входа в соответствующий раздел меню, например, SHIFT MENU; ОПР. КООРД.; ПОЛЯРНЫЙ СПОСОБ. После подтверждения начальных установок вводятся высота прибо-

ра и отметка станции, а также высота отражателя, номер и код точки. Измерения выполняются после нажатия клавиши MEAS. После измерения номер точки автоматически увеличивается на единицу, а код точки остается неизменным.

Для ввода высоты прибора и отражателя следует на экране режима измерений активизировать клавишу *th/ih* (см. рис. 3.5), появится экран со строками *th*, *ih*, *Zs* (рис. 3.7).

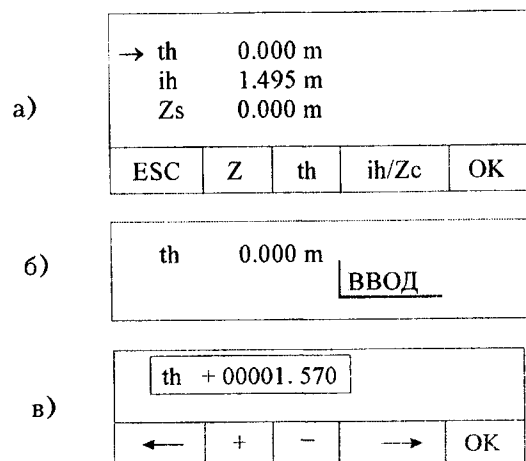


Рис. 3.7. Ввод высоты отражателя:

а) активизация строки *th*; б) активизация ввода; в) набор значения *th*

Если требуется ввести высоту отражателя, активизируют экранную клавишу *th* (рис. 3.7, а), на появившемся экране нажимают клавишу, соответствующую записи ВВОД (рис. 3.7, б) в трафарет экрана для *th* набирают значение высоты отражателя (рис. 3.7, в). При этом нужную позицию для цифры в строке выбирают клавишами ←; →, а в каждой позиции ведут перебор цифр до нужной клавишами +; -. После набора числа нажимают ОК. Аналогично вводится высота прибора *ih*.

3.1.3. Тахеометры SET30R Sokkia

Электронные тахеометры серии SET30R выпускаются с безотражательным измерением расстояний до 150 м. В зависимости от точности угловых измерений их подразделяют на SET330R, SET530R и SET630R с СКП 3", 5" и 6" соответственно. Тахеометр SET530R представлен на рис. 3.8.

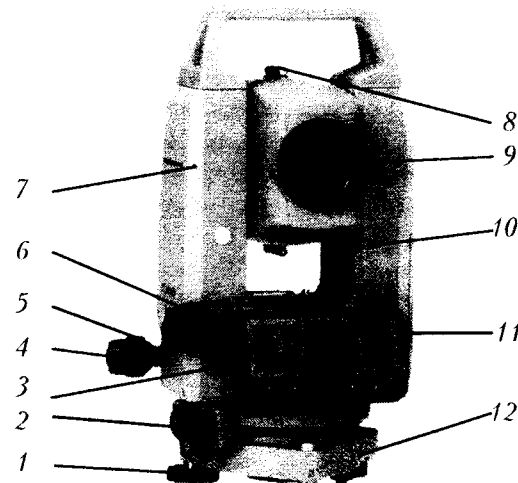


Рис. 3.8. Электронный тахеометр SET530R:

1 – подъемный винт; 2 – интерфейсный порт; 3 – дисплей; 4, 5 – наводящий и закрепительный винты алидады; 6 – оптический центрир; 7 – приемный датчик для внешней клавиатуры; 8 – коллиматорный визир; 9 – объектив; 10 – аккумуляторный отсек; 11 – клавиатура; 12 – трегер

Дисплей прибора (рис. 3.9) – графическая точечная жидкокристаллическая матрица размерностью 192×80 точек. Клавиатура представлена четырьмя программными клавишами F1, F2, F3, F4 и одиннадцатью служебными. Большинство клавиш выполняют несколько функций.

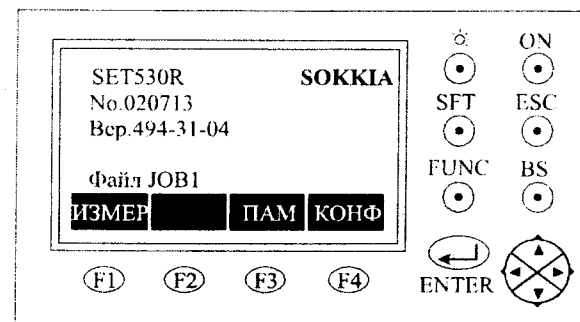


Рис. 3.9. Дисплей и клавиатура SET530R

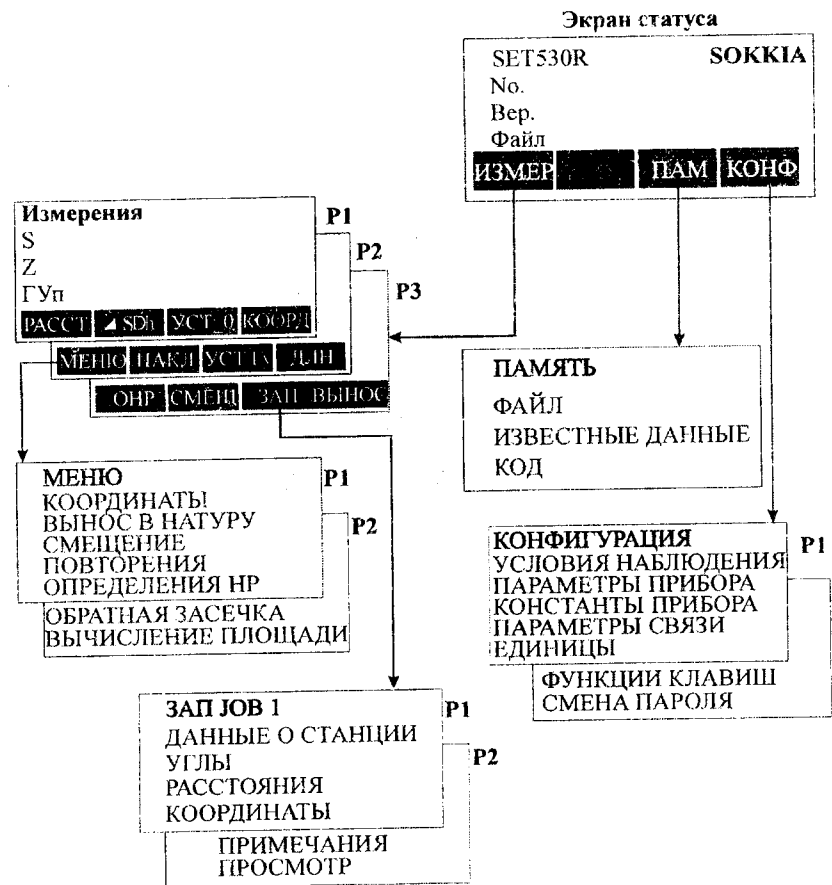


Рис. 3.10. Диаграмма режимов SET530R

В качестве источника питания используется компактный литиево-ионный аккумулятор, который вставляется в специальный отсек прибора.

После включения тахеометра на дисплее появляется экран статуса, вид которого показан на рис. 3.9. Над программными клавишами F1, F3 и F4 в экране статуса расположены экранные клавиши ИЗМЕР; ПАМ; КОНФ, их активизация осуществляется нажатием соответствующих программных клавиш, переводя управления прибором в режимы: измерений, памяти и конфигураций. Каждый режим имеет свой вид экрана. Экран измерений представлен тремя

страницами P1, P2, P3, а режим конфигурации — двумя: P1 и P2. Каждая страница экрана измерений оснащена четырьмя экранными клавишами, позволяющими проводить измерения и получать данные на экране в своих режимах. Функции и расположение экранных клавиш на страницах экрана измерений можно менять, а также заменять другими, предусмотренными внутренним программным обеспечением прибора. Режимы экранных клавиш могут иметь разветвления. Так, перечень разветвлений режимов записи (ЗАП) и МЕНЮ представлен на двух страницах каждый.

Основные переходы между режимами работы прибора и режимами экрана измерений показаны на диаграмме (рис. 3.10). Активизация экранных клавиш режима измерений осуществляется соответствующими программными клавишами F1, F2, F3, F4, а переключение страниц экрана — клавишей FUNC.

Если в экранах режимов предусмотрено деление на под-режимы и действия, указанные в строках экранной страницы, то для входа в них устанавливают на выбранную строку курсор и нажимают клавишу ENTER. Возврат в предыдущий экран выполняется клавишей ESC.

Начальные установки перед измерениями проводят в режиме КОНФИГУРАЦИИ. При этом можно ввести или изменить константы и параметры, единицы измерений, функции экранных клавиш, показатели метеословий. Устанавливают пароль, защищающий от несанкционированного использования прибора и информации в нем.

Режим ИЗМЕРЕНИЯ управляет видами измерений, проводит непосредственно сами измерения, предусмотренные ПО вычисления, записывает их результаты в память. Вид первой страницы экрана измерений представлен на рис. 3.11. После наведения на точку и нажатия клавиши РАССТ (F1) на нем отображаются измеренные значения на снимаемую точку.

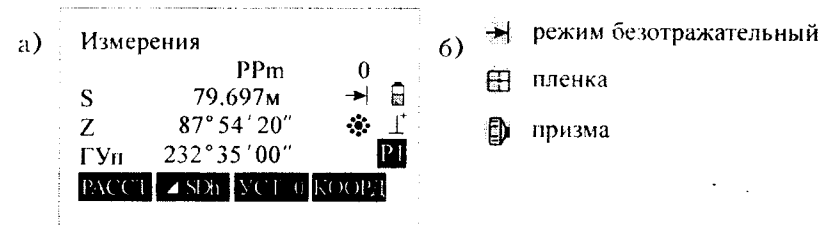


Рис. 3.11. Экран измерений:

а) информация на экране; б) выбор типа отражателя

Поправка на метеоусловия вводится в измеренные расстояния, она учитывает изменение коэффициента преломления дальномерного луча с изменением температуры и давления. Нулевое значение поправки (0 PPrn) установлено в тахеометре для температуры 15 °С и атмосферного давления 1013 гПа. Для высокоточного измерения расстояний берут средние значения температуры и давления по маршруту распространения луча и вводят в данных о станции, тогда поправка вычисляется по ним. Можно ввести известные значения этой поправки с клавиатуры в режиме ДЛН второй страницы экрана измерений.

Режим ПАМЯТЬ предназначен для организации файлов и проведения записей в них результатов измерений. Устанавливается код доступа к ним. Обычно организуют в памяти прибора файл исходных данных и рабочие файлы, в которые записывают результаты измерений. Рабочих файлов можно организовать несколько, что позволяет записывать и сохранять информацию одновременно по нескольким видам работ на объекте или по нескольким объектам. В файл исходных данных вводят с компьютера или с клавиатуры каталог координат опорных пунктов на объекте. Обмен информацией «тахеометр — компьютер» и обратно осуществляется через режим ПАМЯТЬ с использованием ПО.

Методика измерений тахеометром SET30R будет рассмотрена в разделе 3.3.

Электронные тахеометры этой серии имеют функцию лазерного целеуказателя. Прибор излучает лазерный луч, пятно которого можно навести на цель и использовать при съемке в условиях недостаточной освещенности. Это особенно значимо для работы в цехах промпредприятий. Кроме того, указатель створа повышает эффективность разбивочных работ на местности.

Тахеометры (кроме SET630R) могут работать под управлением с пульта внешней клавиатуры. Внешняя клавиатура является беспроводной, связь с ней выполняется через приемный датчик прибора. На ней повторены клавиши прибора: программные (F1, F2, F3, F4), служебные (SFT, ESC и другие). Отдельно вынесена клавиша измерений MEAS, имеются алфавитно-цифровые клавиши. Такая клавиатура делает процесс измерений удобным в любых условиях, а при высокоточных измерениях позволяет снизить

механическое воздействие на установку прибора при нажатии его клавиш.

В тахеометрах SET применены компактные электронные платы, легкий лазерный дальномер, что снижает неблагоприятное влияние нагрузок при вращении алидады и зрительной трубы прибора. При измерении углов считывание с ГК и ВК проводится с диаметрально противоположных участков лимба по RAB-коду двумя датчиками. Поэтому тахеометры SET обеспечивают высокую точность результатов измерений в любых условиях.

3.2. Поверки электронного тахеометра

Электронный тахеометр, как любой геодезический прибор, должен быть поверен и отъюстирован перед производством работ. Учитывая совмещенность дальномерных и угловых измерений, в тахеометре должны выполняться геометрические условия взаимного положения оптико-механических и оптико-электронных осей. Поэтому полный набор поверок и юстировок проводится на специальных стендах, описанных, например, в работе [14], или в сервисных центрах. Однако ряд основных поверок можно выполнить в полевых условиях. Более того, регулярное проведение некоторых поверок является обязательным, так как измерения электронным тахеометром проводятся при одном положении ВК прибора, а поправки за коллимацию, место нуля ВК и место нуля компенсатора наклона вертикальной оси автоматически вводятся в результаты измерений. Неучтенные изменения этих поправок приводят к снижению точности результатов измерений. Перед поверками необходимо внимательно изучить методику их проведения и юстировки по руководству к эксплуатации конкретной модели тахеометра.

В данном пособии приведены лишь основные поверки с их пояснением для модели SET30R, некоторые особенности будут указаны для тахеометров типа 3Та5Р и TS3300.

1. *Поверка уровней* (круглого и цилиндрического) проводится аналогично теодолитам. Подъемными винтами пузырька уровня выводится в нуль-пункт, и верхняя часть прибора поворачивается на 180°. При отклонении пузырька проводится юстировка положения уровня соответствующими юстировочными винтами на половину смещения пузырька.

Поверки сетки нитей зрительной трубы и равенства подставок выполняются аналогично теодолиту.

2. *Поверка оптического центрира* также проводится аналогично традиционным приборам, имеющим встроенный центрир. Тахеометр тщательно центрируют и горизонтируют над точкой, поворачивают алидаду на 180° . Точка должна остаться в центре сетки нитей центрира. При смещении сетки нитей с точки проводят юстировку юстировочными винтами центрира на половину смещения. После юстировки точка должна оставаться в центре сетки нитей оптического отвеса при любом повороте алидады.

3. *Поверка компенсатора наклона вертикальной оси прибора*. Тщательно горизонтируют прибор с помощью подъемных винтов по цилиндрическому уровню. По горизонтальному кругу устанавливают нулевой отсчет нажатием клавиши *Уст 0*. В режиме конфигурации входят в строку КОНСТАНТЫ ПРИБОРА, на появившемся экране входят в строку КОМПЕНСАТОР X Y и нажимают ENTER. На экране выдаются скомпенсированные автоматически угловые отсчеты по оси X_1 (направление визирования) и по оси Y_1 (ось вращения зрительной трубы). Верхнюю часть прибора поворачивают на 180° , снова выводятся на экран скомпенсированные угловые отсчеты X_2, Y_2 . Берут их среднее значение, которое принимают за место нуля компенсатора:

$$MOX = \frac{X_1 + X_2}{2}, \quad MOY = \frac{Y_1 + Y_2}{2}. \quad (3.1)$$

Эти значения не должны превышать по модулю $20''$. Юстировка их проводится при КЛ нажатием соответствующей экранной клавиши, после чего поверку повторяют.

4. *Определение коллимационной ошибки и места нуля вертикального круга*. Перед поверкой необходимо тщательно отгоризонтировать тахеометр по цилиндрическому уровню. Для визирования выбирают устойчивую четкую точку, удаленную примерно на 100 м, угол наклона на нее не должен превышать $\pm 9^\circ$. В приборе устанавливают режим юстировок (поправок).

Поправки за коллимацию (c) и место нуля (МО) ВК следует вводить при КЛ, поэтому их определение лучше начинать с наблюдений при КП. Точно визируют на выбранную

точку, нажимают клавишу измерений. Операции повторяют при другом положении зрительной трубы (КЛ) прибора. Значения c и МО ВК выдаются на экран. С помощью экранных клавиш их можно ввести в память прибора.

Следует отметить, что текущие значения поправок c ; МО ВК; МОХ; МОУ можно определять одновременно, используя виды экрана для их вывода на дисплей, а при юстировке — свои экранные клавиши для их ввода в прибор.

5. *Определение постоянной поправки (K) дальномера электронного тахеометра*. У современных тахеометров установлено значение $K = 0$. Однако ее изменение приводит к систематическим погрешностям в расстояниях. Поэтому постоянную поправку прибора рекомендуется регулярно контролировать. Постоянную поправку дальномера не следует путать с постоянной поправкой отражателя, которая вычисляется по геометрическим размерам призмы, типу стекла и положению вертикальной оси отражателя. Так, постоянная призма тахеометра Trimble составляет 35 мм, тахеометров SET — 30 мм (призмы APO1S+APO1), тахеометров типа 3Та5 — 0 мм. Все дальномеры одной серии согласованы с отражателями, входящими в их комплект, так, что постоянная прибора $K = 0$. Использование отражателя другой серии или модели меняет эту постоянную за счет отражателя. Однако она может изменяться с течением времени и независимо от отражателя.

Чаще всего постоянную поправку дальномера определяют на базисах, длина которых известна. При этом

$$K = B - D,$$

где B — эталонное значение длины линии; D — измеренное тахеометром значение длины линии. Такие измерения выполняют с перестановкой прибора в пределах фазового цикла.

При отсутствии базисных линий K определяют из измерений трех отрезков на прямой АВ (рис. 3.12), такой способ называется безбазисным.

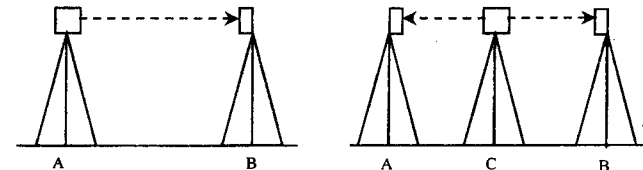


Рис. 3.12. Безбазисный способ определения постоянной поправки дальномера

На ровной местности выбирают две точки A и B на расстоянии примерно 100 м, их закрепляют устойчивыми точками. Тщательно центрируют над ними прибор и отражатель, измеряют расстояние D_{AB} . В створе линии AB выставляют по зрительной трубе точку C , центрируют над ней штатив. На него переносят тахеометр, а над точками A и B устанавливают отражатель. Измеряют отрезки D_{CA} и D_{CB} . Для исключения погрешности центрирование рекомендуется использовать трехштативную систему наблюдений. Из соотношения

$$D_{AB} + K = D_{AC} + K + D_{CB} + K$$

следует:

$$K = D_{AB} - (D_{AC} + D_{CB}) \quad (3.2)$$

Измерения проводят несколько раз и берут среднее значение K . Можно использовать несколько точек C_i .

Если точка C не выставлена в створ, то на нее следует измерить горизонтальные углы β_A и β_B (рис. 3.13).

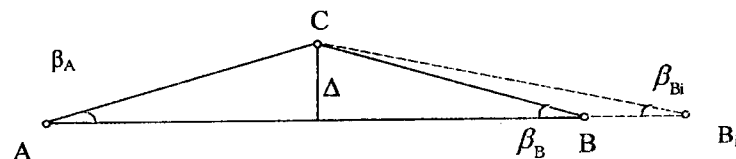


Рис. 3.13. Линейно-угловые измерения для определения K .

Тогда для вычисления постоянной поправки предлагается формула [3]:

$$K = \frac{(D_{AC} \cdot \cos \beta_A + D_{CB} \cdot \cos \beta_B) - D_{AB}}{1 - (\cos \beta_A + \cos \beta_B)} \quad (3.3)$$

Погрешность определения поправки K по формуле (3.2) составляет $\sqrt{3}m_D$, где m_D — СКП линейных измерений тахеометром. Расчеты показывают, что при смещении от створа $\Delta < 10,1$ м и СКП угловых измерений $5''$ влиянием угловых измерений на точность определения K в формуле (3.3) можно пренебречь. Если применение формулы (3.2) требует

построения створа и центрирования прибора и отражателя над точками A , B и C , то применение формулы (3.3) не требует построения створа и, следовательно, центрирования. Достаточно выставить два штатива, выбрать точку C , задавая створ приближенно. Измерений с точки C можно выполнять несколько. Но число переходов с прибором уменьшится, если между приемами переставлять точку B . Это позволит определить поправку дальномера n раз и обеспечить требуемую точность ее контроля.

У некоторых электронных тахеометров (например, ЗТа5) используется для определения постоянной поправки дальномера специальный блок контрольного отсчета (БКО). Он надевается на объектив зрительной трубы до упора и тахеометром измеряется расстояние без выхода сигнала на дистанцию. Для этого через МЕНЮ входят в РЕЖИМ Т, на появившемся экране выбирают строку КОНТР. ОТСЧЕТ, нажимают клавишу ИЗМЕР. Полученное контрольное расстояние высвечивается на экране прибора. По нескольким измерениям выводят среднее значение и сравнивают с паспортным контрольным отсчетом.

Юстировку поправки выполняют, если K превышает ± 3 мм по нескольким определениям. Юстировка выполняется в сервисных центрах. В некоторых моделях тахеометров предусмотрен ввод нового значения постоянной K .

6. *Определение постоянной поправки отражателя* выполняется, если в работе применяется отражатель другой фирмы или типа. Для этого измеряют одно и то же расстояние с отражателем, входящим в комплект прибора (D_0), и с новым отражателем (D_1). Постоянная поправка отражателя вычисляется по формуле:

$$K_{\text{отр}} = D_0 - D_1 \quad (3.4)$$

Измерения проводят несколько раз, вычисляют среднее значение поправки, которое вводится для измерений на новый отражатель в виде дополнительной поправки.

7. *Рабочая ось электронного дальномера должна совпадать с визирной осью зрительной трубы.* Если центр сетки нитей трубы навести на центр отражателя, то максимальный сигнал с дистанции должен поступать от этой же точки. Установить, выполнено ли это условие, можно путем наведения на центр

отражателя, удаленного от тахеометра не менее чем на 50 м. После точного наведения на цель проверяют уровень отраженного сигнала прибора, включив режим измерения расстояний с индикацией уровня сигнала. Наводящими винтами плавно перемещают сигнал по отражателю вверх — вниз и вправо — влево. Находят положение, при котором уровень индикации отраженного сигнала, выдаваемый на дисплей, будет максимальным. В зрительную трубу определяют, на сколько положение сетки нитей при этом сместилось с центра отражателя. Если центры визирования и максимума дальномерного сигнала не совпадают, необходима юстировка оптико-электронных каналов дальномерной части тахеометра, которая проводится на специальных стендах сервисных центров.

8. Рабочая ось указателя створа должна совпадать с визирной осью зрительной трубы тахеометра.

Указатель створа применяется при разбивочных работах и других операциях. Он представляет собой источник излучения, обеспечивающий видимый луч. У тахеометров SET излучение осуществляется в двух диапазонах частот видимого спектра: красном и зеленом. Рабочая ось указателя створа проходит по разделительной линии между красным и зеленым цветом видимого луча. Для подключения указателя необходимо в режиме конфигурации тахеометра установить параметр ИЗЛУЧЕНИЕ на значение СТВОР.

Для проверки тщательно наводят сетку нитей трубы на центр отражателя, установленного примерно в 20 м от прибора. Включают указатель створа, устанавливают нулевой отсчет по ГК. Глядя в зрительную трубу, убеждаются, что линия деления между красным и зеленым цветом совпадает с вертикальной осью отражателя. Наводящим винтом слегка поворачивают алидаду до тех пор, пока в отражении не станет виден только зеленый (и в противоположную сторону — только красный) цвет излучения. Снимают отсчет по ГК в этих положениях.

Если разность отсчетов по ГК превышает 1' (или после наведения на центр отражателя был виден один цвет), проводят юстировку. Вращая юстировочный винт указателя створа, смещают положение разделительной линии излучения до совмещения с положением вертикальной нити сетки трубы тахеометра, наблюдаемой на отражателе. После юстировки проверку повторяют.

3.3. Производство измерений электронным тахеометром

Работы на объекте начинают с получения технического задания, анализа топографо-геодезической изученности территории, определения системы координат, требуемой точности работ. Проводится рекогносцировка и обследование пунктов ОГС, составляется проект работ. Определяется ПО, на основе которого будет проводиться обработка результатов. Составляется каталог координат существующих пунктов ОГС.

Подготовка тахеометра к работе включает:

- проверки и юстировки прибора, оптического центрира для отражателя, уровня на вехе для призмы;
- комплектование оборудования в зависимости от длин линий, применяемых отражателей и вида работ;
- зарядку аккумуляторов;
- в режиме памяти выбор файлов исходных данных и файлов для записи результатов измерений;
- ввод каталога координат с компьютера в файл исходных данных памяти тахеометра;
- очистку рабочих файлов от старой информации.

Если обработка будет выполняться после полевых измерений, то каталог исходных пунктов можно ввести при обработке и в тахеометр не вводить.

Работу на станции начинают с установки и приведения прибора в рабочее положение. Для этого штатив над точкой ставят по отвесу, вдавливают его ножки, регулируя их высоту, чтобы головка штатива была горизонтальной. Тахеометр ставят на штатив, закрепляют становым винтом. Проводят окончательное центрирование и горизонтирование прибора с помощью встроенного оптического центрира, подъемных винтов, уровня. Измеряют высоту тахеометра от марки центра пункта до метки высоты прибора. Она должна измеряться до миллиметра, поэтому используют выдвижную веху с миллиметровыми делениями. Её вставляют в отверстие в подставке (предварительно вынув тахеометр из подставки) до упора в марку, измеряют высоту верха подставки и к ней прибавляют стандартную высоту прибора.

При прокладке ходов полигонометрии используют трехштативную систему, если это позволяют подставки (трегеры) под отражатель, входящие в комплект прибора. В этом

случае штативы устанавливают над точкой начального ориентирования (пункт ОГС) и над следующей за станцией точкой хода (003, рис. 3.14). Подставки центрируют и горизонтируют по оптическому центру. Отражатели направляют на тахеометр, измеряют высоту до центра отражателя.

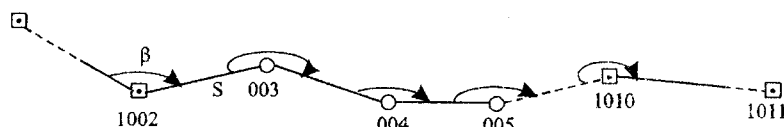


Рис. 3.14. Ход полигонометрии

Для съемки, прокладки теодолитного хода, построений засечками призму отражателя можно устанавливать на вежу, которая в отвесное положение приводится по круглому уровню. Для привязки к пунктам ОГС ось вежи отражателя устанавливают над центром марки пункта. Если проводится только угловая (азимутальная) привязка к пункту ОГС, то достаточно поставить на вежу визирную марку без отражателя. Её можно использовать в безотражательном режиме для измерения коротких расстояний.

Основные методы работы с электронными тахеометрами являются общими для большинства моделей и конкретизируются в соответствии с их возможностями, внутренним программным обеспечением, функциями клавиш. Поэтому производство измерений рассмотрим на базе SET030R.

Прибор включают, он автоматически проводит самодиагностику и просит ввести пароль. Появляется режим статуса, из которого входят в режим конфигурации, если требуется ввести константы прибора и условия наблюдений. Затем устанавливают экран измерений. Сначала вводят в прибор данные о станции. Для этого активизируют клавишу ЗАП режима измерений, появится экран ЗАПИСЬ с указанием номера рабочего файла и названием данных. Выбирают курсором строку ДАННЫЕ О СТАНЦИИ, нажимают ENTER, в появившемся окне нажимают клавишу РЕДКТ. Для ввода в обозначенные строки набирают следующие данные:

- имя точки (Т);
- высота инструмента (Выс И);
- код станции;
- оператор;

- дата;
- время;
- погода (ясно, облачно, пасмурно, дождь и т. д.);
- ветер (нет, легкий, сильный, умеренный и др.);
- температура;
- давление;
- атмосферная поправка.

Набранные значения проверяют, нажимают клавишу ДА, данные будут введены. Нажимают ESC для возвращения в экран ЗАПИСЬ и регистрации результатов измерений. Атмосферную поправку вводят только при высокоточных измерениях, в остальных случаях она принимается по умолчанию нулевой, а температура и давление — стандартными.

Измерения начинают с визирования на пункт начального ориентирования. Наводящими винтами трубы и алидады совмещают изображение центра сетки нитей с центром визирной марки или отражателя, процентрированных над пунктом.

Для измерения и записи результатов в указанный рабочий файл проводят следующие операции.

1. В экране ЗАПИСЬ курсором выбирают УГЛЫ, нажимают клавишу ESC до возвращения в экран измерений. В нем нажимают клавишу Уст 0, когда она будет мигать, нажимают повторно. Будет выставлен нулевой отсчет по ГК на начальное направление. Нажимают клавишу ЗАП.

2. В экране ЗАПИСЬ выбирают РАССТОЯНИЯ. Через ESC возвращаются в экран измерений, нажимают клавишу РАССТ. На экране отобразятся: наклонное расстояние S, вертикальный угол Z, отсчет по ГК (см. рис. 3.11). Нажимают клавишу ЗАП, затем РЕДКТ. В появившемся трафарете набирают: Т — имя (номер точки); ВЫС Ц. — высоту цели; код точки, если используется кодирование. Набранные данные проверяют. Они будут введены после нажатия ДА.

3. Визируют на переднюю точку хода. В экране ЗАПИСЬ выбирают РАССТОЯНИЯ, проводят измерения (клавиша РАССТ экрана измерений). Нажимают клавишу ЗАП, затем РЕДКТ. Набирают имя точки визирования, высоту цели, код точки.

Для повышения точности угловые измерения в ходе полигонометрии можно провести несколькими приемами способом повторений. Войти в этот режим можно, нажав МЕНЮ экрана измерений и в появившемся экране активизировав

ПОВТОРЕНИЯ. После установки нуля на начальное направление нажимают клавишу ДА, визируют на другую цель, нажимают ДА, вновь на начальное направление — ДА, другую цель — ДА и т. д. На экран после нажатия клавиши ОТМ выдается суммарное значение угла из n повторений, число n , средний угол из n приемов.

4. Проводят с этой же станции съемку пикетов или иных точек объекта полярным способом. Для записи в рабочий файл однотипных точек, когда высота отражателя на веку постоянна, а номер точек можно автоматически увеличивать на единицу, используют режим записи АВТО. Для его активизации в экранах ЗАП/РАССТ и ЗАП/УГЛЫ нажимают клавишу АВТО. Веху с отражателем ставят на первый снимаемый пункт, визируют на него, нажимают клавишу РАССТ, вводят его номер. Номера остальных точек будут увеличены на единицу автоматически.

Измерения пунктов можно выполнять в режиме координат, нажав клавишу КООРД экрана измерений. В этом режиме также действует запись АВТО. Однако для этого режима предварительно должны быть введены (или извлечены из файла исходных данных) координаты станции и точки начального ориентирования. Следует иметь в виду, что допущенные ошибки в координатах исходных точек в этом режиме войдут в координаты всех снятых пикетов.

5. Переходят на следующую станцию. При трехштативной системе основание прибора вынимают из подставки и ставят вместо него визирную марку с отражателем, а прибор — в подставку бывшей передней точки хода. Штатив с задней точки переносят вперед на следующую за новой станцией переднюю точку. При отсутствии трехштативного комплекта центрирование всех точек новой станции проводят вновь. Измерения и запись в файл на новой станции проводят аналогично. При прокладке хода горизонтальные углы измеряют все правые или левые по ходу. Из построения хода электронным тахеометром определяются не только координаты, но и отметки пунктов методом тригонометрического нивелирования.

Съемку электронным тахеометром можно проводить с точки свободной станции, если с нее есть прямая видимость на два и более пункта ОГС. В этом случае координаты станции определяются из обратной линейно-угловой засечки. Режим обратной засечки предусмотрен во всех моделях элек-

тронных тахеометров. Определения выполняются и обратной угловой засечкой, при этом наблюдаться должны три и более исходных пункта. Из засечки определяется также отметка станции.

В тахеометрах SET 030 для входа в режим обратной засечки следует нажать клавишу МЕНЮ экрана измерений, выбрать строку ОБРАТНАЯ ЗАСЕЧКА. После нажатия клавиши СЧИТ можно вызвать и считать координаты пунктов ОГС из файла исходных данных, перемещая курсор на нужные точки каталога. Для ввода их с клавиатуры нажимают клавишу РЕДКТ. После набора координат одной точки ОГС нажимают клавишу « \leftrightarrow » и переходят к набору следующей точки. После ввода координат всех исходных точек нажимают клавишу ИЗМЕР. Визируют на первую известную точку, нажимают РАССТ (или угол в угловой засечке), результаты измерений появятся на экране. Нажимают клавишу ДА, вводят высоту цели. Аналогично наблюдают остальные исходные пункты. После окончания наблюдений нажимают клавишу ВЫЧ для автоматического запуска вычислений. Запись результатов измерений выполняется нажатием клавиши ЗАП.

Точность определения координат из обратной засечки зависит от геометрии построения, а при плохой геометрии засечки решение задачи может оказаться практически невозможным. Таким является настолько близкое расположение двух исходных точек, что горизонтальный угол между направлениями на них будет недопустимо мал. В этом случае необходимо использовать другие или дополнительные исходные пункты. Неблагоприятной также является геометрия угловой засечки, если станция и три известных пункта лежат на одной окружности. После измерений на исходные пункты засечки можно выполнять тахеометрическую съемку пикетов (рис. 3.15).

Для проведения съемки электронные тахеометры имеют ряд дополнительных режимов. Рассмотрим основные из них.

Безотражательный режим применяется, если установка отражателя на снимаемую точку затруднена или невозможна, но точка видна. Для его запуска в экране измерений на 2-й странице нажать клавишу ДЛН, войти в строку ОТРАЖАТЕЛЬ, нажать клавишу РЕДКТ, значение параметра установить НЕТ (без отражателя). В безотражательном режиме рекомендуется проводить только горизонтальную съем-

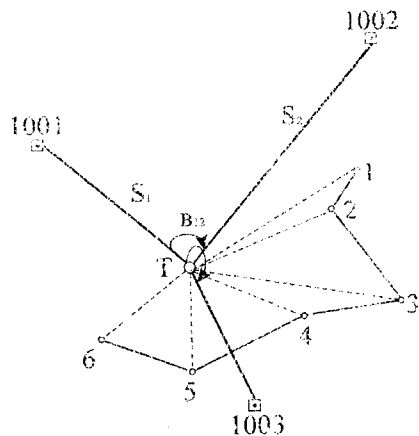


Рис. 3.15. Обратная линейно-угловая засечка:
 O — станция тахеометра; 1003 — номер пункта ОГС или сетей съемочного обоснования; 5 — номер снимаемого пикета

ку, так как при этом высота визирования на снимаемой точке не измеряется, и вычислить отметку этой точки нельзя. Съемку в безотражательном режиме можно выполнить одним оператором без реечника.

Измерения со смещением применяется, если снимаемый пикет со станции не виден. Тогда выбирают его смещенное положение, которое снимают, и измеряют величину смещения. Смещение может выполняться вправо или влево от снимаемой точки по перпендикуляру к линии визирования на смещенное положение, а также вперед и назад по линии визирования. Выбрав смещенную точку, устанавливают на ней отражатель, измеряют величину смещения. Визируют на смещенную точку, нажимают в экране измерений РАССТ, результаты появятся на экране. Нажимают клавишу СМЕЩ, в появившемся экране выбирают строку СМЕЩ/РАССТ, нажимают клавишу РЕДКТ для ввода в трафарет экрана следующих значений: РАССТ — горизонтальное проложение смещения; ОТРАЖ — положение отражателя («←→» — слева, «→» — справа от измеряемой точки, «↓» — ближе, «↑» — дальше измеряемой точки). После нажатия клавиши ДА на экран выводится расстояние и углы на снимаемую (несмещенное положение) точку. Результаты измерений можно вывести на экран в координатах. Однако следует учесть, что отметка будет определена для смещенной точки.

Определение размеров строения методом измерений недоступного расстояния применяется для косвенного обмера снимаемых строений или их частей. Без перемещения прибора с одной станции можно определить для точек объекта расстояние (наклонное и горизонтальное) и превышение между ними. Измерения можно проводить в безотражательном режиме, если визируют непосредственно на снимаемые точки строений. Для измерений выбирается начальная точка, относительно которой будут определяться размеры объекта. Визируют на нее, нажимают клавишу РАССТ на экране измерений. Наводят на вторую точку объекта, нажимают клавишу ОНР. На экране появятся значения S , D , h между начальной и второй точкой (рис. 3.16). Наводятся на третью точку объекта, нажимают ОНР, на экране будут аналогичные значения между начальной и третьей точкой и т.д. После нажатия клавиши СМЕНА последняя измеренная точка становится начальной для следующей серии точек обмера. Выход из режима ОНР осуществляется нажатием клавиши ESC.

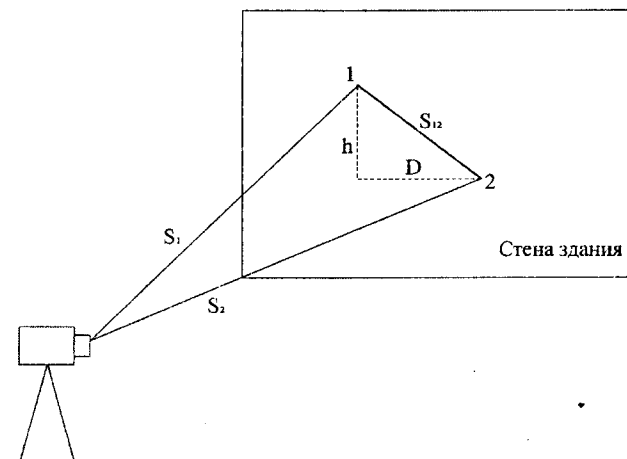


Рис. 3.16. Схема определения размеров при съемке строения электронным тахеометром:

S_{12} — расстояние между точками объекта;
 D — горизонтальное проложение; h — превышение

Определение высоты недоступного объекта применяется при высотной съемке точек, расположенных за пределами безотражательного режима измерений, а установка на них отражателя недоступна. Для съемки в этом режиме от-

ражатель устанавливают под (или над) снимаемой точкой объекта, измеряют его высоту. После ввода в прибор высоты отражателя визируют на него, нажимают клавишу РАССТ. На экране появятся измеренные до отражателя S , Z , Gy . Далее наводят на снимаемую точку объекта, нажимают клавишу ВНО. На экран будут выведены: ВИС, S , Z , Gy , где ВИС — высота определяемой точки над точкой объекта (земли), на которой стоит отражатель.

3.4. Обработка результатов измерений

Электронным тахеометром выполняются различные виды работ по назначению, сложности построений, требованию к точности, типу конечной продукции. Поэтому математическая обработка может отличаться по объему и применяемому модулю ПО в каждом конкретном случае. Но в целом можно выделить три основных этапа обработки:

- первичная обработка результатов непосредственных измерений на основе встроенного ПО тахеометра;
- передача информации с тахеометра на компьютер;
- окончательная обработка результатов измерений с использованием универсальных программных пакетов с выдачей требуемой информации, в том числе в графическом виде.

Первичная обработка измерения углов и расстояний тахеометром выполняется автоматически после входа в соответствующий режим меню или режим работы прибора и сопровождается измерением. Встроенное ПО входит в техническое оснащение электронного тахеометра и обеспечивает ввод информации, настройку (установки) прибора, вычисление элементов привязки, определение координат и других геодезических величин, решение прикладных задач, настройку интерфейса. Оно же осуществляет управление отдельными операциями и работой прибора в целом, обеспечивая высокопродуктивный удобный уровень работы с ним. В некоторых случаях первичной обработки измерений, выполняемой тахеометром, достаточно, особенно при определении координат отдельных точек в режиме реального времени. Определение координат полярной и обратной засечками выполняют все модели тахеометров непосредственно на станции. При этом обратная линейно-угловая засечка решается в тахеометре SET путем уравнивания по методу наименьших квадратов с оценкой точности опреде-

ления координат, используя до десяти приближений, пока разности координат в последовательных итерациях не будут меньше 0,5 мм. Дополнительная обработка таких определений чаще всего не требуется.

Однако математическая обработка ходов и других сложных построений, а также обработка и нанесение на план материалов съемки должны выполняться по специальным программам. В настоящее время для этого используются универсальные программные пакеты и комплексы. Для обработки в них информация полевых измерений передается с электронного тахеометра в компьютер.

Обмен информацией «тахеометр — компьютер» и обратно выполняют с помощью индивидуальных программ передачи данных, прилагаемых к комплекту прибора, или универсальных программ, используемых для обработки. Так, в тахеометре типа 3Та5 применяют ГЕО КОД 2000 СТАРТ, в тахеометре TS3300 ПО Topography, MS-Windows™, в тахеометрах SET030 — PROLINK и MAPSUITE+. Из универсальных программ в РФ распространена CREDO DAT.

Для передачи информации используется интерфейсный кабель, который входит в комплект тахеометра. Он присоединяется к интерфейсному порту тахеометра (см. рис. 3.4 и рис. 3.8) и к последовательному порту 9 pin компьютера. При подключении кабеля электронный тахеометр и компьютер должны быть выключены. Загружается программа передачи данных. Дальнейшие действия зависят от типа тахеометра и используемой программы.

В тахеометре 3Та5Р необходимо установить режим связи с компьютером путем: МЕНЮ; КАРТА ПАМЯТИ; СВЯЗЬ С РС. При работе с программой CREDO DAT скорость обмена RS-232C 4800 бод. В карте памяти вся информация содержится в файле 3та5.txt. Вывод начинается по инициативе тахеометра без дополнительных символов. В конце файла передаются символы FF.

Информацию можно записать из карты памяти в компьютер через дисковод PCMCIA без программы передачи данных.

В тахеометре Trimble 3300 после подключения интерфейсного кабеля необходимо войти в меню интерфейса: SHIFT MENU; УСТ. ИНТЕРФ.; ДА. В появившемся экране необходимо установить: формат, четность и скорость передачи данных. Запустить на компьютере программу пере-

дачи данных, установить в компьютере (окне программы) те же параметры передачи данных. Установить режим приема.

В тахеометре активизировать строку меню ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДАННЫХ, нажать клавишу ДА, выбрать строку меню передачи данных «МЕМ → Периферия», нажать ДА. В появившемся экране указать строки (адреса) передаваемых данных, клавишей ДА подтвердить начало передачи строк (рис. 3.17). После завершения передачи указывается число выбранных и полученных строк. Нажатием ESC завершается передача информации в компьютер.

| | | | | |
|-------------------|--|----|--|----|
| Выдать все данные | | | | |
| от адреса: | | 04 | | |
| до адреса: | | 32 | | |
| НЕТ | | | | ДА |

| | |
|---------------|----|
| Строки данных | |
| Выбрано: | 29 |
| Выдано: | 29 |
| ESC | |

Рис. 3.17. Вид экрана передачи данных

В тахеометрах SET передача данных в целом выполняется аналогично. Последовательность и детализацию ее рассмотрим с программой MAPSUITE+, которая может применяться для последующей обработки данных, а ее базовым модулем комплектуются сейчас тахеометры Sokkia.

После подключения интерфейсного кабеля запускают программу в компьютере. В ней создают рабочий файл РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ, появится окно для приема данных. В меню ФАЙЛ выбирают строку ИМПОРТ и указывают тип тахеометра, отмечают строку СОХРАНИТЬ В ФАЙЛЕ. В окне ПАРАМЕТРЫ СВЯЗИ указывается имя порта (например, COM1), скорость передачи (например, 9600) и другие параметры.

В тахеометре войти в режим конфигурации, выбрать строку ПАРАМЕТРЫ СВЯЗИ. В появившемся экране прибора установить те же параметры передачи данных, что и в компьютере. Войти в режим ПАМЯТЬ, выбрать ФАЙЛ РАБОТЫ и ЭКСПОРТ ДАННЫХ. Курсор установить на передаваемый файл из списка, выбрать формат SDR.

При передаче в приборе работает счетчик, отображающий на экране количество переданных записей. Такой же счетчик появится в окне СТАТУС ПРИЕМА на компьютере. В результате передачи на жестком диске компьютера будет создан файл РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ с полевыми данными тахеометра в формате SDR.

Для обработки переданных результатов измерений существует в настоящее время широкий арсенал программных средств. Их выбор определяется в основном требованиями единства обработки и представления информации отдельными ведомствами и предприятиями. Часто проводится совместная обработка файлов, полученных разными геодезическими приборами, например тахеометром и спутниковым приемником. Выбирают при этом ПО, работающее в форматах используемых приборов.

Значительное распространение в РФ получил пакет программ CREDO. Для обработки данных по построению ОГС, сетей съемочного обоснования применяются модули CREDO DAT и ТРАНСКОР. При обработке измерений и оформлении землеустроительного дела их дополняют модулем ЗЕМПЛАН. Для обработки данных съемки и построения плана применяются модули CREDO DAT и CREDO TER. Используются в геодезических работах и другие модули: CREDO MIX, SYMBOL, НИВЕЛИР, TRANSFORM, АСТРО, ГИС ЭКСПОРТ.

CREDO DAT3 включает четыре основных этапа камеральных работ: ввод данных; обработку данных; экспорт данных и выпуск выходной документации. Ввод данных может осуществляться с электронных тахеометров, контроллеров, с рукописных полевых журналов, растровых файлов картографических материалов. Методика работы с программой достаточно проста. После загрузки программы выполняется настройка, вводятся в окне запроса имя (название) объекта и основные характеристики: наименование, организация, населенный пункт, название площадки, система высот, сис-

тема координат, класс плановой сети и другие. Для редактирования данных, выявления и локализации грубых ошибок, определения весовых коэффициентов указываются СКП плановых измерений, допустимые высотные невязки, доверительные интервалы. Указывается название геодезического прибора, а также единицы измерений, формула вертикального угла.

Ввод данных начинают с каталога исходных пунктов, используемых в построении. Далее используются файлы результатов измерений, полученные с тахеометра. Выполняется табличное редактирование данных. Например, при обработке хода появляется таблица с названием пунктов, горизонтальными углами, расстояниями, вертикальными углами или превышениями, а также графическое изображение введенного хода.

Работа программы включает предварительную обработку данных, анализ построения и уравнивание сети. Предварительная обработка ведет подготовку данных к уравниванию. Вычисляются горизонтальные проложения и превышения, вводятся различные поправки (если это не было сделано в приборе): за кривизну Земли и вертикальную рефракцию, за редукцию направлений и линий на поверхность относимости и в плоскость проекции Гаусса — Крюгера. Имеется возможность поверхность относимости и плоскость проекции выбирать или настраивать в соответствии с МСК. В результате предварительной обработки формируется ведомость приведенных направлений, горизонтальных проложений и превышений.

Анализ построения выполняется программой отдельно для плановых и высотных измерений. Реализован алгоритм L_p -анализа, позволяющий выявить, локализовать грубые ошибки в углах, линиях, превышениях. Если их нет, выдается информация: «Грубых ошибок не обнаружено».

Уравнивание сети выполняется программой параметрическим способом по методу наименьших квадратов. По результатам уравнивания выполняется полная оценка точности. Выдаются уравненные координаты определяемых пунктов сети с развернутой оценкой их точности, включая эллипсы погрешностей их положения. Отдельно уравниваются высотные геодезические построения. Они представляют собой при измерениях электронным тахеометром ходы и

другие схемы тригонометрического нивелирования. По результатам уравнивания формируются каталоги координат и высот пунктов геодезического построения, ведомости оценки точности плановых и высотных определений. Имеется возможность настройки выходных документов под стандарты предприятий с использованием «Генератора отчетов».

Результаты математической обработки можно экспортировать в подсистемы CREDO TER, CREDO MIX, для формирования цифровой модели местности и построения плана, а также в системы MapInfo, ArcView в открытом обменном формате (ООФ), в формате DXF или в настраиваемых пользователем форматах.

Модуль CREDO DAT выполняет также обработку полученных с тахеометра материалов тахеометрической съемки с формированием топографических объектов и их атрибутов по данным полевого кодирования. В «компоновщике чертежей» оформляются планшеты топографических планов масштабов 1:500—1:5000 с зарамочным оформлением.

3.5. Безотражательные лазерные дальномеры

Безотражательные дальномеры применяются в большинстве моделей современных электронных тахеометров. Однако для измерений при инвентаризации и оценке строений, особенно их внутренних помещений, широкое распространение получили малые (ручные) безотражательные лазерные дальномеры, которые называют также лазерными рулетками. Измерения такими дальномерами можно выполнять одним исполнителем без установки прибора на штатив.

Наиболее популярны ручные безотражательные дальномеры DISTO Leica, сейчас выпускается их новая серия. Наибольшую точность (до 1,5 мм) обеспечивают дальномеры модели Disto Pro A с дальностью действия до 200 м. Источником питания у них являются две батарейки типа AA. Дальномеры DISTO компактные, легкие и простые в эксплуатации. Они оснащены небольшим дисплеем (четырёхстрочным), встроенным малым цилиндрическим уровнем и оптическим визиром с двукратным увеличением. Удобная клавиатура позволяет быстро проводить измерения, определять по встроенным функциям площади, объемы, максимальные и минимальные расстояния из серии измерений и другие парамет-

ры обмеряемых объектов. Результаты могут быть записаны в память прибора.

На рис. 3.18 представлен безотражательный дальномер Disto Classic. Измерения могут выполняться от трех точек отсчета, расположенных на корпусе прибора.

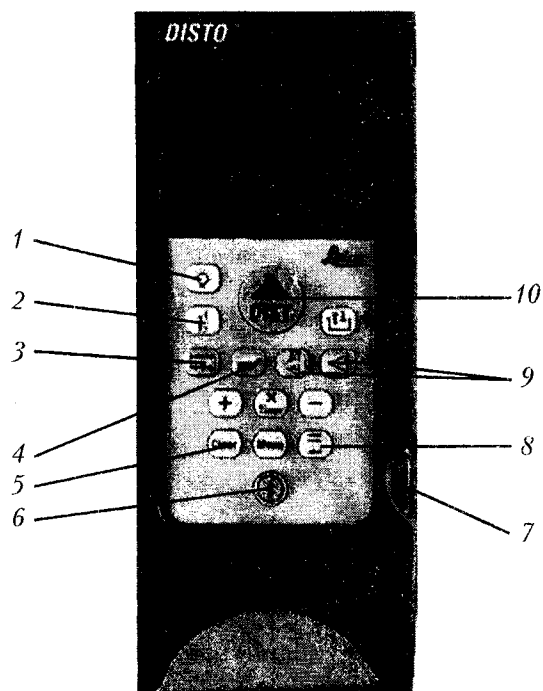


Рис. 3.18. Ручной лазерный дальномер Disto Classic:
1 – подсветка дисплея; 2 – установка (переключение) точки отсчета; 3 – клавиша режима непрерывных измерений (трекинга); 4 – вычисление площади и объема; 5 – сброс; 6 – клавиша выключения; 7 – цилиндрический уровень; 8 – Enter; 9 – клавиши встроенных функций; 10 – клавиша измерений

Установив прибор выбранной точкой отсчета в начало измеряемого расстояния, прибор включают и нажимают клавишу DIST. Появится лазерный луч красного цвета, его направляют в конечную точку измеряемой линии. Для измерения горизонтальных проложений прибор устанавливают по уровню. Снова нажимают клавишу DIST. На экране появится

длина измеряемой линии. Визирование на удаленную точку выполняют оптическим визиром, расположив дальномер на уровне глаз. Для улучшения видимости лазерного луча надевают специальные очки. Дальность действия безотражательного дальномера можно увеличить использованием отражающей пленки или мишени, а также в темное время суток или при затенении визирной цели.

При обмере строений луч дальномера часто невозможно направить перпендикулярно плоскости, на которую выполняется наведение. В этом случае в режиме функций измеряют наклонные расстояния на две или более точки объекта, по которым автоматически вычисляется расстояние, перпендикулярное плоскости. Работа в режиме трекинга min/max позволяет проводить непрерывные измерения с перемещением лазерного пятна около требуемой точки, по этим измерениям прибор определяет минимальное значение, например высоту помещения, без приведения дальномера в строго отвесное положение. Аналогично определяется максимальное расстояние из всех измеренных, например, диагональ стены или пола. Имеет прибор ряд других встроенных функций, а также меню для настройки дополнительных вычислений.

Безотражательный малый дальномер (лазерная рулетка) позволяет в комплекте с электронным тахеометром выполнить все необходимые геодезические измерения для кадастра и оценки объектов недвижимости, включая обмер внутренних помещений строений.

При работе с прибором следует соблюдать меры предосторожности: не наводить лазерный луч на уровне глаз, не смотреть на него длительное время, так как лазерный луч может быть опасен для глаз.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 3

1. Какой геодезический прибор называется электронным тахеометром? Назовите основные модели тахеометров.
2. Какие величины измеряются непосредственно тахеометром, а какие вычисляются в его программном обеспечении?
3. Назовите основные поверки тахеометра.

4. Опишите процедуры подготовки прибора к работе и последовательность действий на станции.

5. В чем состоит обратная линейно-угловая засечка? Поясните ее реализацию по рис. 3.15.

6. Каким методом осуществляется в тахеометре нивелирование?

7. С какой целью и как передается информация с тахеометра в компьютер?

8. Опишите последовательность математической обработки результатов измерений, выполненных электронным тахеометром.

9. Как проводится измерение расстояния ручным безотражательным лазерным дальномером?

Глава 4. КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

4.1. Интеграция средств геодезических измерений

Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства включает в себя целый комплекс геодезических работ: построение (сгущение) опорных геодезических и разбивочных сетей, топографические съёмки в крупных масштабах, плановые и высотные разбивочные работы, передача осей и отметок на монтажные горизонты, исполнительные съёмки, измерения осадок, горизонтальных смещений, крена, прогибов и других деформационных проявлений. Современное обеспечение такого комплекса работ возможно на основе автоматизированных средств, интегрированных в единую систему измерений и обработки данных.

Производство геодезических работ всегда сопровождалось применением различных средств геодезических измерений и обработки результатов. Однако в последние годы началось их объединение на базе автоматизации. Основными средствами геодезических построений, съёмок и обработки сейчас являются: спутниковые приёмники (GPS, GPS/ГЛОНАСС), электронные тахеометры, полевые компьютеры, программное обеспечение обработки результатов измерений. Их интеграция направлена на проведение основных видов геодезических работ на объекте с применением единой системы, обеспечивающей автоматизацию процесса от сбора информации (измерений) до выдачи конечной продукции (каталогов координат, топографических планов, документации). Геодезические приёмники и электронные тахеометры дополняют друг друга, что делает технологию определения координат и съёмок с их применением универсальной. ПО системы работает с форматами данных этих приборов и обеспечи-

вает получение требуемого уровня конечной информации. Такие системы средств позволяют создавать эффективные геодезические построения в кратчайшие сроки с обеспечением их системой исходных пунктов, широким выбором схем, оптимальным расположением съёмочных станций, минимальными затратами. При этом увеличиваются возможности проведения избыточных измерений, повышается точность и надёжность конечных результатов в сочетании с высокой производительностью работ.

В направлении интеграции средств геодезических определений работают ведущие приборостроительные компании мира. Так последние модели тахеометров и GPS приёмников Trimble представляют собой единую геодезическую систему Trimble Toolbox с использованием общего контроллера ACU или TSCe. Она позволяет быстро переключаться с RTK спутниковых определений координат приёмниками TS 5700 или TS 5800 на измерения тахеометрами серии TS 3600 и TS 5600 и обратно. Получается объединённый массив данных файлов измерений разных методик и приборов, которые обрабатываются в едином пакете ПО Trimble Geomatics Office. После предварительной обработки возможно совместное уравнение результатов, полученных разными приборами. Все геодезические определения можно выполнять этой системой на объекте сразу в режиме реального времени. Универсальные контроллеры позволяют управлять работой спутникового и оптико-электронного оборудования, автоматически объединяя их результаты в общий формат данных. Trimble Toolbox обеспечивает единую технологию проведения комплекса геодезических работ на высоком техническом и технологическом уровне.

Leica Geosystems (Швейцария) объединила на программно-аппаратном уровне спутниковые геодезические приёмники Leica GPS1200, электронные тахеометры Leica TPS1200, средства управления приёмником и тахеометром (контроллеры) и программное обеспечение Leica Geo Office. Всё это интегрировано в одну геодезическую систему, которая получила название Leica System1200. В приёмнике и тахеометре используются единые интерфейс и формат данных, взаимозаменяемые аксессуары, единое ПО, которое обрабатывает файлы измерений приёмников, тахеометров, нивелиров. В системе могут работать четыре модификации GPS-приёмни-

ков, семь модификаций тахеометров.

Интеграция Leica System 1200 получила дальнейшее развитие созданием единого универсального прибора SmartStation, представляющего собой комбинацию электронного тахеометра и геодезического двухчастотного приёмника.

Интеграция средств геодезических построений осуществляется Sokkia на базе платформы для сбора данных (контроллера) SDR8100, общих аксессуаров, формата данных, программного обеспечения MAPSUITE+, Spectrum. Функции автоматизации геодезических работ в системе постоянно расширяются и обновляются.

На предприятии, выполняющем геодезические работы, часто интеграция средств в одну систему проводится исходя из имеющихся приборов и материальных ресурсов. В этом случае применяется программное обеспечение, работающее с данными в форматах применяемых приборов и удовлетворяющее требованиям автоматизации обработки с учётом решаемых задач.

Интеграция современных геодезических средств наиболее эффективна в инженерно-строительных изысканиях, при разбивке и строительстве крупных сооружений, новых микрорайонов, в обеспечении строительства трубопроводов, дорог, промышленных объектов. Интеграция средств существенно меняет технологию геодезических построений. Сложная конструкция построений (от общих ОГС к частным разбивкам и съёмкам) заменена на сравнительно простые схемы со свободным выбором станций. Точка стояния электронного тахеометра может выбираться свободно с учетом оптимальных возможностей для последующих работ: определения координат точек объекта, тахеометрической съёмки, разбивки. Передача координат на станцию выполняется обратной линейно-угловой засечкой или спутниковым приёмником. Наличие в системе геодезических спутниковых приёмников позволяет расположить исходные пункты построения на объекте в любых удобных для производства полевых работ местах. Затраты средств и времени при такой организации геодезических работ резко сокращаются, так как отпадает необходимость вставлять геодезические построения на объекте в существующие на данной территории пункты ОГС и обеспечивать видимость между ними. Свободный выбор станции

даёт возможность варьировать методы спутниковых и тахеометрических измерений.

Комплекс работ, проводимых разными методами и приборами, требует индивидуального подхода в зависимости от конкретных условий объекта работ, поэтому рекомендуется до начала работ провести рекогносцировку и планирование измерений. Прежде всего, необходимо обследовать сохранность пунктов ОГС. Среди них выбрать базовые пункты, запроектировать местоположение станций тахеометра и построений для определения координат (обратные засечки, ходы, спутниковые методы). Положение исходных для определения координат станций пунктов должно обеспечивать проведение на них качественных спутниковых наблюдений.

Схемы геодезических построений могут быть разными, одна из них приведена на рис. 4.1. Построение включает три пункта спутниковых определений, относительно которых электронным тахеометром проводится разбивка продольной оси сооружений с точками 1, 2, ..., 10.

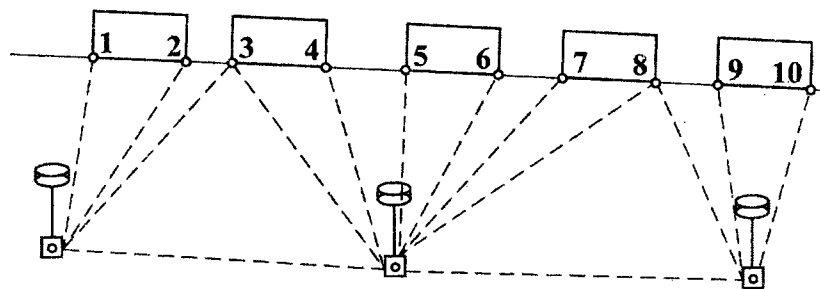


Рис. 4.1. Схема разбивочных работ

В общем случае геодезические построения могут включать несколько уровней:

- базовые пункты для спутниковых определений;
- вновь определяемые спутниковыми методами пункты, являющиеся исходными для построений, выполняемых тахеометром;
- сеть станций электронного тахеометра с определением их координат обратными засечками, ходами, спутниковыми приёмниками;

— построения, выполненные со станций при съёмке, при определении координат точек объекта и разбивке осей.

Следует стремиться к увеличению числа пунктов со спутниковыми определениями координат, так как избыточные исходные пункты в геодезическом построении будут локализовать накопление погрешностей в ходах и засечках, а также дают больше вариантов выбора мест станций электронного тахеометра.

Производство комплекса геодезических работ в строительстве часто сопровождается использованием ственных знаков городской полигонометрии и старых пунктов ОГС, на которых установка тахеометра невозможна, а установка приёмника нецелесообразна из-за наличия препятствий для приёма спутниковых радионавигационных сообщений. При этом интеграция измерений электронным тахеометром и геодезическими приёмниками позволяет применять внецентренную установку станций без потери точности геодезических определений.

4.2. Производство измерений при внецентренной установке станции

Установка станции является внецентренной, если геодезический прибор, которым выполняется измерение, размещен не над центром пункта. При измерениях электронными тахеометрами внецентренная установка прибора необходима для пунктов, закрепленных стенными центрами. Спутниковые приемники могут устанавливаться не над центром пункта как на исходных, так и на определяемых точках. Допускается внецентренная установка *referens* и *cover*-приемников в следующих случаях:

- над пунктом стоит металлический сигнал, экранирующий радионавигационное наблюдение спутников;
- пункт станции закреплен стенными центрами;
- над пунктом часть небосвода закрыта препятствиями (кронами деревьев, забором, частью здания) — это снижает точность спутникового позиционирования.

При внецентренной установке станции могут возникнуть три типа задач:

- 1) передача координат с опорных пунктов на внецентренную станцию;

2) передача координат с точки внецентренной установки прибора на вновь определяемый пункт;

3) приведение измеренных тахеометром расстояний и углов (направлений) к центрам пунктов.

Передачу координат с опорных пунктов A и B на внецентренную станцию P (рис. 4.2) можно выполнить электронным тахеометром в режимах обратной линейно-угловой или полярной засечек. Для реализации обратной засечки в качестве станции тахеометра выбирается точка P . После установки на нее прибора вводятся параметры станции и координаты известных пунктов, на которые устанавливается отражатель. Далее проводятся измерения расстояний и горизонтального угла, образующие схему обратной засечки. После измерений на экран прибора будут выданы координаты и отметка точки P .

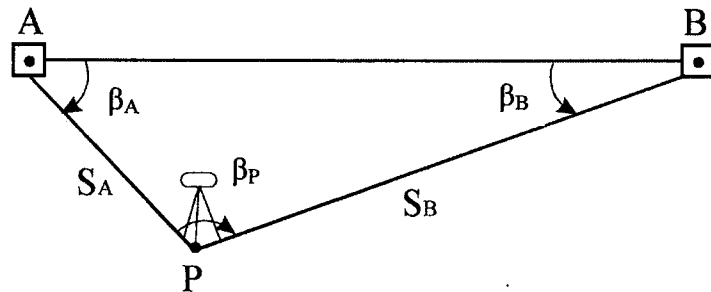


Рис. 4.2. Схема передачи координат на точку внецентренной установки приемника

Для реализации полярной засечки электронный тахеометр центрируется над опорным пунктом A , при этом отражатель ставят в точку P . Если работу выполнять в координатном режиме, то необходимо в прибор ввести координаты станции, высоту прибора и высоту отражателя. После измерения расстояния и горизонтального угла будут получены координаты и отметка точки P . Учитывая, что определение способом полярной засечки бесконтрольно, необходимо повторить измерения на отражателе в точку P с другого опорного пункта, например, с пункта B .

Передачу координат на вновь определяемый пункт (рис. 4.3) также можно выполнить электронным тахеометром с внецентренных установок. Если координаты станций P_1 и P_2

определены спутниковыми методами и на основной пункт P можно установить тахеометр, то для передачи координат применяют режим обратной линейно-угловой засечки. Если пункт закреплен стенным центром и на него нельзя установить тахеометр, то передачу координат проводят в режиме полярной засечки. Измерения тахеометром проводят аналогично методике, рассмотренной для предыдущей схемы.

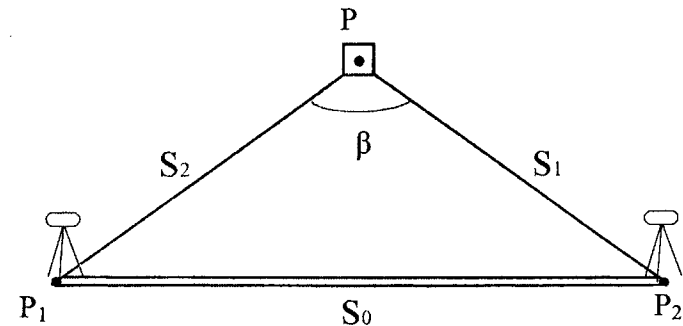


Рис. 4.3. Схема передачи координат с внецентренных установок приемников

Средняя квадратическая погрешность передачи координат на пункт P электронным тахеометром в режиме полярных засечек определяется выражением:

$$m_p^2 = m_A^2 + \left(\frac{S}{\rho}\right)^2 m_\beta^2 + m_S^2, \quad (4.1)$$

где m_A — СКП положения пункта A , с которого передаются координаты; m_β , m_S — СКП угловых и линейных измерений соответственно; $\rho = 206265''$.

Положение пункта P определяется с двух исходных пунктов A и B , поэтому СКП среднего положения из двух определений при условии равноточных измерений составит:

$$(m_p)_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}} m_p, \quad (4.2)$$

где m_p определяется выражением (4.1).

На малых расстояниях величина $(m_p)_{cp}$ характеризуется в основном погрешностями измерения тахеометром расстояний. Так, для тахеометров SET230R и равноточных им СКП передачи координат с двух пунктов в рассматриваемом режиме практически не превысит m_s прибора на расстояниях до 200 м, а для тахеометров SET530R и равноточных им — до 100 м (табл. 4.1).

Таблица 4.1

СКП передачи координат с двух пунктов, мм

| Тахеометры | m_s , мм | m_p , с | S, м | | | | |
|------------------------|------------|-----------|------|-----|-----|------|------|
| | | | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
| SET230 | 2 | 2 | 1,4 | 1,6 | 2,0 | 3,7 | 7 |
| SET530 | | 5 | 1,6 | 2,2 | 3,7 | 8,7 | 17 |
| те же (без отражателя) | 3 | 2 | 2,1 | 2,2 | 2,5 | 4,0 | 7 |
| | | 5 | 2,3 | 2,7 | 4,0 | 8,8 | 17 |
| ЗТа5Р | 5 | 5 | 3,5 | 4,0 | 4,9 | 5,2 | 18 |
| | | 6 | 3,6 | 4,1 | 5,4 | 10,9 | 21 |

При расстояниях, больших указанных, существенно сказываются на точности передачи координат погрешности угловых измерений. Поэтому для электронных тахеометров типа SET530 при высоких требованиях к точности следует стремиться при выборе внецентренной станции к уменьшению расстояний S , а углы β_A и β_B измерять несколькими приемами.

При внецентренной установке прибора СКП передачи координат, проводимой в режиме обратной линейно-угловой засечки, пропорциональна не только расстояниям S_i , но и отношению S_i/S_0 , где S_0 — расстояние между пунктами с известными координатами, относительно которых определяются координаты точки P . При такой засечке по двум известным пунктам не рекомендуется, чтобы угол β_p был меньше 30° . Если рекомендуемые параметры засечки обеспечить невозможно, то следует увеличить вблизи точки P число известных пунктов, например, путем спутникового позиционирования на дополнительной точке.

Режим работы обратной засечки электронного тахеометра включает оценку точности определения координат точки P .

По результатам этой оценки на местности можно подобрать оптимальное положение точки P , для которого значения СКП m_x и m_y будут минимальными и приемлемыми для решения конкретной задачи.

Закрепление пунктов ОГС на застроенных территориях выполняется в основном стенными знаками, что обеспечивает их длительную сохранность. Привязка к стенным знакам с помощью электронного тахеометра имеет ряд особенностей, на которых следует остановиться.

В инструкции по топографической съемке [12] и в руководстве по применению стенных знаков [22] рекомендуется привязку к ним осуществлять при помощи построения треугольников, в которых углы измеряются теодолитом, а стороны — компарированной рулеткой с точностью соответствующего класса или разряда основного построения. Все эти построения можно выполнить с требуемой точностью электронным тахеометром, а координаты станции определить в режиме обратной линейно-угловой засечки. При этом можно применять различные схемы привязки, показанные, например, на рис. 4.4, 4.5.

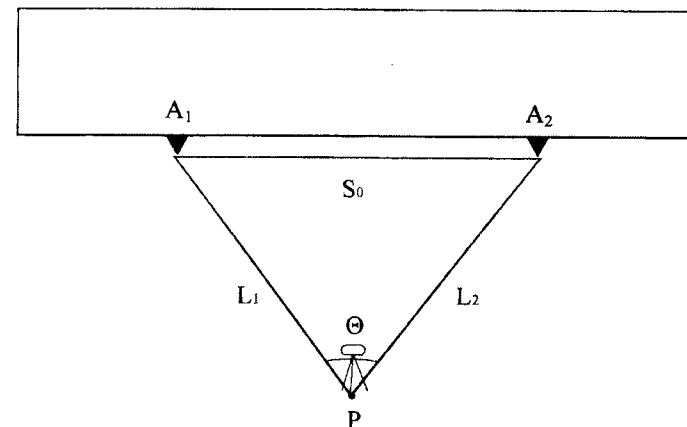


Рис. 4.4. Схема передачи координат тахеометром с двух стенных знаков

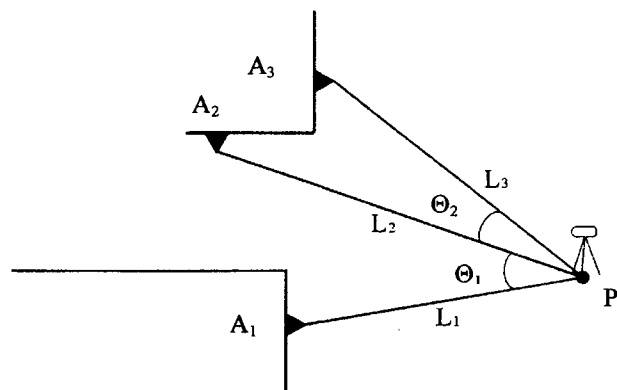


Рис. 4.5. Схема передачи координат тахеометром с трех ственных знаков

Если пункт, закрепленный стенными знаками, используется в качестве базового при проведении съемок и координировании границ земельных участков спутниковыми приемниками, то положение точки P выбирается так, чтобы экранирование небосвода зданиями было наименьшим. После сеанса спутникового позиционирования на эту точку устанавливается электронный тахеометр, измеряются расстояния до ственных знаков и соответствующие горизонтальные углы. Координаты станции P определяются в режиме обратной линейно-угловой засечки тахеометра.

После измерений на два и более ственных знака тахеометром можно провести контроль привязки. Для этого устанавливают в приборе режим ОНР. В этом режиме будет определено расстояние между центрами ственных знаков, которое должно совпасть с измеренным или вычисленным по координатам. Кроме того, с пункта P можно определить тахеометром в координатном режиме координаты контрольной точки.

Измерения тахеометром на ственной знак можно проводить на отражатель, применяется также безотражательный режим, если конструкция знака позволяет проводить такие измерения. Чтобы снизить влияние погрешностей, вызванных установкой на ственной знак отражателя, рекомендуется применять для отражателя мини-веху (рис. 4.6).

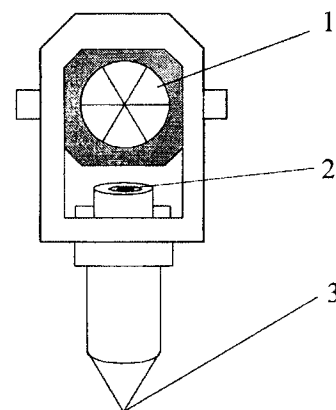


Рис. 4.6. Отражатель на мини-вехе:
1 — призмный отражатель; 2 — круглый уровень;
3 — острие вехи

Острые вехи отражателя совмещают с отверстием в знаке, предназначенном для установки визирного приспособления и к которому отнесены координаты знака. На вехе выводят пузырек уровня в нуль-пункт, направляют отражатель на прибор. Отражатель можно заменить визирной маркой, а расстояния до нее измерять в безотражательном режиме тахеометра.

Если в безотражательном режиме тахеометра измерения выполнялись непосредственно на вертикальную наружную грань ственного знака, то в полученные значения расстояний и углов необходимо ввести поправки за редуцию цели. При этом линейный элемент редуции для ственных знаков не превышает 5 мм, а угловой элемент примерно будет равен углу $\theta/2$ (см. рис. 4.4).

Внецентренная установка станции с последующей привязкой ее к основному пункту позволяет эффективно использовать в геодезических работах пункты ОГС, имеющиеся на данной территории. Комплексное использование спутниковых приемников и электронных тахеометров при этом обеспечивает высокое качество геодезических работ на объектах.

4.3. Совершенствование технологии геодезических разбивочных работ

Геодезические разбивочные работы проводятся с целью выноса на местность проекта зданий и сооружений в строительстве, а также границ земельных участков в землеустройстве. Порядок проведения разбивочных работ и их точность регламентированы в строительстве нормами и правилами, например СНиП 3.01.03-84 [24], и специальным проектом производства геодезических работ для объектов, требующих повышенной точности. Вынос на местность границ земельных участков осуществляется в соответствии с инструкцией по межеванию земель [10] и методическими рекомендациями [18].

Наибольшие требования к точности разбивочных работ предъявляются в строительстве, поэтому применительно к ним будем рассматривать особенности и совершенствование технологии геодезических построений электронными тахеометрами в комплексе со спутниковым позиционированием. Методика разбивки границ участков будет во многом аналогичной. Кроме того, в геодезическом обеспечении землеустройства и кадастра объектов недвижимости современные геодезические приборы и технологии широко распространены. Однако внедрение их в строительное производство идет медленно, так как во многих строительных организациях сложные геодезические работы, в которых преимущество современных технологий очевидно, возникают не постоянно. Сказывается также высокая стоимость электронных приборов и неготовность специалистов строительных подразделений к их применению. Поэтому нужны специализированные геодезические группы, оснащенные современными приборами и средствами обработки. Это позволит резко сократить сроки на выполнение разбивочных работ и существенно повысить их качество.

Геодезическое обеспечение разбивочных работ в строительстве проводят в настоящее время в три этапа:

- построение на территории будущего строительства геодезической разбивочной основы (опорной разбивочной сети) в виде системы закрепленных на местности пунктов с точным определением их координат и отметок;

- вынос в соответствии с проектом и закрепление на местности главных и основных осей зданий и сооружений;

- разбивка монтажных и промежуточных осей, вынос проектных отметок, передача осей на монтажные горизонты.

Построение разбивочной основы для строительства рекомендовано в СНиП 3.01.03-84 проводить методами триангуляции, полигонометрии, засечек. Для предприятий и групп зданий на площадях, превышающих 1 км², а также отдельных зданий и сооружений, занимающих больше 10 га, регламентирована точность:

- СКП угловых измерений 3";

- относительная погрешность линейных измерений 1:25000.

На меньших площадях застройки группой зданий допускается СКП угловых измерений 5", линейных — 1:10000. В некоторых случаях точность разбивочной основы может быть и более низкой [24].

Указанная точность полностью обеспечивается в разбивочной сети электронными тахеометрами (см. табл. 3.1), а спутниковое позиционирование геодезическими приемниками в режиме статики эту точность обеспечивает без сложных построений и производства линейно-угловых измерений. Более того, применение этих приборов дает возможность приблизить пункты опорных разбивочных сетей непосредственно к строительным площадкам, на которых будет осуществляться точная разбивка осей и их закрепление. Это обусловлено тем, что методы спутникового позиционирования не требуют взаимной видимости между базовыми и определяемыми пунктами сети и пункты могут быть значительно удалены друг от друга. Сказанное позволяет выбрать положение пунктов разбивочной основы на объекте оптимально для проведения последующих разбивок. При необходимости всегда можно быстро обеспечить спутниковым позиционированием новый участок дополнительными пунктами разбивочной основы относительно тех же базовых пунктов.

Геодезическая разбивочная основа строилась раньше в виде строительной сетки на некоторых территориях, особенно при возведении промышленных предприятий. Ее создание требовало большого объема сложных геодезических измерений и редукации пунктов сетки к значениям проектных координат. Такая сетка приближала опорные пункты к строительным площадкам и упрощала последующие разбивочные работы. Создание строительной сетки существенно упрощается применением спутниковых приемников и электронных та-

хеометров. Однако с применением в разбивочных работах современных приборов отпадает необходимость в построении такой сетки, так как спутниковое позиционирование обеспечивает любое требуемое для разбивки расположение опорных пунктов, а применение тахеометров упростило сам процесс разбивочных работ, выполняемых относительно этих пунктов.

Расположение пунктов разбивочных сетей необходимо планировать с учетом проектного и существующего размещения строений и инженерных сетей, эффективности использования пунктов в разбивочных работах. Построение геодезической разбивочной основы проводят в основном в местной или условной системе координат, применение которой позволяет не вводить поправки для перехода на поверхность относимости и в плоскость проекции Гаусса — Крюгера, искажающие в определенной мере длины линий. Программы обработки результатов спутникового позиционирования обеспечивают работу в таких системах.

Вынос на местность главных и основных осей зданий и сооружений выполняют в соответствии с проектом по разбивочным чертежам, на которых должны быть указаны опорные пункты разбивочной основы и разбивочные элементы. К разбивочным элементам в плане относятся проектные углы и расстояния, которые откладывают на местности относительно опорных пунктов с требуемой точностью. Их вычисляют по проектным координатам точек осей и координатам опорных пунктов.

Разбивочные работы электронным тахеометром можно вести не только по разбивочным элементам, но и непосредственно по проектным координатам точек осей. Последнее упрощает подготовительные работы, так как не требует вычисления проектных значений углов и расстояний.

Для разбивки осей электронный тахеометр устанавливают над пунктом построенной разбивочной основы, центрируют по оптическому или лазерному центру. После включения прибора тщательно визируют центром сетки нитей на другой пункт сети, направление на который принимается за опорное, а его дирекционный угол определяется координатами пунктов A и B (рис. 4.7). Нажимают клавишу обнуления отсчета по ГК. Через главное меню прибора входят в режим «Вынос в натуру» («В-Н» у тахеометров SET), в

этом режиме выбирается вариант работы по разбивочным элементам или вариант выноса проектных координат.

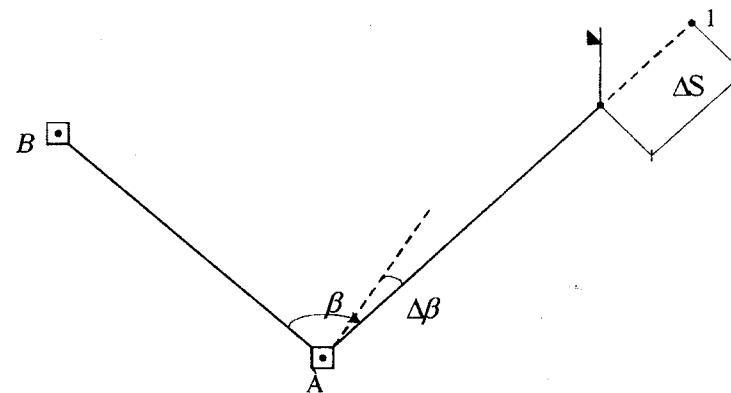


Рис. 4.7. Вынос проектной точки тахеометром

В первом варианте этого режима входят в раздел «Данные для выноса», в экраный трафарет которого вводят с клавиатуры проектное расстояние и проектный горизонтальный угол. Для построения горизонтального угла открепляют алидаду прибора и поворачивают ее до тех пор, пока значение $\Delta\beta$, отображаемое на экране, не станет равным нулю. Величина $\Delta\beta$ вычисляется в приборе как разность проектного и отложенного при повороте алидады угла. Окончательную доводку угла β проводят наводящим винтом.

Отражатель устанавливают и закрепляют на вехе на высоту, равную высоте тахеометра. Веху с отражателем выставляют на линию визирования, приводя ее в отвесное положение по уровню. Открепив трубу, наводят ее на отражатель и нажимают клавишу измерения. На экран будет выдано значение ΔS , вычисленное как разность проектного и отложенного расстояния. Можно использовать наклонное расстояние S и горизонтальное проложение D . Отображение ΔS на экране сопровождается стрелками, показывающими направление перемещения отражателя. Отражатель переставляют, пока ΔS не будет равным нулю. Для положения точки оси, совпадающего с проектным, значения ΔS и $\Delta\beta$ на экране тахеометра будут нулевыми.

Во втором варианте при выносе непосредственно координат сначала входят в раздел «Данные о станции» режима

«В-Н», вводят координаты x , y и отметку H станции. Визируют на пункт начального направления B и выставляют по ГК отсчет, равный его дирекционному углу. Затем входят в раздел «Данные для выноса», активизируют нажатием КО-ОРД экранный трафарет, в который вводят проектные координаты x , y и отметку выносимой точки. После подтверждения ввода данных на экран прибора будут выданы значения разбивочных элементов S и β , а при их построении — требуемые перемещения отражателя вдоль линии визирования и в перпендикулярном к ней направлении. Веху с отражателем перемещают в указанных стрелками направлениях, пока все ΔS не будут равны нулю.

Данный вариант позволяет выносить тахеометром не только плановое положение точки, но и ее проектную отметку. При этом отметка вынесенной точки будет определена методом тригонометрического нивелирования. На экран прибора выдается значение ΔH , вычисленное как разность между проектной и фактической отметкой точки, над которой стоит отражатель. Веху с отражателем поднимают, если ΔH имеет знак плюс, или опускают, если ΔH имеет знак минус, до тех пор, пока ΔH на экране не станет равным нулю. В этом положении нижняя точка вехи будет находиться на проектной отметке.

Электронным тахеометром несложно проконтролировать вынос точки, выполнив его относительно другого опорного направления или с другой станции. Контроль выполняется также определением положения вынесенной точки в координатном режиме, при этом полученные контрольные координаты точки должны совпадать с проектными в пределах допустимых значений.

Точность плановой разбивки электронным тахеометром определяется величиной СКП положения пункта из полярной засечки, а также погрешностями опорных пунктов и погрешностью фиксирования вынесенной точки. Погрешности полярной засечки оцениваются по формуле (4.1), а при выносе с двух опорных пунктов они соответствуют данным, приведенным в табл. 4.1. Следовательно, распространенные современные тахеометры обеспечивают точность плановых разбивочных работ в пределах 2—5 мм на расстояниях до 200 м и больше, а при определенных условиях достигается и более высокая точность.

Для оценки точности высотной разбивки воспользуемся формулой тригонометрического нивелирования:

$$h_{A1} = S \cos Z + l_A - v_1 + \frac{(1-k) \times S^2}{2R \sin^2 Z}, \quad (4.3)$$

где S — измеренное тахеометром наклонное расстояние; Z — измеренное тахеометром зенитное расстояние; l_A — высота прибора над пунктом A ; v_1 — высота отражателя над точкой 1; k — коэффициент вертикальной рефракции; R — радиус кривизны Земли.

Для оценки будем считать, что при измерениях центр сетки нитей зрительной трубы тахеометра тщательно наводится на центр отражателя, который с точностью до 1 мм выставлен на вехе на высоту v , равную высоте прибора l . Тогда для малых расстояний S , на которых влиянием вертикальной рефракции можно пренебречь, СКП определения превышения оценивается по формуле:

$$m_h^2 = \cos^2 Z \times m_s^2 + \left(\frac{S}{\rho}\right)^2 \sin^2 Z \times m_z^2 + m_v^2, \quad (4.4)$$

где m_s и m_z — СКП измерения тахеометром значений S и Z соответственно.

Для наиболее распространенных тахеометров оценка точности выноса отметки представлена в табл. 4.2, выполненная при условии $m_{iv} = 1$ мм. Оценка показывает, что СКП m_h не превышает 2 мм для тахеометров типа SET 330 в пределах 100 м и для тахеометров SET 530 — в пределах 60 м. В этих случаях точность выноса проектных отметок не хуже точности нивелиров типа Н-3.

Кроме того, электронным тахеометром можно передавать проектные отметки при больших перепадах высот с одной станции: в котлован, на монтажные горизонты, этажи зданий. Нивелиром подобные работы проводятся по сложной методике, которая требует дополнительных приспособлений и нескольких станций.

Таблица 4.2

**СКП выноса проектных отметок
электронным тахеометром, мм**

| СКП тахеометра | | Z, ° | S, м | | |
|----------------|-----------|------|------|-----|-----|
| m_s , мм | m_z , с | | 20 | 60 | 100 |
| 2 | 3 | 90 | 1,1 | 1,3 | 1,8 |
| | | 80 | 1,1 | 1,4 | 1,8 |
| | | 60 | 1,4 | 1,6 | 1,9 |
| 2 | 5 | 90 | 1,1 | 1,8 | 2,6 |
| | | 80 | 1,2 | 1,8 | 2,6 |
| | | 60 | 1,5 | 1,9 | 2,6 |

Для разбивки монтажных и промежуточных осей электронные тахеометры можно применять в режиме лазерного указателя створа. Функция лазерного указателя обеспечивает видимый лазерный луч красного цвета вдоль линии визирования прибора. Лазерный луч тахеометра можно направить вдоль закрепленной оси и вести относительно его детальную разбивку способом перпендикуляров.

Такой луч упрощает передачу осей на монтажные горизонты и проведение геодезического контроля при монтаже строительных конструкций.

Таким образом, применение электронных тахеометров и спутникового позиционирования обеспечивает высокую эффективность проведения разбивочных работ в строительстве на всех ее этапах. Работы проводятся с высокой точностью, достичь которую с помощью традиционных мерных лент и рулеток крайне сложно. Все измерения и вычисления при этом автоматизированы, проводятся быстро, с надежным контролем. Одновременно с плановым положением точки выносятся ее проектная отметка. Методика проведения геодезических работ существенно упрощается.

4.4. Передача на монтажные горизонты осей и отметок электронными тахеометрами

При выполнении геодезических работ электронным тахеометром появляется возможность на строительной площадке передавать оси и отметки на монтажные горизонты одним

прибором и, в основном, одновременно. Рассмотрим методику и точностные характеристики такой передачи.

Традиционными методами плановая и высотная передача с исходного на другие горизонты осуществляется раздельно. Оси в плане передают преимущественно теодолитом методом наклонного проецирования. Средняя квадратическая погрешность (СКП) регламентирована в СНиП [24] для осей: 2 мм на 15 м высоты и 2,5 мм от 15 до 60 м. Высотная передача отметок на горизонты проводится в основном геометрическим нивелированием по подвешенным рулеткам. СКП передачи отметок определена величинами: 3 мм на 15 м высоты и 4 мм от 15 до 60 м. Следует отметить сложность в обеспечении указанной точности традиционными геодезическими приборами как в плане, так и по высоте.

Положение осей на исходном горизонте закрепляют осевыми знаками. Для передачи оси необходимо не менее двух таких знаков. Если отметка хотя бы одного из них определена с достаточной точностью, то одновременную передачу оси и отметки электронным тахеометром предлагается проводить на основе построений, приведенных на рис. 4.8 и 4.9. При этом положение осей может быть передано тахеометром в теодолитном или в координатном режимах прибора, а высотное — методом тригонометрического нивелирования.

Передача оси с исходного на другие горизонты в теодолитном режиме выполняется методом наклонного проецирования. Тахеометр центрируется над осевым знаком и ориентируется наведение центра сетки нитей на другой знак оси, закрепленной на исходном горизонте. Линией визирования зрительной трубы проецируется точка оси на горизонт, её плановое положение фиксируется. Несмотря на использование при этом только функций теодолита, электронный тахеометр имеет преимущества. Автоматическая коррекция тахеометром коллимационной ошибки i и малых углов наклона вертикальной оси прибора α повышает точность проецирования точек и осей по вертикали, а лазерный указатель створа обеспечивает их быструю маркировку на монтажных горизонтах.

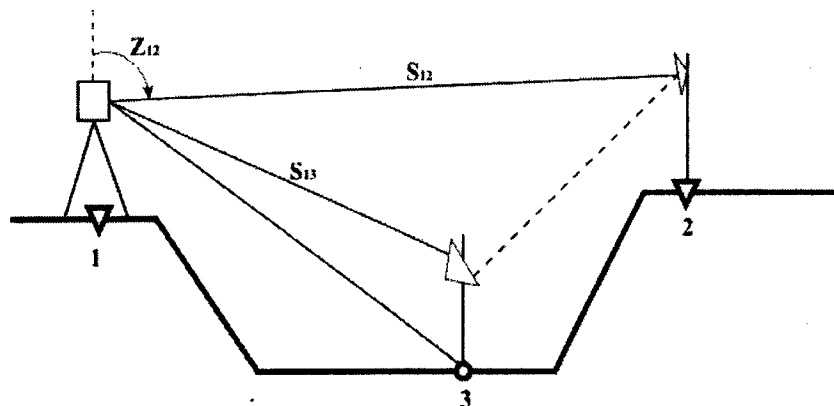


Рис. 4.8. Передача оси и отметки в котлован

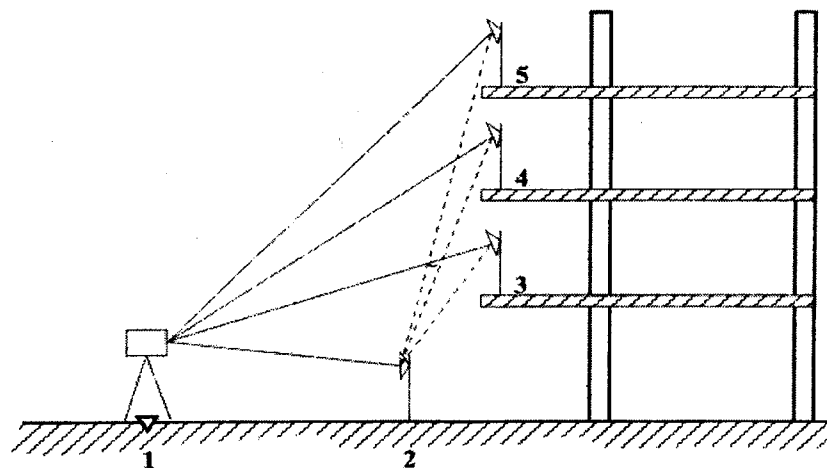


Рис. 4.9. Передача оси и отметок на верхние этажи здания

При этом средняя квадратическая погрешность плановой передачи точки оси будет определяться при одном положении ВК тахеометра суммарным влиянием следующих составляющих: m_B — СКП визирования; $m_{\Delta C}$ — СКП остаточного влияния коллимационной ошибки; $m_{\Delta i}$ — СКП остаточного влияния компенсации наклона вертикальной оси. Оценка по-

казывает, что на расстояниях визирования 60 м и меньше m_B не превысит для тахеометров 0,2 мм. Ожидаемые значения $m_{\Delta C}$ и $m_{\Delta i}$ можно оценить на основании формул:

$$m_{\Delta C} = \frac{S}{\rho} \cdot \frac{m_c}{\cos v}; \quad (4.5)$$

$$m_{\Delta i} = \frac{S}{\rho} \cdot m_i \cdot \operatorname{tg} v, \quad (4.6)$$

где m_c — СКП определения коллимации; m_i — СКП определения наклона оси прибора; S , v — расстояние и угол наклона линий визирования соответственно; $\rho = 206265''$.

Учитывая, что коллимационная ошибка тахеометра определяется по измеренным по ГК значениям, а полученная при поверке ее величина вводится для компенсации, в оценке можно принять СКП коллимации равным СКП измерения горизонтальных углов. Значение m_i составляет для современных тахеометров 2...3'', но при введении соответствующих поправок учитывается место нуля компенсатора, также полученное при поверке. Поэтому для объективности оценки СКП наклона вертикальной оси следует также увеличить до m_B . Принимая значения m_c и m_i равными m_B тахеометра, выполнена оценка их остаточного влияния.

В табл. 4.3 приведены суммарные СКП передачи оси, ожидаемые в методе наклонного проецирования электронными тахеометрами $s m_B = 5''$ (ЗТа5Р, SET530 и другие). При этом оцениваемая погрешность получена меньше 2 мм на расстояниях визирования в 60 м и углах наклона 30°, что соответствует передаче оси на высоту в 30 м. Ожидаемую точность передачи можно повысить проецированием при двух положениях прибора, а также применением тахеометров с $m_B = 2''$ и 3''.

Таблица 4.3
Ожидаемые погрешности передачи осей
тахеометрами, мм

| S, м | Углы наклона, ν | | | |
|------|---------------------|-----|-----|-----|
| | 10° | 20° | 30° | 40° |
| 10 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 20 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 30 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| 40 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,5 |
| 50 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,9 |

Передача осей и точек электронным тахеометром в координатном режиме аналогична производству в нем измерений и разбивки, рассмотренных ранее. При этом точность работ будет соответствовать точности применяемых тахеометров и геодезических построений. Кроме оси в координатном режиме можно передавать на горизонт дополнительные точки, удаленные от нее на определенное расстояние. Работу в координатном режиме предлагается выполнять в условной системе передаваемой оси (рис. 4.10).

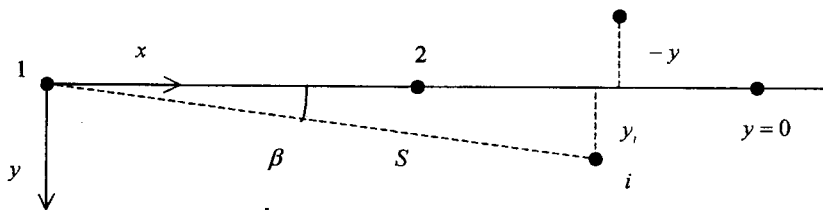


Рис. 4.10. Условная система координат

Координаты, x_i , y_i станции и дирекционный угол α_{12} начального ориентирования вводятся в тахеометр равными нулю. В режиме разбивки («В-Н» у тахеометров SET) следует задать проектное значение координаты передаваемой точки, равное проектному удалению от данной оси. Требуемые разбивочные элементы и перемещения отражателя будут выданы на экран. По ним осуществляется вынос точки на горизонт. Для точки, расположенной на оси, y_i задается = 0.

Передача отметки по высоте на монтажные горизонты осуществляется электронным тахеометром методом тригонометрического нивелирования. В координатном режиме отметка определяется автоматически вместе с ее координатами по формуле:

$$H_i = H_1 + h_{i1}, \quad (4.7)$$

где H_1 — отметка станции тахеометра; h_{i1} — превышение переданной точки i над станцией.

Превышение h_{i1} определяется на основании формулы (4.3) тригонометрического нивелирования. Выполненные ранее расчеты показывают (см. табл. 4.2), что точность выноса отметок тахеометром не хуже, чем нивелирами типа Н-3. При увеличении углов наклона линий визирования до 40° ожидаемые СКП отметок не превысят 2 мм на расстояниях S в 60 м и 3 мм на расстояниях в 100 м. Такие расстояния и угол наклона соответствуют передаче отметки на высоту в 64 м. Значит точность передачи отметок на монтажные горизонты по высоте тем же электронным тахеометром, которым передаётся ось, удовлетворяет требованиям СНиП.

Следует отметить простоту предлагаемых построений тахеометром при передаче отметок на горизонты по сравнению с традиционной методикой. Вместе с тем погрешность одного измерения может не совпадать с декларируемой СКП прибора, поэтому при точных работах измерения тахеометром должны выполняться несколькими приёмами.

Точность передачи отметок по высоте можно повысить совершенствованием методики тригонометрического нивелирования и геодезических построений, выполняемых тахеометром. Так, измерения, выполненные тахеометром на репер, а затем на определяемую точку, позволяют вычислить превышение между репером и этой точкой. Например, для осевого знака 2, принятого в качестве репера и точки i можно записать:

$$h_{2i} = (S_2 \cdot \cos Z_2 - S_i \cos Z_i) + (l_2 - l_i) + (v_2 - v_i) + \frac{(k_i - k_2)}{2R} \cdot S^2 \quad (4.8)$$

где, S , Z — измеренные расстояния и зенитные углы на указанные точки; $(l_2 - l_i)$ — изменение высоты тахеометра

при измерениях на репер 2 и точку i ; $(v_2 - v_i)$ — изменение при этом высоты отражателя; $(k_i - k_2)$ — изменение коэффициента вертикальной рефракции.

Стабильность на станции высотного положения прибора обеспечивает равенство, $l_2 = l_i$, а стабильность высоты отражателя — $v_2 = v_i$. В этом случае погрешность измерения высот l и v , достигающие часто нескольких миллиметров, не окажут заметного влияния на h_{2i} . Поэтому точность передачи отметки возрастет. Снизится в разностях и влияние вертикальной рефракции, которое на малых расстояниях становится незначимым. Следует отметить, что применение формулы (4.8) не требует определения отметки станции, поэтому в общем случае выбор станции может быть свободным.

Для контроля и повышения точности передачу отметки на горизонт можно повторить с другого осевого знака. Если тахеометр установить над точкой 2 оси (см. рис. 4.8 и 4.9), то выполненные измерения образуют линейно-угловые построения в вертикальной плоскости передаваемой оси. Наличие избыточных измерений позволяет уравнивать эти построения.

Если отметки осевых знаков и реперов известны с достаточной точностью и с точки монтажного горизонта есть прямая видимость на несколько таких пунктов, то, установив тахеометр над определяемой точкой, ее отметку можно определить методом обратной высотной засечки. При избыточном числе исходных реперов и осевых знаков отметка этой точки также определяется из уравнивания построения.

Замыкание вертикальных построений, выполненных электронным тахеометром, в определенной мере повышает точность передачи отметок на монтажные горизонты и обеспечивает надежный контроль.

Таким образом, передача осей, точек и отметок на монтажные горизонты электронным тахеометром обеспечивает высокую точность. Автоматизация измерений, применение одного прибора и единой технологии работ позволяет рекомендовать рассмотренную методику взамен традиционной.

4.5. Измерение осадок зданий и сооружений электронными тахеометрами

Измерение осадок оснований и сооружений проводится с точностью 1; 2; 5 и 10 мм в зависимости от грунтов, расчет-

ных величин осадок, уникальности и времени эксплуатации зданий и сооружений [8]. Высокие требования к точности достигались ранее геометрическим нивелированием с применением высокоточных нивелиров и инварных реек. Широкое распространение в инженерно-геодезических работах электронных тахеометров, обеспечивающих быстроту, автоматизацию и достаточную точность измерений, расширяет возможности тригонометрического нивелирования. Применению тригонометрического нивелирования в контроле за осадками способствует появление безотражательных тахеометров с погрешностями $m_z = 1...3''$, $m_s = 1...4$ мм и меньше.

Для измерения осадок электронными тахеометрами необходим расчет точности и анализ технологии таких работ, так как метод тригонометрического нивелирования, в том числе электронными тахеометрами, может обеспечить высокую точность лишь при определенных условиях. Точность определения осадок в 1 и 2 мм обеспечивается таким нивелированием способом «из середины» короткими лучами [27]. Поэтому ограничимся рассмотрением этого способа.

Превышение h_{ij} между двумя осадочными марками объекта определяется в способе «из середины» по формуле

$$h_{ij} = (S_j \cos z_j - S_i \cos z_i) + (l_j - l_i) + (v_i - v_j) + \frac{(1 - k_j) \times S_j^2}{2 \times R \sin^2 z_j} - \frac{(1 - k_i) \times S_i^2}{2 \times R \sin^2 z_i}, \quad (4.9)$$

где S_j, S_i — измеренное со станции наклонное расстояние до марок с номерами j и i ; z_j, z_i — измеренные зенитные расстояния, соответствующие значениям S_j, S_i ; l_j, l_i — высота прибора при визировании на марки j и i ; v_j, v_i — высоты наведения на эти марки; k_j, k_i — коэффициенты вертикальной рефракции.

Обеспечение точности в 1 и 2 мм требует высокоточных измерений не только вертикальных углов z и расстояний S , но и высот прибора, что существенно осложняет методику наблюдений. Но при стабильности высотного положения тахеометра на станции измерения l не требуются, так как будет выполнено условие $l_j = l_i$. Для этого достаточно надеж-

ная установка штатива и тахеометра на станции, а при измерениях рекомендуется применять выносную клавиатуру, что исключит подвижки прибора при нажатии его клавиш. В формуле (4.9) обеспечивается $v_i = v_j$, если визирование проводить непосредственно на марку или на один и тот же штрих установленной на ней рейки. Кроме того, расчеты показывают, что при малых расстояниях можно принять $k_j = k_i$. Так, в самых неблагоприятных условиях, характеризующихся изменением коэффициента вертикальной рефракции в максимальных пределах (0,14...0,20) и равенстве плеч в 20 м, влияние вертикальной рефракции на превышение h_{ij} не превысит 0,03 мм.

При обеспечении указанных условий ($l_j = l_i, v_i = v_j, k_j = k_i$) формулу (4.9) можно записать в виде

$$h_{ij} = S_j \cos z_j - S_i \cos z_i, \quad (4.10)$$

тогда СКП превышения между марками на станции определяется выражением

$$m_h^2 = 2m_s^2 \cos^2 z + 2(S / \rho \sin z)^2 m_z^2, \quad (4.11)$$

где S — измеренное тахеометром расстояние до марки; m_s — средняя квадратическая погрешность (СКП) этого расстояния; z — измеренный зенитный угол; m_z — его СКП; $\rho = 206265''$.

Измерение каждой осадки выполняется в два цикла при n стоянках прибора, поэтому СКП определения осадки можно оценить по формуле

$$m_{OC} = m_h \sqrt{2n}, \quad (4.12)$$

где m_h — СКП превышения между марками, n — число станций в нивелирном ходе.

В соответствии с указанными требованиями к точности определения осадок вычислены ограничения на средние квадратические погрешности измерения превышений m_h между марками на каждой станции тахеометра, представленные в табл. 4.4.

Таблица 4.4
Ограничения
на погрешности

| n | m _{OC} , мм | | | |
|----|----------------------|------|------|-----|
| | 1 | 2 | 5 | 10 |
| 1 | 0,71 | 1,41 | 3,54 | 7,1 |
| 5 | 0,32 | 0,63 | 1,58 | 3,2 |
| 10 | 0,22 | 0,44 | 1,12 | 2,2 |

Таблица 4.5
Погрешности
тахеометров

| Тахеометр | СКП, мм | | Доп. n |
|-----------|----------------|-----------------|-----------|
| | m _h | m _{OC} | |
| SET 230R | 0,41 | 0,6 | 11 |
| SET 330R | 0,56 | 0,8 | 6 |
| SET 530R | 0,88 | 1,2 | 3 |

В табл. 4.5. приведены СКП измерений превышения и осадки конкретными типами тахеометров SET, которые они обеспечивают при малых расстояниях и малых углах наклона. В соответствии с полученными данными измерение осадки в 1 мм возможно лишь тахеометром SET 230R. Измерение осадки в 2 мм может быть выполнено любым из рассмотренных приборов, но при количестве станций в ходах, не превышающих указанных в табл. 4.5. Следует отметить, что наибольшую точность измерения осадки обеспечивает тахеометр SOKKIA NET1200. Для него при аналогичных условиях СКП превышений составит 0,2 мм.

При использовании безотражательных тахеометров для измерений осадок рекомендуется новый тип марок. Такая марка должна иметь четкое изображение геометрической фигуры (ромба, треугольника, концентрических окружностей) для однозначного наведения на них центра сетки нитей прибора во всех циклах наблюдений. Кроме того, она должна быть достаточно рефлекторной, без шероховатостей для отражения дальномерного сигнала. В качестве таких марок можно использовать замаркированные детали строительных конструкций или специальные металлические марки, жестко закрепленные на наблюдаемом объекте, на них должна быть нанесена четкая геометрическая фигура со светлым центром, обеспечивающим отражение сигнала.

Предлагаемые осадочные марки не выступают из строительных конструкций, поэтому их сохранность ожидается выше, чем традиционных, используемых при геометрическом нивелировании для установки на них инварных реек.

Высоту закладки марок в стены здания определяет угол z при их наблюдении. Учитывая, что высокую точность изме-

рений превышений на станции можно обеспечить лишь при углах z , близких к 90° , следует ограничить высоту закладки марок. Допустимое превышение марки над станцией можно оценить по формуле:

$$h_M = l + S \sin \nu, \quad (4.13)$$

где l — высота прибора; S — расстояние от станции до марки; ν — угол наклона при визировании на марку.

Так, для электронных тахеометров точность измерения осадки в 1 мм можно получить, если h_M не превысит 2 м. Используя отметки станций и отмостки возле здания, вычисляется высота закладки марок в стены. При этом следует учитывать, что высокое расположение марок дополнительно снизит точность расстояний, измеренных безотражательным дальномером, так как визирование будет проводиться под острым углом к марке.

Допустимые длины плеч тригонометрического нивелирования из середины можно оценить по формулам (4.7) и (4.8). Фрагмент такой оценки приведен в табл. 4.5 для СКП измерения осадок (m_{oc}) в 1; 2 и 5 мм при условии $m_s = 3$ мм; $n = 5$.

Таблица 4.6

Допустимые длины плеч, м

| z | m_z | m_{oc} , мм | | |
|-----|-------|---------------|------|-----|
| | | 1 | 2 | 5 |
| 88° | 2" | 20,7 | 44,7 | 115 |
| | 3 | 13,8 | 29,8 | 77 |
| | 5 | 8,2 | 17,9 | 46 |
| 87° | 2 | 17,2 | 43,2 | 114 |
| | 3 | 11,5 | 28,8 | 76 |
| | 5 | 6,9 | 17,3 | 46 |
| 85° | 2 | — | 37,3 | 112 |
| | 3 | — | 24,8 | 75 |
| | 5 | — | 14,9 | 45 |

Данные табл. 4.6 свидетельствуют, что при проектировании измерения осадок на длины плеч и углы z необходимо наложить существенные ограничения, особенно при требованиях m_{oc} в 1 и 2 мм. При близком расположении станций от плоскости закрепления марок увеличится количество станций в ходах, а визирование будет проводиться под острым углом в горизонтальном направлении, что также может привести к снижению точности измерения осадок.

Для обеспечения высокой точности измерения зенитных расстояний необходимо регулярно контролировать у тахеометра значение m_z , а измерения на каждой станции проводить несколькими приемами. При измерении расстояний до марок следует учитывать в циклах поправки за метеосостояние и не применять визирование под острым углом.

Обработка измерений в каждом цикле включает: вычисления превышений по формуле (4.10) между связующими марками, вычисление средних превышений по приемам, контроль по невязкам, уравнивание, вычисление отметок связующих и промежуточных точек. Для обеспечения миллиметровой точности в вычислениях должны сохраняться знаки до 0,1 мм. Если в тахеометре при вычислении превышений и на дисплее сохраняются только миллиметры, то в память прибора необходимо записать измеренные S и Z , а в постобработке на ПК сохранить требуемое число знаков.

Измерения осадок электронными тахеометрами по сравнению с геометрическим нивелированием будут иметь ряд преимуществ:

- не требуется установки рейки на осадочные марки, что часто опасно или невозможно в условиях строительной площадки и действующего промышленного производства;
- измерения выполняются одним исполнителем;
- процесс измерений и обработки автоматизирован;
- марки для установок рейки обычно выступают из строительных конструкций, поэтому часто уничтожаются или повреждаются, в результате информативность контроля за осадками ухудшается; безотражательный электронный тахеометр не требует таких марок, обеспечивая измерение осадок по замаркированным точкам объекта.

Если осадочные марки на объекте закреплены традиционно и их конструкция предназначена под установку рейки, то измерение осадки рекомендуется проводить по инварной

рейке, которая устанавливается на такие марки. Тахеометром центр сетки нитей при измерении Z наводится на один и тот же штрих рейки на всех марках.

При традиционном закреплении осадочных марок на здании можно комбинировать измерения осадок геометрическим и тригонометрическим нивелированием. Применение электронного тахеометра в этом случае позволяет сократить количество станций, особенно при больших перепадах высот между осадочными марками.

Применение электронного тахеометра в контроле за осадками дает новые возможности для качественного проведения таких работ.

4.6. Измерение крена зданий электронным тахеометром

Методика измерения крена традиционными геодезическими приборами основана на способе проектирования теодолитом и способе горизонтальных направлений. Для тахеометра эти способы также применимы, однако в современных тахеометрах появляются новые возможности, основанные на автоматизации линейно-угловых измерений. Рассмотрим способ, который можно реализовать электронным тахеометром, и назовем его линейно-угловым.

Аналогично теодолиту измерения тахеометром необходимо выполнить с двух станций во взаимно перпендикулярных плоскостях. На каждой станции прибор тщательно горизонтируют. В верхнем и нижнем сечении контролируемого угла здания выбирают точки, по которым будет определяться вектор крена l в данной плоскости. Визируя на эти точки, измеряются в безотражательном режиме наклонные расстояния (S_1 и S_2), вертикальные углы и горизонтальный угол β (рис. 4.11). Встроенное программное обеспечение тахеометра вычисляет по ним горизонтальные проложения D .

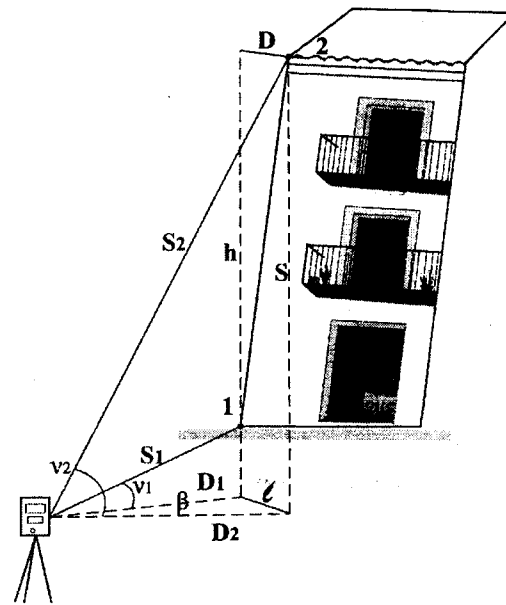


Рис. 4.11. Измерение крена электронным тахеометром

Длину вектора крена l предлагается определять по формуле:

$$l^2 = D_1^2 + D_2^2 - 2D_1 \times D_2 \times \cos \beta, \quad (4.14)$$

где D_1 и D_2 — горизонтальные проложения расстояний от прибора до точек визирования; β — горизонтальный угол между направлениями визирования.

Направление вектора l определяет угол β : l будет положительным для угла, возрастающего вправо от точки 1 и отрицательным — для угла, возрастающего влево.

Вычисления по формуле (4.14) будут выполнены тахеометром автоматически, если измерения проводить в режиме ОНР. В разделе 3.3 было рассмотрено применение этого режима для дистанционного обмера зданий. Здесь используем его для определения вектора l . В этом режиме (в тахеометрах SET) необходимо после визирования на начальную точку 1 нажать клавишу РАССТ, а после визирования на контролируемую точку — программную клавишу ОНР. На эк-

ран прибора после этого будут выданы значения: S — наклонное расстояние между точками 1 и 2; D — его горизонтальное проложение; h — превышение между точками 1 и 2.

Значение D является длиной определяемого вектора l . Его направление соответствует направлению поворота алидады прибора при наведении на контролируемую точку. Величина h будет полезна при оформлении отчета по выполненным измерениям.

В режиме ОНР можно определить отклонения от вертикали целого массива точек, для этого достаточно после визирования на каждую точку нажимать клавишу ОНР. Все определения векторов будут выполнены относительно точки 1. Полученные результаты измерений выдаются на экран, их можно записать в память прибора и передать на компьютер.

Для определения вектора крена l предлагаемым способом оценим его среднюю квадратическую погрешность (СКП) m на основе дифференцирования формулы (4.14). Для значений l , не равных нулю, можно записать:

$$m_l^2 = (D_1 - D_2 \cos \beta)^2 \left(\frac{m_{D_1}}{l} \right)^2 + (D_2 - D_1 \cos \beta)^2 \left(\frac{m_{D_2}}{l} \right)^2 + (D_1 D_2 \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{l \rho} \right)^2, \quad (4.15)$$

где m_{D_1}, m_{D_2} — СКП соответствующих горизонтальных проложений; m_β — СКП горизонтального угла; $\rho = 206265$ с.

Выражение (4.15) при оценке можно упростить, считая $m_{D_1} = m_{D_2}$, а $D_1 = D_2$, тогда получим:

$$m_l^2 = 2D_1^2 (1 - \cos \beta)^2 \left(\frac{m_D}{l} \right)^2 + (D_1^2 \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{l \rho} \right)^2. \quad (4.16)$$

У тахеометров значения СКП составляют в безотражательном режиме $m_D \pm 3$ мм, однако в условиях строительной площадки из-за фонового излучения и состояния отражающих поверхностей в измеряемых точках они могут возрасти.

Вместе с тем, в выражении (4.16) влияние на m_l погрешностей линейных измерений слабое. Даже при m_D в 20 мм оно не превысит 1...2 мм.

Погрешности m_β у тахеометров составляют 5...6 с и меньше. При определении крена обычным теодолитом они могут существенно возрасти из-за влияния наклона оси прибора и коллимационной ошибки. В тахеометрах эти погрешности автоматически компенсируются за счет двухосевого датчика наклона, цена деления которого соответствует точности угловых отсчетов. При работе с тахеометром наклон оси отслеживается и его влияние, как и влияние коллимационной ошибки, исключается при обработке благодаря встроенному программному обеспечению прибора. Поэтому точность измерений угла β при определении крена выверенным тахеометром будет выше аналогичного по точности теодолита.

Оценка, выполненная по формуле (4.16), показывает, что даже при трехкратном увеличении погрешностей, указанных в паспорте электронного тахеометра, СКП вектора l не превысит 3...5 мм. Это свидетельствует о высокой точности контроля вертикальности и крена такими приборами.

Рассмотренный линейно-угловой способ был апробирован при контроле вертикальности строящего 24-этажного здания по ул. Кирова в г. Челябинске. Измерения выполнялись электронным тахеометром SET630R. Время, затраченное на измерения с каждой станции прибора, составляло не более 5 минут, включая его установку, выбор точек и визирование на них. Все измерения выполнены дистанционно одним исполнителем, сразу на объекте получены в режиме реального времени вектора отклонений l . Таким образом, применение электронного тахеометра при определении крена зданий и сооружений является эффективным и может заменить традиционные методы геодезических измерений.

4.7. Съёмка электронным тахеометром планового и высотного положения подкрановых путей

Геодезический контроль подкрановых путей необходим в процессе их возведения и регулярно — при эксплуатации кранов. Наибольшую сложность представляют съёмки путей мостовых кранов, особенно в металлургических, прокат-

ных и других цехах с непрерывным производством. Методика таких работ разработана для традиционных геодезических приборов. При этом проводится раздельная съемка планового и высотного положения: измерениями относительно створа определяют прямолинейность рельсов, а непосредственными промерами — расстояния между их осями. Разность отметок головок рельсов снимается нивелированием. Все это требует многократных перемещений по путям, что в цехах осложняется непрерывным технологическим процессом. Поэтому для съемки путей мостовых кранов в цехах большой протяженности разрабатывались сложные способы измерений и обработки данных с системой частных створов, что не всегда гарантировало сохранение требуемой точности работ.

Применение электронных тахеометров позволит существенно упростить технологию съемки подкрановых путей, при этом плановое и высотное положение могут определяться одновременно, сократится и количество опасных перемещений по путям. Вместе с тем проведение такой съемки тахеометром имеет ряд особенностей.

Правилами безопасной эксплуатации мостовых кранов определены допустимые отклонения от проекта положения рельсов: 10...15 мм в плане и 10...20 мм по высоте. Они будут выявлены с вероятностью 0,95, если средняя квадратическая погрешность (СКП) определения m_{Δ} не превысит значений $\frac{\Delta}{2}$, где Δ — допустимые отклонения (разности). Учитывая, что СКП разности m_{Δ} определяется соотношением

$$m_{\Delta} = \sqrt{2}m \leq \frac{\Delta}{2}, \quad (4.17)$$

получим

$$m \leq \frac{\Delta}{2\sqrt{2}} \leq \frac{\Delta}{3}, \quad (4.18)$$

где m — СКП измерения положения снимаемых точек путей.

Значит, для надежного определения отклонений (разностей положения), близких к допустимым, необходимо выполнять измерения с погрешностями: 3,3...5,0 мм в плане и

3,3...6,7 мм по высоте. Оценим, когда обеспечивают эту точность наиболее распространенные типы электронных тахеометров.

Съемка планово-высотного положения точек может выполняться тахеометрами в разных режимах. Для подкрановых путей представляется наиболее перспективным координатный режим.

На уровне подкрановых путей рекомендуется ввести условную систему координат, тогда плановое положение снятой точки будет определено координатами x и y , а высотное — отметкой H . Ось x системы совпадает с прямой AC (рис. 4.12), соединяющей крайние точки оси левого рельса, относительно которых определяется отклонение q от прямой. Тогда для точки A $x_0 = y_0 = 0,000$ м, а дирекционный угол $\alpha_{AC} = 0^{\circ}00'00''$. В этой системе отклонение снятой точки i от прямой будет характеризовать значение ординаты, которое вычисляется по формуле:

$$y_i = y_0 + D_i \cdot \sin(\alpha_0 + \beta_i) \quad (4.19)$$

где D_i, β_i — горизонтальное проложение и угол, измеренные на точку i .

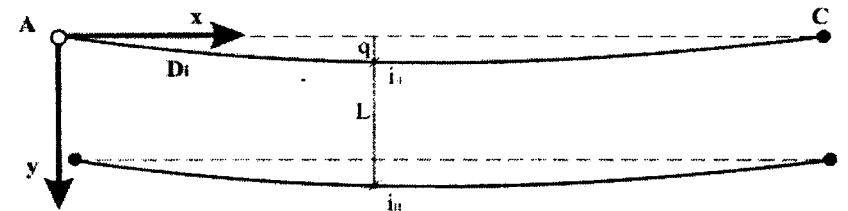


Рис. 4.12. Условная система координат

Если измерения тахеометром выполнены с СКП, равным m_D для расстояний и m_{β} для углов, то СКП определений y можно оценить соотношением

$$m_y^2 = \sin^2 \beta \cdot m_D^2 + D^2 \cos^2 \beta \left(\frac{m_{\beta}}{\rho}\right)^2 \quad (4.20)$$

Ось рельса отклоняется мало от оси x , поэтому угол β для одного рельса будет малым (не более 1°) и влияние m_ρ в выражении (4.20) для современных тахеометров не превысит 0,1 мм. Следовательно, выражение (4.17) для оценки точности можно представить в виде

$$m_y = D \cdot \cos \beta \frac{m_\beta}{\rho} \leq \frac{D}{\rho} \cdot m_\beta \quad (4.21)$$

где $\rho = 206265''$.

Из формулы (4.21) следует: при съемке планового положения наибольшее влияние на определяемые значения оказывают погрешности измерения горизонтального угла β . Результаты оценки ожидаемых СКП для тахеометров с m_β в 3'', 5'' и 6'' приведены в табл. 4.7. Данные оценки свидетельствуют, что отклонения от прямолинейности оси рельса определяются всеми рассмотренными тахеометрами с погрешностями 3 мм на расстояниях 100 м и менее. На больших расстояниях такая точность обеспечивается тахеометром с $m_\beta = 3''$, а для других приборов (SET530; 630) она увеличивается до 5 мм на 200 м.

Таблица 4.7

Ожидаемые СКП в плане, мм

| D, мм | m_β | | |
|-------|-----------|-----|-----|
| | 3'' | 5'' | 6'' |
| 50 | 0,7 | 1,2 | 1,4 |
| 100 | 1,4 | 2,4 | 2,9 |
| 120 | 1,7 | 2,9 | 3,5 |
| 150 | 2,1 | 3,6 | 4,4 |
| 200 | 2,8 | 4,8 | 5,8 |

Электронным тахеометром высотное положение точек путей определяется по методике тригонометрического нивелирования.

Отметки снятых точек головок рельсов определяются выражениями:

$$H_i = H_A + h_i; H_j = H_A + h_j, \quad (4.22)$$

а их разности, для которых установлены допуски, можно вычислить по формуле:

$$\Delta H_{ij} = H_j - H_i = h_j - h_i, \quad (4.23)$$

где h_i, h_j определяются по выражению (4.3).

В разностях, вычисленных по формуле (4.23), исключаются высоты прибора l , а также высоты отражателя V , если они остаются постоянными для всех снятых точек путей.

С учетом изложенного СКП определения высотного положения подкрановых путей можно оценить по формуле:

$$m_H^2 = \cos^2 z \cdot m_s^2 + \left(\frac{S}{\rho}\right)^2 \sin^2 z m_z^2, \quad (4.24)$$

где m_s, m_z — СКП измерений расстояний и зенитных углов соответственно.

Если высота отражателя при съемке всех точек близка к высоте прибора, то угол Z будет близок к 90° . Даже при его отклонении в пределах $\pm 2^\circ$ влияние m_s в выражении (4.24) для современных тахеометров не превысит 0,2 мм. Поэтому выражение (4.24) для оценки точности можно представить в виде:

$$m_H = S \cdot \sin z \frac{m_z}{\rho} \leq \frac{S}{\rho} m_z \quad (4.25)$$

Формула (4.25) аналогична формуле (4.21) с заменой m_β на m_z . В соответствии с техническими данными современных тахеометров $m_z = m_\beta$. Поэтому электронные тахеометры обеспечивают требуемую точность определения разностей отметок на рельсах аналогично точности плановой съемки: 3 мм на расстояниях, не превышающих 100 м и менее 5 мм на расстояниях от 100 до 200 м.

При съемке тахеометром отражатель устанавливается на головку рельса вдоль оси с постоянным шагом в 3 или 6 м. Визирование проводится на центр отражателя, автоматически измеряются S, Z, β . Начальное направление ориентируется по оси x . По формулам (4.19) и (4.22) вычисляются плановые и высотные параметры. В координатном режиме они определяются автоматически.

На подкрановых путях большой протяженности рекомендуется создавать опорную сеть с маркировкой точек, которые при съемке можно использовать в качестве станций тахеометра и точек начального ориентирования. Пример такой сети приведен на рис. 4.13.

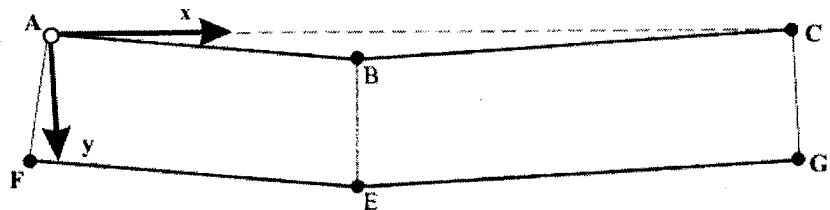


Рис. 4.13. Опорная сеть пунктов на подкрановых путях

После точной маркировки (закрепления) точек по ним был проложен замкнутый ход электронным тахеометром SET530. Относительная невязка хода составила 1:61800, высотная невязка — 0,004 м. В результате был получен каталог координат и высот опорных пунктов (табл. 4.8).

Таблица 4.8

Каталог опорных пунктов

| Пункт | X, м | Y, м | H, м | Дирекционный угол | На пункт |
|-------|---------|--------|--------|---------------------------------------|-------------|
| A | 0,000 | 0,000 | 10,000 | 0°00'00" 0°00'58" | C B |
| B | 120,130 | 0,034 | 9,962 | 180°00'58" 359°59'04" | A C |
| C | 252,104 | -0,002 | 9,991 | 180°00'00" 179°59'04" 89°58'33" | A B G |
| G | 252,115 | 26,011 | 9,990 | 269°58'38" 179°58'59" | C E |
| E | 120,308 | 26,050 | 9,954 | 359°58'59" 180°01'31" | G F |
| F | 0,011 | 25,997 | 9,985 | 0°01'31" 269°58'33" | E A |

Такая сеть позволила выполнить все измерения при съемке путей длиной в 252 м в единой системе координат. В качестве станций использовались наиболее устойчивые пункты сети А, С, G и F, а наличие пунктов В и Е снизило накопление погрешностей при съемке наиболее удаленных от станций точек. В соответствии с табл. 4.8 в тахеометр вводились координаты и отметки каждой станции и дирекционные углы начального ориентирования в координатном режиме. Тахеометр определил координаты x, y, H для всех точек левого и правого рельсов. Это позволило построить графики планового и высотного положения путей на компьютере.

При рассмотренной технологии съемки электронным тахеометром расстояния L между осями рельсов и их изменения ΔL вычислялись по формулам:

$$L = y_{in} - y_{il}; \quad \Delta L_{ij} = L_j - L_i \quad (4.26)$$

где y_p, y_n — ординаты соответствующей точки на правом и левом рельсах.

Для правого рельса ось x совпадает с прямой FG (см. рис. 4.13). Поэтому отклонения оси правого рельса от прямой были вычислены по формуле:

$$q_{in} = y_{in} - \left(y_F + \frac{y_G - y_F}{D_{FG}} D_{Fi} \right) \quad (4.27)$$

где y_{in} — измеренная ордината точки i правого рельса; y_F, y_G — ординаты опорных точек; D_{FD} — горизонтальные расстояния между ними; D_{Fi} — расстояние до точки i от опорной точки F .

Таким образом, съемка подкрановых путей электронным тахеометром позволила автоматизировать геодезические измерения и их обработку, обеспечила достаточную точность при одновременности определения планового и высотного положения на путях большой протяженности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ 4

1. Назовите основные направления интеграции современных геодезических средств.
2. В чем состоит метод «свободной станции»? Где его можно использовать при автоматизации геодезических работ в строительстве?
3. Как выполняется привязка построений к стенным знакам городских опорных геодезических сетей электронным тахеометром?
4. Опишите последовательность геодезических работ при выносе проектных точек и осей зданий с применением электронного тахеометра.
5. Опишите последовательность геодезических работ при выносе проектных отметок электронным тахеометром.
6. В чем преимущества передачи на монтажные горизонты осей и отметок электронным тахеометром?
7. Назовите основные типы тахеометров, рекомендуемые а) для измерения осадок зданий; б) для измерения крена зданий, в) для съемки фасадов зданий.

Литература

1. Антонович К. М. Этапы развития спутниковых технологий на примере GPS // Геопрофи. — 2003. — № 2.
2. Батраков Ю. Г. Геодезические сети специального назначения. — М.: Картгеоцентр — Геоиздат, 1999.
3. Ворошилов А. П. Определение постоянной поправки дальности электронного тахеометра // Геопрофи. — 2005. — № 4.
4. Ворошилов А. П., Миркина Т. Е. Математическая обработка геодезических измерений: Учебное пособие. — Челябинск: ЮУрГУ, 2001.
5. Ворошилов А. П., Миркина Т. Е. Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования и строительства автомобильных дорог: Учебное пособие. — Челябинск, 2003.
6. Геодезическое обеспечение землеустроительных и кадастровых работ. Справочное пособие / Ю. К. Неумывакин, М. И. Перский. — М.: Картгеоцентр — Геоиздат, 1996.
7. Геодезическое обеспечение жилищно-гражданского и промышленного строительства / Ф. В. Андреева, Б. Г. Борисенков, В. Г. Бузятков и др. — М.: Недра, 1988.
8. ГОСТ 24846-86. Грунты. Методы измерений деформаций оснований и сооружений.
9. Единая государственная система геодезических координат 1995 года (СК-95). Справочный документ. — М.: ЦНИИГАиК, 2000.
10. Инструкция по межеванию земель. — М.: Роскомзем, 1996.
11. Инструкция по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. — М.: Роскартография, 2000.
12. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. — М.: Недра, 1982.
13. Кизяев Ю. А., Неграфонов С. А. Система сбора кадастровой информации на базе спутникового приемника Trimble AG 132 под управлением ARCPAD 6.02. — Геопрофи. — 2003. — № 5.
14. Ковалёв С. В. Основы диагностики и ремонта электронных тахеометров // Геопрофи. — 2004. — № 5.

15. Кораблёв М. Е., Тикко Б. Б. Геодезический приёмник ГЛОНАСС / GPS GEO-161 // Геопрофи. — 2004. — № 5.
16. Манфред Бауэр. SAPOS — геодезическая служба спутникового позиционирования Германии // Геопрофи. — 2004 — № 3.
17. Мельников А. В., Бойков В. В., Пересадько Е. С. Техническая реализация спутниковых систем межевания земель // Геопрофи. — 2004. — № 1.
18. Методические рекомендации по проведению межевания объектов землеустройства. — М.: Росземкадастр, 2002.
19. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации. — М.: Роскартография, 2004.
20. Панин О. В., Шамрова И. Г. Передача данных с помощью программы MAPSUITE+ из электронных тахеометров Sokkia в персональный компьютер. — М.: Геостройизыскания, 2004.
21. Резницкий Ф. Е. Инженерная геодезия: Учебное пособие. — Екатеринбург: УрГУПС, 2000.
22. Руководство по применению стенных знаков в полигонометрических и теодолитных ходах. — М.: Недра, 1972.
23. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 г.» (ПЗ-90) / В. Ф. Галазин, Б. А. Каплан, М. Г. Лебедев и др. — М.: Коорд. науч. информ. центр, 1998.
24. СНиП 3.01.03-84. Геодезические работы в строительстве. — М.: Госстрой СССР, 1985.
25. Соловьёв Ю. А. Системы спутниковой навигации. — М.: Эко-Трендз, 2000.
26. СП-11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. — М.: Госстрой РФ, 1997.
27. Справочное пособие по прикладной геодезии / В. Д. Большаков, Г. П. Левчук, Е. Б. Ключин и др. — М.: Недра, 1987.
28. Служба мониторинга GPS и ГЛОНАСС на базе Информационно-аналитического центра. — Инф. Бюлл. ГИС. — 2000. — № 2 (24).
29. Хаметов Т.И. Геодезическое обеспечение проектирования, строительства и эксплуатации зданий, сооружений: Учебное пособие. — М.: АСВ, 2002.
30. Шануров Г. А., Остроумов В. З., Елишин В. И. Определение высот уровенных постов спутниковым методом // Геопрофи. — 2004. — № 4.

Список сокращений

- АВТО — режим автоматической записи результатов съёмки в тахеометрах SET;
- БКО — блок контрольного отсчета в тахеометрах типа ЗТа5;
- ВК — вертикальный круг угломерной части тахеометра;
- ВНО — режим определения недоступной высоты объекта в тахеометрах SET;
- ВР — вторые разности фазовых измерений при обработке геодезических спутниковых наблюдений;
- ВТ — код высокой точности, которым модулируется несущая частота радионавигационного сообщения в ГЛОНАСС;
- ВысЦ — высота цели снимаемой точки объекта;
- ВЫЧ — режим автоматического запуска вычислений в некоторых геодезических задачах тахеометра SET;
- ГИС — геоинформационные системы;
- ГКА — геостационарный космический аппарат дифференциальных систем навигационных спутниковых определений;
- ГЛОНАСС — глобальная навигационная спутниковая система, разработанная и действующая под управлением служб РФ;
- ГСК — государственная система геодезических координат;
- ГСС — геостационарный спутник;
- ДЛН — режим дальномерных измерений в тахеометрах SET;
- ЗАП — запись данных в память тахеометров SET;
- ЗИС — земельные информационные системы;
- ИЗМЕР — режим измерений в тахеометрах SET;
- КСК — кадастровая система геодезических координат;
- КОНФ — режим конфигурации в тахеометрах SET, служит для установки в приборе констант, единиц измерений, параметров состояния атмосферы;
- КООРД — координатный режим для вывода на дисплей тахеометра координат снимаемой точки;
- МНК — метод наименьших квадратов;
- МСК — местная система координат;
- МТС — мобильные телесистемы;
- НаО — опорное направление в тахеометрах типа ЗТа5;
- НС — навигационный спутник глобальных навигационных спутниковых систем;

ОГС — опорные геодезические сети;
ОЗЭ — общий земной эллипсоид;
ОМС — опорные межевые сети;
ОНР — режим определения недоступного расстояния в тахеометрах SET;
ООФ — открытый обменный формат данными;
ПАМ — вход в режим работы с файлами памяти в тахеометрах SET;
ПЗ-90 — система геодезических параметров Земли 1990 года, на основе которой установлена пространственная система координат в ГЛОНАСС и в СК-95;
ПК — персональный компьютер;
ПО — программное обеспечение;
ПР — первые разности фазовых измерений при обработке геодезических спутниковых наблюдений;
РЕДКТ — редактирование данных, обеспечивающее набор информации с клавиатуры тахеометров SET;
РФ — Российская Федерация;
СК — система координат;
СК-42 — система государственных геодезических координат 1942 года;
СК-95 — система государственных геодезических координат 1995 года;
СКП — средняя квадратическая погрешность;
СКО — среднее квадратическое отклонение;
СМЕЩ — режим измерений со смещением снимаемой точки в тахеометрах SET;
СРНС — спутниковая радионавигационная система;
ССМЗ — спутниковая система межевания земель, имеющая сеть постоянно действующих базовых станций;
СТ — код стандартной точности, которым модулируется несущая частота радионавигационного сообщения в ГЛОНАСС;
СЧИТ — запуск в тахеометрах SET считывания информации с файла;
ТР — третьи разности фазовых измерений при обработке геодезических спутниковых наблюдений;
УОМЗ — Уральский оптико-механический завод;
Уст 0 — установка нуля по ГК при угловых измерениях тахеометром;
ЦММ — цифровая модель местности;
ЦМР — цифровая модель рельефа.
АТ (Atomic Time) — атомное время, поддерживаемое с помощью атомных часов;
С/А (Code Clear Acquisition) — открытый код, которым модулируется несущая частота радионавигационного сообщения в GPS;

DR (Direct Reflex) — безотражательный режим дальномерных измерений в электронных тахеометрах Trimble;
EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) — Европейская дифференциальная подсистема навигационного дополнения с широкой зоной обеспечения;
GNSS (Global Navigation Satellite System) — глобальная навигационная спутниковая система;
GPS (Global Positioning System) — глобальная система определения местоположения, разработанная и поддерживаемая в США;
HDOP (Horizontal Delution Of Precision) — коэффициент снижения точности при спутниковых определениях планового (горизонтального) местоположения, вызванный геометрией расположения в созвездии наблюдаемых спутников;
HDS — тип геодезических трехмерных лазерных сканеров фирмы Leica Geosystems;
HOW (Hand-Over-Word) — ключ данных, содержащих временные метки в радионавигационном сообщении GPS;
MONMOS — высокоточная геодезическая система фирмы Sokkia на базе тахеометров NET 1200;
MSAS (Multi-transport Satellite Based Augmentation System) — японская широкозонная дифференциальная подсистема, работающая на основе многофункциональных космических аппаратов;
P-code (Protected precise) — закрытый точный код, которым модулируется несущая частота радионавигационного сообщения в GPS;
PDOP (Position Delution Of Precision) — коэффициент снижения точности определения пространственного местоположения, вызванный геометрией созвездия НС;
RAB (Random-Bi-Directional) — код, нанесенный на нивелирную рейку или лимб тахеометра, по которому отсчеты автоматически снимаются при измерениях электронными приборами;
RED-tech (Revolutionary Digital Processing EDM technology) — технология цифровой обработки в трех частотных диапазонах сигнала дальномерных измерений, принимаемая в современных тахеометрах Sokkia;
RINEX (Receiver Independent Exchange) — универсальный формат измерений спутниковыми приемниками различных систем, позволяющий производить обмен и обработку на основе универсального ПО;
RTK (Real Time Kinematic) — режим реального времени определения координат с применением кинематических и близких к ним методов спутникового позиционирования;

SINEX (Software Independent Exchange) — универсальный формат представления данных для обмена информацией в программных пакетах обработки GPS-наблюдений;

TDOP (Time Delution Of Precision) — коэффициент снижения точности определения поправки часов приемника, вызванный геометрией созвездия НС;

TTS (Trimble Total Station) — приборы компании Trimble, обеспечивающие выполнение со станции всех геодезических измерений;

UT (Universal Time) — всемирное время: Гринвичское среднее солнечное время;

UTC (Universal Time Coordinated) — всемирное координированное время, измеряемое атомными часами, показания которых периодически корректируют на 1 секунду в соответствии с фактическими данными вращения Земли;

VDOP (Vertical Delution Of Precision) — коэффициент снижения точности определения вертикальной составляющей местоположения, вызванный геометрией созвездия НС;

WAAS (Wide Area Augmentation System) — американская дифференциальная подсистема навигационного дополнения с широкой зоной обеспечения.

А.П. Ворошилов

**СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ
И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТАХЕОМЕТРЫ
В ОБЕСПЕЧЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

Учебное пособие

Верстка *В. Б. Феркель*
Корректор *А. М. Бытов*

Подписано в печать 26.02.2007 г. Формат 84×108_{1/32}.
Бумага офсетная. Гарнитура «Петербург». Усл.-печ. л. 8,61.
Тираж 200 экз.
Заказ № 163.
Цена свободная.

Издательство «Цицеро».
454080, г. Челябинск, Свердловский пр., 60.

Отпечатано в типографии ООО «Тираж Сервис».
454091, Челябинск, ул. Свободы, 179.