



ЭТАЛОННЫЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН КАК СРЕДСТВО СЕРТИФИКАЦИИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВЕРКИ СПУТНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Прихода А.Г., Лапко А.П., ФГУП «СНИИГГиМС», г. Новосибирск

Результаты радиогеодезических спутниковых измерений в значительной степени зависят от физико-географических и климатических условий местности, в которых они выполняются, а также от степени затенения трасс распространения сигналов (открытая, полужакрытая, закрытая) и электромагнитных свойств среды, в которой они распространяются. Поэтому в качестве рабочего эталона для поверки и сертификации спутниковой аппаратуры в условиях максимально приближенных к реальным производственным условиям эксплуатации с ожидаемой точностью определения координат пунктов геофизических наблюдений целесообразно использовать сеть эталонных геодезических пунктов, размещенных в условиях характерных реальным производственным с наличием многолучевости и затухания спутниковых радиосигналов. Координаты этих пунктов должны соответствовать необходимой (достаточной) точности геодезического обеспечения геофизических съемок.

Требования к точности определения координат и высот эталонных пунктов находятся, в прямой зависимости от требований к точности определения пунктов геологоразведочных наблюдений, приведенных в табл. 1-4 («Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ»), что в свою очередь определяет требования к точности применяемой спутниковой аппаратуры.

Из таблиц 1-4 следует:

- требования к точности определения высот до 10 и более раз выше требований к точности определения плановых координат;
- наивысшая требуемая точность определения высот составляет 0,3 м;
- наивысшая требуемая точность определения плановых координат составляет 4 м.

В тоже время, «принцип ничтожного влияния», принятый в геодезии, определяет: если один из источников случайных ошибок характеризуется средней квадратической погрешностью, не превышающей 1/3 погрешности, характеризующей другой источник, то первым источником ошибок (в данном случае погрешности координат эталонных пунктов) можно пренебречь.

Исходя из сказанного, с учетом требований «Инструкции по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ» следует:

- погрешности определения высот эталонных геодезических пунктов не должны превышать 0,1 м;
- погрешности определения плановых координат эталонных геодезических пунктов не должны превышать 1,0 м.

В тоже время широко используемые в геологоразведочном производстве кодовые и кодово-фазовые одночастотные спутниковые приемники имеют следующие паспортные характеристики:

- погрешность определения плановых координат приемниками в дифференциальном режиме 3-5 м, высот 5-10 м;
- погрешность определения плановых координат одночастотным кодово-фазовыми приемниками (при расстояниях до 20 км) 0,2 м, высот 0,4 м.

Исходя же из «принципа ничтожного влияния», для обеспечения метрологической поверки более точных одночастотных кодово-фазовых спутниковых приемников необходимо обеспечить следующие точности эталонных геодезических пунктов:

- погрешность определения плановых координат

не более 0,07 м;

- погрешность определения высот не более 0,15 м.

Разработка поверочного средства измерений в виде сети эталонных геодезических пунктов для испытаний спутниковой аппаратуры с целью сертификации средства измерений и методик на уровне навигационной кодовой и одночастотной фазовой для топографической съемки аппаратуры потребителя в характерных производственных экстремальных условиях геолого-геофизических работ. Создание такого полигона является весьма актуальным, так как обеспечивается возможность проводить систематические метрологические

Таблица 1 Основные требования к топографо-геодезическому обеспечению сейсморазведочных работ

Этап работ	Ср. кв. погрешность определения положения объектов наблюдений, м	
	В плане	По высоте
Поисково-оценочные работы, предварительная разведка	5	1-2
Детальная сейсмическая разведка м-б (1:50000, 1:25000, 1:10000)	в масштабе отчетных карт	
КМПВ, сейсмондирование, МПЗ	0,8мм	5
МОВ, ОГТ, ВСП, сейсмокартаж	0,8мм	2
Объемная сейсморазведка	0,8мм	1,5

Таблица 2 Основные требования к топографо-геодезическому обеспечению геологоразведочных работ

Этап работ	Ср. кв. погрешность определения положения объектов наблюдений, м	
	В плане	По высоте
Опорные и параметрические	100	5,0
Структурные и поисковые	30	1,0
Разведочные	12	0,5
На эксплуатационных площадях	4	0,3

Таблица 3 Основные требования к топографо-геодезическому обеспечению при электроразведочных работах

Методы	Масштаб отчетной карты	Ср. кв. погрешность определения положения объектов наблюдений, м		
		В плане		
		Равнина	Горные районы	По высоте
Естественного поля, вызванной поляризации, переходных процессов, электропрофилрования	1:50 000	40	50	10
	1:25 000	20	25	10
	1:10 000	8	10	5
	1:5 000	4	5	5

Таблица 4 Основные требования к топографо-геодезическому обеспечению при гравиметрической съемке

Масштаб отчетной гравиметрической карты	Ср. кв. погрешность определения положения объектов наблюдений, м			
	В плане		По высоте	
	Равнина	Горные районы	Равнина	Горные районы
1:500 000	120	200	3	5
1:200 000	100	100	2,5	3
1:100 000	80	100	1,20	1,80
1:50 000	40	50	0,70	1,60
1:25 000	20	25	0,35	0,90
1:10 000	4	5	0,20	0,25

поверки выпускаемой спутниковой аппаратуры по единой сертифицированной методике.

Для построения сети эталонных геодезических пунктов Новосибирской области использовались инструментальные и спутниковые методы измерения линий и определения координат пунктов наблюдений. В качестве технических средств применялись светодальномер, лазерный нивелир, спутниковые геодезические фазовые двухчастотные приборы фирмы Topcon, работающие по системе GPS и ГЛОНАСС и фирмы Trimble Navigation 5700, работающий только по системе GPS. Все применяемые приборы предварительно прошли метрологическую поверку. Эталонные геодезические пункты расположены и закреплены в открытой, полузакрытой и закрытой местности.

Спутниковые технологии эффективны и экономически целесообразны для геодезического обеспечения геофизических работ. Однако в залесенной местности и даже в редколесье, а также в пересеченной местности сильное затухание, экранирование (затенение) и переотражения спутниковых сигналов, использующих несущие частоты дециметрового диапазона радиоволн, вызывают затруднения в определении плановых координат и высот пунктов геофизических наблюдений или делают невозможным их определение.

Основным источником погрешности, как при кодовых измерениях, так и при измерениях фазы несущей частоты сигнала является эффект многопутности (многолучевости) распространения сигналов [1]. Электромагнитные сигналы, наведенные на антенну приемника являются совокупностью прямых информационных радиосигналов (прямая волна) от навигационных искусственных спутников Земли, сигналов отраженных или переотраженных от земной поверхности или объектов, окружающих антенну и сигналов, обогнувших, вследствие дифракции мелкие препятствия, соизмеримые с длиной рабочей волны. Поэтому после приемной антенны образуется сигнал, который является результатом мультиинтерференции прямых и отраженных радиоволн.

В результате наложения смещенных во времени нескольких сигналов происходят флуктуации амплитуд вплоть до практически полного вычитания и резкого уменьшения соотношения сигнал/помеха. Таким образом, нарушается процесс сопровождения и срыв захвата спутникового сигнала. На восстановления захвата и слежения за несущей частотой сигнала в кодовых (навигационных) приемниках требуется время, равное 1-3 с при соблюдении радиовидимости на навигационные спутники. Для фазовых (геодезических) приемников это время увеличивается до минуты и даже десятков минут (большее время требуется для двухчастотных приборов).

Уровень многопутности распространения сигнала зависит от взаимного расположения антенн спутникового передатчика и приемника аппаратуры потребителя и, следовательно, от диаграмм направленности обеих антенн, а также от проводимости поверхностей отражающих и переизлучающих объектов, которыми могут являться стволы и ветви деревьев, от углов падения на них радиосигналов со спутников.

Исследования показали, что для получения положительных результатов измерений в залесенной местности необходим обязательный прогноз состояния видимости навигационных ИСЗ на рабочий период съемки с наличием не менее 5-6 наблюдаемых спутников в районе работ с кодовой аппаратурой и 6-7 наблюдаемых спутников с фазовыми приборами.

Для работы в лесу следует использовать внешнюю (выносную) антенну и задавать угол возвышения спутников над линией горизонта, который зависит от высоты препятствий, например деревьев, и от расстояния до препятствий. Угол

возвышения должен находиться в пределах $12^{\circ}-25^{\circ}$. Если угол большой, то уменьшается количество наблюдаемых спутников, если малый, то будет сильное затухание сигналов и снижение точности измерений из-за влияния нижних слоев тропосферы на прохождение радиосигналов на трассе «спутник-приемник».

Известно, что самая большая проблема в спутниковых измерениях – разрешение многозначности [7]. Если при наземных геодезических измерениях оператор имеет достаточно времени для разрешения многозначности, то при спутниковых измерениях многозначность необходимо разрешить «мгновенно», быстрое перемещение спутника по орбите не дает возможности повторных измерений. Непременным условием фазовых измерений является непрерывность приема радиосигналов от наблюдаемого спутника, так как нарушения такого приема, при которых теряется захват фазы, сопровождается потерей счета целого количества фазовых циклов. При этом реализация разрешения многозначности сильно затрудняется, а иногда вообще становится неприемлемой. В связи с этим перед выполнением процедуры разрешения многозначности принимают все меры для того, чтобы выявить пропуски фазовых циклов и устранить их влияние. При использовании спутниковых приемников отмечают следующие причины пропуска фазовых циклов [2]:

- экранирование принимаемых от спутника радиосигналов различными окружающими объектами (деревья, строения, конструкции наружных геодезических знаков, горный рельеф и др.);

- экранирование применяемых от спутника радиосигналов различными окружающими объектами (деревья, строения, конструкции наружных геодезических знаков, горный рельеф и др.);

- ослабление поступающих на вход антенны радиосигналов из-за влияния различного рода отражений, обуславливающих появление многопутности и последующую интерференцию сигналов;

- сильные мерцания сигналов из-за влияния возбужденной ионосферы;

- затухание радиосигналов при их прохождении через атмосферу от спутников, находящихся низко над горизонтом;

- недостаточно качественная работа GPS приемников (в частности, неудовлетворительное разделение сигналов, поступающих от различных спутников, что приводит к дополнительным ослаблениям применяемых сигналов);

- нарушения, возникающие в процессе обработки сигналов из-за появления различного рода отклонений от штатной ситуации.

Если в процессе проведения сеанса наблюдений были допущены пропуски фазовых циклов, то они должны быть, прежде всего, выявлены и количественно оценены, после чего необходимо принять меры к их устранению на стадии предварительной обработки.

В целом решить проблему многозначности удастся посредством формирования разности результатов фазовых измерений.

Известно, что точность определения высот спутниковым методом в 2-5 раз ниже точности определения плановых координат [1], в то время как при геофизических работах требования к точности определения высот всегда значительно выше, чем требования к точности определения плановых координат. Поэтому в экстремальных условиях залесенной местности совместно со спутниковыми определениями плановых координат предложено (Pulsearch Navigation Systems, Garmin, ПП «Центргеокомплекс», ФГУП «СНИИГГиМС») использовать барометрическое нивелирование, которое относится к нетрадиционным технологиям геодезического обеспечения, но конструктивно



СТАНДАРТИЗАЦИЯ



хорошо сочетается со спутниковыми приборами и независимо от спутниковых измерений обеспечивает среднюю квадратическую погрешность измерения высоты 0,3-2,0 м. Лучшая точность получается при использовании поправок за температуру или термостатирования микробарометра и соответствующей методики производства измерений. Такими приборами, в частности, являются измеритель геодезический трехкоординатный ИГ-3К (ПП «Центргеокомплекс») и трехкоординатный геодезический комплекс «ТРИО-Х, Y, H» (ФГУП «СНИИГГиМС»)[3].

Разработка трехкоординатного геодезического комплекса выполнена на базе интеллектуальной антенны-датчика цифровых сигналов системы GPS. Под интеллектуальной антенной-датчиком понимается радиотехническое устройство, которое за счет применения высоких технологий обладает малой массой, размерами и многофункциональностью. Устройство объединяет в едином конструктиве антенную систему, приемоизмеритель и электрический интерфейс. Основное достоинство устройства заключается в его автономности и простоте адаптации практически в любое оборудование. Универсальность применения интеллектуальной антенны позволит модернизировать и заменять основное оборудование, сохраняя преемственность по электрическому и информационному интерфейсам с синхронизатором спутниковых радионавигационных систем. Обеспечивается повышенная устойчивость от технических помех и отпадают проблемы электромагнитной совместимости с оборудованием. Созданный комплекс в виде экспериментального образца предназначен для геодезического обеспечения геологоразведочных работ определения местоположения (плановых координат и высот) пунктов наблюдения в залесенной местности.

Надежное определение плановых координат в залесенной местности посредством геодезического комплекса обеспечивается за счет ослабления влияния многолучевости на результаты измерений следующим образом [4, 5]. Антенну мобильного приемника (интеллектуальную антенну) располагают на горизонтальной штанге длиной около 40 см (две длины волны) прикрепленной к вертикальной телескопической мачте, поднятой на высоту около 2,5 м. Вращательное и одновременно возвратно-поступательное движение антенны (до 4 метров) на телескопической мачте осуществляется оператором относительно вертикальной оси, проходящей через измеряемую точку. Антенну медленно вращают, поднимая и опуская на высоту также около 40 см. При своем движении антенна описывает воображаемую поверхность цилиндра, что позволяет в окружении деревьев увеличить количество линий радиопрозрачности в направлении «спутник-приемник», то есть в данном случае используется так называемый в теории распространения радиоволн «просвет на линии». В этом процессе существенно ослабляется влияние многопутности. В обработке используется усредненный результат измерений, полученных при вращательно-поступательном движении антенны.

Геодезический комплекс [6] обеспечивает устойчивое одновременное определение в залесенной местности плановых координат и высот пунктов геолого-геофизических наблюдений, а также высокую надежность работы аппаратуры в полевых экстремальных условиях и сопровождается специальным программно-алгоритмическим обеспечением.

Применение комплекса обеспечивает повышение эффективности и сокращение численности работников, увеличение производительности работ.

Нами были проведены в залесенной местности исследования системы субметровой точности, работающей по сигналам GPS. Исследуемая система включала в себя: базовую станцию Legacy

HGD фирмы Topcon и мобильную роверную станцию Pathfinder PRO XR фирмы Trimble Navigation.

Базовая станция располагалась на опорном пункте с известными координатами на крыше здания. Измерения выполнялись в относительном режиме с постобработкой полученной информации в залесенной и открытой местности на эталонных пунктах. Высота деревьев с густой кроной достигала 20 м. Расстояние между деревьями до 5-7 м. Расстояние между мобильной и базовой станциями находилось в пределах 25 км.

На каждый час работы посредством программного обеспечения Trimble Pathfinder Office составлялся прогноз видимости количества навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ). В обоих GPS-приемниках с кодовым разделением спутниковых сигналов обработка фазы несущей частоты, равной 1575,42 МГц, что соответствует длине волны L1-20 см осуществляется фазовым процессором. Приведенные компанией Trimble технические характеристики при обработке фазовых измерений для приемника GPS Pathfinder PRO XR соответствуют следующим значениям точности (СКО):

- 30 см + 5 мм/км за 5 минут непрерывного отслеживания НИСЗ;
- 20 см + 5 мм/км за 10 минут непрерывного отслеживания НИСЗ;
- 10 см + 5 мм/км за 20 минут непрерывного отслеживания НИСЗ.

Установочные (пороговые) значения исходных данных, как для открытой, так и для закрытой местности составляли: количество наблюдаемых НИСЗ ≥ 5 , геометрический фактор потери точности плановых и высотных измерений PDOP ≤ 6 , отношение сигнал/шум (SNR) ≥ 6 , маска угла возвышения спутников над горизонтом 15° .

При испытаниях комплекса аппаратуры в полевых условиях антенно-мачтовое устройство базовой станции было в стандартном исполнении, а мобильной (рис.1) имело специальное исполнение.

Основными элементами предлагаемого мачтового устройства мобильной станции являются: цилиндрический шток с фиксирующими направляющими, который неподвижно укреплен на опорном фланце штатива, подвижная стойка, снабженная в верхней части горизонтальной штангой для установки спутниковой антенны, а в нижней части с трапециевидным кольцом, включающим указатель положения. Опорный фланец включает в себя подвижный лимб с угловой шкалой от 0° до 360° , через каждые 45° . Направляющие обеспечивают устойчивое вращение антенны, а также возможность изменения ее положения по высоте вдоль цилиндрического штока с шагом $0,5\lambda$, где λ — длина волны несущих колебаний.

Методика геодезических измерений заключается в следующем.

Перед началом пошагового кругового перемещения антенны, вращая подвижную стойку, находят направление на максимальное число одновременно наблюдаемых спутников, после чего вращение антенны прекращают. Это положение антенны считается исходным (нулевым). Фиксируют соответствующее положение указателя и совмещают с ним нулевую отметку шкалы лимба. Затем, контролируя по визуальному индикатору видимость спутников, поворачивают подвижную стойку по часовой стрелке, например на 45° .

В таком положении в течение одной минуты выполняются геодезические измерения, которые заносятся в память измерительной аппаратуры. Далее в том же направлении по часовой стрелке по угловой шкале лимба, вращая подвижную стойку, поворачивают антенну на следующие 45° и

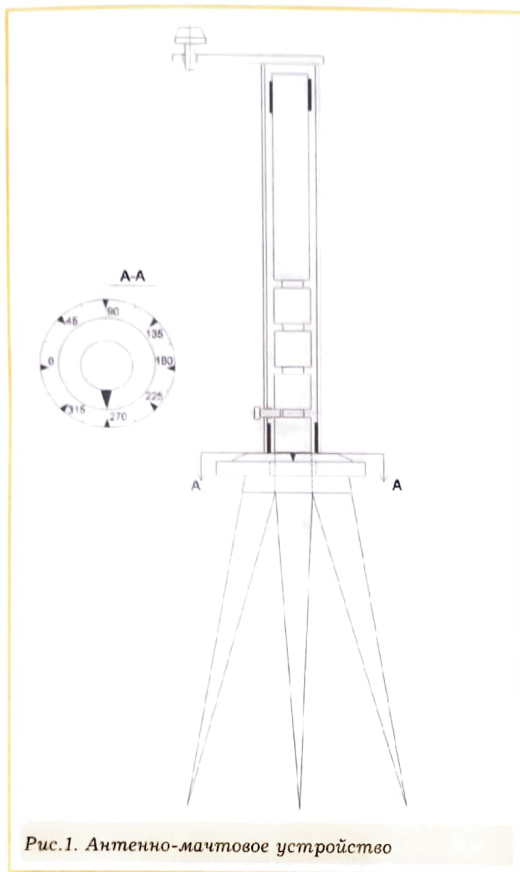


Рис.1. Антенно-мачтовое устройство

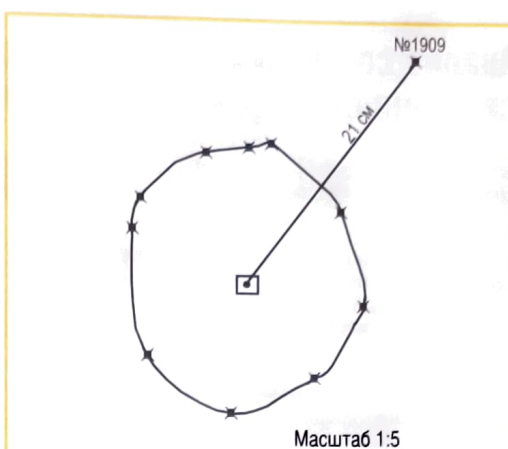


Рис.2. Распределение значений координат пункта №1909 при дискретных наблюдениях
 x-полученные значения координат исследуемой точки при каждом фиксированном положении антенны
 □-значение координаты измеряемой точки, полученные в результате усреднения всех значений

таблице 5 показан фрагмент результатов геодезических измерений с использованием субметровой GPS системы.

На Рис. 2 в качестве примера для пункта наблюдений №1909 (см. табл. 5) показано распределение значений координат при дискретных геодезических измерениях.

Представленные результаты демонстрируют, что реализация предлагаемого способа фазовых измерений обеспечивает точность определения координат пунктов в залесенной местности одного порядка с точностью при работе в открытой местности.

производят измерения также в течение одной минуты. Этот процесс продолжают до завершения

Таблица 5. Результаты измерений спутниковым кодово-фазовым комплексом Javad (база) PathFinder (мобильная станция) в открытой и залесенной местности. Высота смешанных пород 20 м., расстояние между деревьями 5-7 м.

№ пункта	$m_x, \text{м}$	$m_y, \text{м}$	$m_n, \text{м}$	$m_{xy}, \text{м}$	$M_x, \text{м}$	$M_y, \text{м}$	$M_n, \text{м}$	$M_{xy}, \text{м}$	Кол-во видимых спутников, (высота антенны), м	Вид местности
9650	0,17	0,18	0,34	0,24	0,20	0,17	1,05	0,23	7-8; (2)	Открытая
0372	0,18	0,18	0,37	0,25	0,24	0,25	0,77	0,32	7-8; (2)	
9715	0,22	0,20	0,41	0,27	0,21	0,18	0,91	0,29	7-8; (2)	
3950	0,15	0,17	0,48	0,20	0,19	0,21	1,20	0,29	5-6; (2)	Залесная
1909	0,14	0,15	0,36	0,19	0,16	0,18	1,35	0,21	5-7; (2)	

m_x, m_y, m_n ошибки определения координат x, y и высот H по отклонениям от среднего значения;
 m_{xy} ошибка определения местоположения по отклонениям от среднего значения;
 M_x, M_y, M_n ошибки определения координат x, y и высот H по отклонениям от истинных значений;
 M_{xy} ошибка определения местоположения по отклонениям от истинного значения (из высокоточных определений);

полного оборота вращения антенны, то есть до возвращения ее в первоначальное (исходное) положение, в котором также выполняют измерения в течение одной минуты. При необходимости более точного определения координат исследуемых точек идентичные измерения производят на нескольких высотах антенны, для чего подвижную стойку поднимают и фиксируют в следующем положении цилиндрического штока (на высоту $0,5\lambda \approx 10 \text{ см}$). Процесс измерений при каждой высоте антенны выполняют описанным выше способом. Принятые сигналы, прямые и отраженные, автоматически регистрируются, накапливаются и обрабатываются. Конечные значения координат каждой из исследуемых точек на местности определяют путем осреднения полученных осредненных значений для каждого из фиксированных положений антенны. В

Литература

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]. Т. 1, ГОУВПО «СГА». М.: ФГУП «Картоцентр», 2005. 334с.
2. Генике А.А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии [Текст] / А.А. Генике, Г.Г. Побединский. М.: «Картоцентр», 1999. 272 с.
3. Патент на изобретение № 42326 (Россия). Геодезический комплекс и мачтовое подъемно-поворотное устройство для геодезического комплекса / А.Г. Прихода, А.П. Лапко, Г.И. Мальцев и др. 2004.
4. Патент на изобретение № 2116656 (Россия). Способ проведения геодезических измерений с использованием глобальных спутниковых радионавигационных систем и устройство для его осуществления (варианты). / А.Г. Прихода, А.П. Лапко, А.А. Пыстин и др. 1998.
5. Прихода А.Г. Геодезическое обеспечение геолого-геофизических работ с использованием глобальных спутниковых систем: Методические рекомендации [Текст] / А.Г. Прихода, А.П. Лапко, Г.И. Мальцев и др. Новосибирск: СНИИГГИМС, 2000. 158 с.
6. Прихода А.Г. Спутниковое обеспечение сейсморазведочных работ: Методические рекомендации [Текст] / А.Г. Прихода, А.П. Лапко, Г.И. Мальцев и др. Новосибирск: СНИИГГИМС, 2000. 144 с.
7. Шануров Г.А. Геотроника. Наземные спутниковые радиозлектронные средства и методы выполнения геодезических работ: Учебное пособие [Текст] / Г.А. Шануров, С.Р. Мельников. М.: УП «Репрография», МИИГАиК, 2001. 136 с.