

ОПЫТ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СКАНИРОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГНСС-АППАРАТУРОЙ ПРИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТАХ

С.О. Шевчук («Аэрогеофизическая разведка», Новосибирск)

В 2010 г. окончил Институт дистанционного зондирования и природопользования Сибирской государственной геодезической академии (в настоящее время — Сибирский государственный университет геосистем и технологий) по специальности «аэрофотогеодезия». С 2009 г. работал в АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья». С 2017 г. работает в ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», в настоящее время — старший научный сотрудник. Кандидат технических наук.

К.В. Киселев («Аэрогеофизическая разведка», Новосибирск)

В 2010 г. окончил геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета по специальности «геофизик». В 2007-2010 гг. работал в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, с 2011 г. — в компании Philips. С 2014 г. работает в ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», в настоящее время — ведущий инженер-геофизик.

Д.А. Прохоров («Эффективные технологии Центр»)

В 2013 г. окончил Алтайскую государственную академию образования имени В.М. Шукшина по специальности «специалист в сфере сервиса и туризма». С 2012 г. работал в ООО «УГТ-Новосибирск», с 2014 г. — в ООО «Компания «ГМЦ». С 2017 г. работает в компании «Эффективные технологии Центр», в настоящее время — руководитель регионального представительства.

Электромагнитное сканирование (ЭМС) — это разновидность геофизических исследований, широко применяемая при инженерных, изыскательских и археологических работах. ЭМС осуществляется специальными измерительными комплексами. Измерения выполняются, как правило, методом становления электромагнитного поля в ближней зоне (ЗСБ) [1].

В зависимости от масштаба съемки, глубины исследования и детальности сканирования, при проведении ЭМС используются генераторно-измерительные комплексы различные

по размеру и форме контуров, перемещение которых осуществляется как буксированием (с использованием вездеходного транспорта), так и переносом вручную исполнителями работ (при малых габаритах съемочной аппаратуры). Примеры установок для проведения ЭМС различных габаритов приведены на рис. 1.

На рис. 1 показан буксируемый генераторно-измерительный комплекс, размером 2х10 м, закрепленный на пневматическом надувном каркасе, применяемый при электромагнитных съемках вплоть до масштаба 1:5000, а также переносной

комплекс ЭМС размером 2х4 м для детального сканирования в масштабе 1:2000 и крупнее.

Топографо-геодезическое обеспечение данных работ заключается в ряде мероприятий по сбору картографических материалов, закреплению на местности точек геологоразведочных наблюдений, определению плано-высотного положения измеряемых пунктов. Последнее включает определение координат точек траектории геофизических наблюдений с необходимой точностью, что в настоящее время выполняется посредством пользовательской аппаратуры глобаль-



Рис. 1

Примеры генераторно-измерительных комплексов ЭМС: буксируемая конструкция (слева); переносная платформа (справа)

ных навигационных спутниковых систем (ГНСС) различного класса точности.

Так, для ЭМС в масштабе мельче 1:10 000 с опорным горизонтом глубже 500 м используются, как правило, навигационные ГНСС-приемники, имеющие среднюю квадратическую погрешность (СКП) 5 м в плане и 10 м по высоте. Для детального ЭМС в масштабе 1:10 000 и крупнее должна применяться фазовая аппаратура ГНСС геодезического класса точности, заявленная точность которой при относительном методе измерений составляет несколько сантиметров [2].

▼ Проблемы топографо-геодезического и навигационного обеспечения ЭМС

В последние годы значительно повысилась детальность ЭМС, вследствие чего ужесточились и требования к точности определения координат точек траектории движения комплекса. В отсутствии регламентов электромагнитная съемка масштабов крупнее 1:50 000 в действующей инструкции [3] данные требования определяются, исходя из технического задания.

Применяемая при ЭМС фазовая ГНСС-аппаратура, как правило, позволяет достигнуть требуемых точностных характеристик для разных масштабов съемки вплоть до 1:1000 и крупнее, если обеспечивается бес-

препятственный прием сигналов ГНСС.

Однако ЭМС зачастую выполняется в залесенной местности или на просеках, а также в условиях «городских каньонов», что влечет значительное понижение точности из-за наличия переломленных сигналов (явление многопутности) и заглушенных сигналов (как следствие — уменьшение количества используемых спутников и ухудшение геометрического фактора) [4]. Аппаратура геодезического класса точности более чувствительна к данным явлениям из-за необходимости постоянного слежения за фазой несущей частоты принимаемого сигнала навигационного спутника.

Достижение необходимой точности также усложняется и тем, что измерения проводятся в кинематическом режиме (чаще всего, с постобработкой).

Указанные проблемы могут быть решены за счет применения многосистемной спутниковой аппаратуры (по крайней мере, принимающей сигналы ГЛОНАСС и GPS) и программного обеспечения для обработки измерений, имеющих различные программно-аппаратные решения для борьбы с многопутностью и затуханием сигналов ГНСС.

Кроме того, при выполнении ЭМС необходимо проводить редукцию полученных координат к центрам антенн измери-

тельных комплексов, что вызвано невозможностью их совмещения с антеннами ГНСС-приемников.

▼ Проведение ЭМС с использованием ГНСС-приемников EFT M2 GNSS

В мае 2018 г. был проведен эксперимент с целью оценки возможности применения отечественной ГНСС-аппаратуры геодезического класса точности для ЭМС масштаба 1:2000 и крупнее.

Измерения выполнялись в окрестностях города Новосибирска (Красноярское шоссе) на тестовой площадке, в пределах которой залегал газовый трубопровод на глубине нескольких метров.

Предварительно на местности с помощью рулетки на участке размером 50x50 м были разбиты маршруты с интервалом 10 м (рис. 2). Площадка располагалась на просеке, на пути следования присутствовали отдельно стоящие деревья и кустарники. Высота деревьев по краям просеки составляла 15–20 м. Границы площадки находились на удалении не более 5–10 м от кромки леса.

Для геодезической привязки измерений при ЭМС была выбрана аппаратура EFT M2 GNSS компании ООО «Эффективные технологии», произведенная в Российской Федерации. Указанное оборудование использовалось в каче-



Рис. 2

Проектные маршруты на тестовой площадке

стве мобильного (подвижного) приемника и базовой станции (рис. 3). Часть технических характеристик аппаратуры приведена в табл. 1, подробное описание доступно на сайте производителя [5].

Мобильный ГНСС-приемник монтировался на переносной платформе на удалении 2 м от центра антенны генераторно-измерительного комплекса для минимизации помех, возникающих при электромагнитном сканировании. Съёмка проводилась на скорости не более 1–2 км/ч. При этом ГНСС-измерения выполнялись с высокой частотой (5 Гц), а результаты

записывались в память приемника для дальнейшей постобработки. Кроме того, предварительно были выполнены измерения на крайних (узловых) точках маршрутов для дальнейшего анализа кинематической траектории маршрута, полученной в режиме «кинематика в реальном времени» (RTK).

Процесс электромагнитной съемки показан на рис. 4.

Прием спутниковых сигналов ГНСС-аппаратурой осложнялся следующими факторами:

- нахождение тестового участка на просеке, наличие кустарников и отдельно стоящих деревьев;

- низкое расположение антенны над поверхностью земли (не выше 1 м);

- частичное закрытие радиогоризонта исполнителями работ при перемещении генераторно-измерительного комплекса вручную.

Файлы «сырых» измерений обрабатывались в программе Magnet Office Tools относительным методом с использованием данных, полученных от близлежащих пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области [6]. Для сравнения также была проведена обработка данных методом Precise Point Positioning (PPP) посредством online-сервиса CSRS-PPP [7].

Анализ качества результатов выполнялся несколькими методами:

- контроль по проектным межмаршрутным расстояниям, измеренным при разбивке участка, и по координатам крайних точек маршрутов, предварительно полученным в режиме RTK;

- взаимное сравнение данных различными методами;

- стандартные методы оценки погрешности в программе обработки ГНСС-измерений.



Рис. 3

Установка ГНСС-приемников EFT M2 GNSS: в качестве базовой станции (слева); в качестве мобильного приемника на генераторно-измерительном комплексе (справа)

Технические характеристики ГНСС-приемников EFT M2 GNSS

Таблица 1

| Наименование характеристики | Значение |
|---|--|
| Количество каналов | 555 |
| Принимаемые сигналы и частоты | GPS: L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5 ГЛОНАСС: L1 C/A, L2C, L2P, L3, L5 Galileo: E1, E5A, E5B, E5 AltBOC, E6 Beidou: B1, B2, B3 QZSS: L1 C/A, L1C, L2C, L5, L6 SBAS: L1, L5 IRNSS: L5 |
| <i>Точность (СКП)</i> | |
| Статика и быстрая статика | В плане: 2,5 мм + 0,5 мм/км; по высоте: 5 мм + 0,5 мм/км |
| Кинематика с постобработкой | В плане: 8 мм + 1 мм/км; по высоте: 15 мм + 1 мм/км |
| Кинематика в реальном времени (RTK) | В плане: 8 мм + 1 мм/км; по высоте: 15 мм + 1 мм/км |
| Дифференциальные кодовые измерения (DGPS) | В плане: 25 мм + 1 мм/км; по высоте: 50 мм + 1 мм/км |
| Протоколы обмена данных | CMR, CMR+, sCMRx, RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2, NMEA |
| Размеры (Ш x В) | 15,3x8,3 см |
| Вес | 950 г (с учетом аккумулятора и УКВ-модема) |
| Питание | Встроенный Li-Ion аккумулятор, 5000 мАч, 7,4 В; возможность подключения внешнего аккумулятора 6~36 В |
| Пыле-влагозащитенность | IP68 |
| Рабочая температура | От -45°C до +65°C |
| Температура хранения | От -55°C до +85°C |
| Память | Встроенная память 16 Гбайт, поддержка microSD до 32 Гбайт |
| Дополнительные возможности | Датчик наклона, электронный уровень, датчик ориентации |

▼ **Результаты экспериментальных работ**

На рис. 5 приведены траектории после обработки в программе Magnet Office Tools и с помощью сервиса CSRS-PPP.

В текстовых отчетах программы Magnet Office Tools и сервиса CSRS-PPP использовались различные величины, характеризующие погрешность измерений: в первом случае СКП (RMS) в плане и по высоте, а во втором

— стандартные отклонения StDev по осям x (N), y (E), h (U). В обоих случаях указанные оценки не превышали 0,05 м в плане и 0,07 м по высоте. Однако, как правило, программы обработки ГНСС-измерений



Рис. 4

Процесс выполнения электромагнитной съемки на тестовой площадке

дают чрезмерно оптимистичные оценки показателей точности, поэтому их стоит применять только для предварительного анализа результатов [2].

Более красноречив показатель доли измерений, имевших решения по фазе, — около 87% в обоих случаях.

Главным способом оценки точности полученных траекторий являлось определение значений межмаршрутных расстояний и их сравнение с предварительно измеренными проектными значениями. Наиболее достоверные результаты получились на крайних точках маршрутов, так как они не были искажены погрешностями выдерживания направления траектории заданного пути (табл. 2).

На точность приведенных в табл. 2 межмаршрутных расстояний помимо СКП аппаратуры оказывали влияние также погрешности выдерживания траектории и установки платформы непосредственно над исследуемым объектом (газовым трубопроводом).

Тот же показатель для навигационного приемника, встроенного в аппаратуру измерительного комплекса ЭМС, находился на уровне 3 м (СКП) с

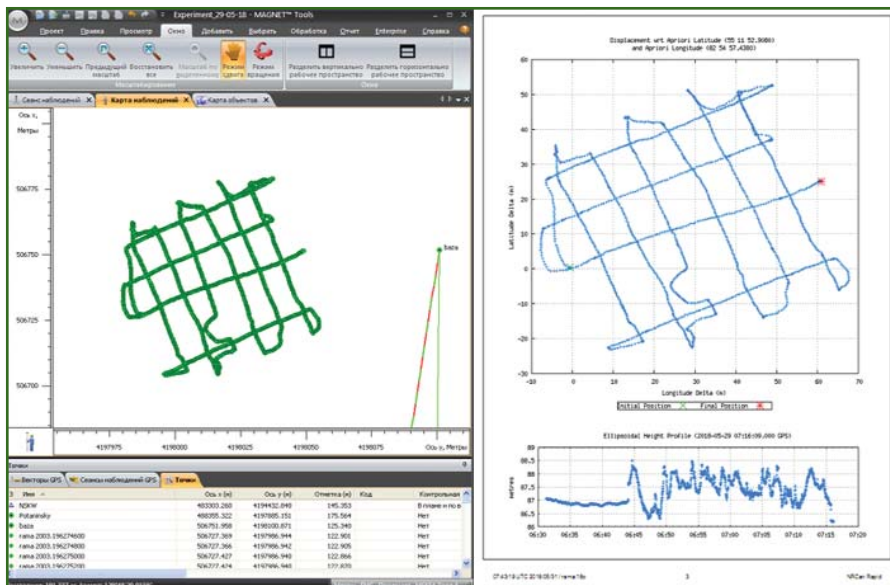


Рис. 5 Карты-схемы с траекториями после обработки: в окне программы Magnet Office Tools (слева); в отчете сервиса CSRS-PPP (справа)

предельными погрешностями до 6 м.

При сравнении траектории маршрута, полученного по координатам крайних точек, измеренных в режиме RTK, с точками кинематической траектории боковые уклонения не превышали 0,10–0,15 м.

То есть можно сделать вывод о погрешностях определения точек в плане не хуже 0,3–0,4 м и точнее, что для кинематических измерений в сложных

ландшафтных условиях является хорошим результатом, и, при условии корректной редукиции, позволяет обеспечить детальное ЭМС при съемке в масштабе до 1:1000 и крупнее.

Кроме того, проводилось сравнение точек траекторий, полученных относительным методом и методом PPP в плане и по высоте (рис. 6).

На графиках прослеживается очевидный систематический сдвиг траекторий, полученных

Результаты сравнения значений проектных и полученных межмаршрутных расстояний

Таблица 2

| № маршрута | Начало / Конец | Разности, м | | Крайние точки (RTK) |
|------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------|
| | | Кинематическая траектория | Относительный метод CSRS-PPP | |
| 1-2 | Начало | 0,48 | 0,32 | 0,02 |
| | Конец | -0,04 | -0,40 | -0,23 |
| 2-3 | Начало | -0,04 | 0,02 | 0,02 |
| | Конец | -0,35 | -0,25 | -0,2 |
| 3-4 | Начало | 0,32 | 0,28 | 0,19 |
| | Конец | -0,15 | 0,02 | 0 |
| 4-5 | Начало | 0,00 | 0,12 | 0,02 |
| | Конец | 0,07 | 0,31 | 0,04 |
| 5-6 | Начало | 0,20 | 0,10 | 0,01 |
| | Конец | -0,40 | -0,13 | -0,15 |
| | СКП | 0,24 | 0,21 | 0,11 |

различными методами. Общая СКП, вычисленная по разностям траекторий (если взять за истинную траекторию, полученную относительным методом) составила 0,9 м в плане и 4 м по высоте, что объясняется несоответствием параметров пересчета из WGS-84 в СК-95 по ГОСТ 32453-2013 (Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек). При использовании локальных параметров данный систематический сдвиг также полностью устраняется.

Вычитание среднего сдвига в плане и по высоте уменьшает погрешности до 0,2 м в плане и 0,25 м по высоте.

На основе полученных координат была выполнена обработка геофизических измерений, которая показала, что местоположение залегающего газового

трубопровода определено с точностью, соответствующей точности съемки при ЭМС в масштабе 1:1000.

Таким образом, указанные технологии позволяют выполнять детальное ЭМС, в том числе, в сложных ландшафтных условиях.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно отметить следующее:

— современная фазовая ГНСС-аппаратура позволяет обеспечить детальное ЭМС с необходимой точностью, в том числе в сложных ландшафтных условиях (в частности, на просеках);

— СКП определения координат и высот точек траектории кинематической съемки в сложных ландшафтных условиях находится на уровне нескольких дециметров;

— метод PPP также позволяет получить координаты и высоты с

точностью в несколько дециметров при условии надежных параметров пересчета (как правило, получаемых при локализации по трем и более пунктам с известными координатами).

Можно констатировать наличие отечественной ГНСС-аппаратуры, обеспечивающей получение надежных результатов при проведении измерений в сложных условиях приема спутниковых сигналов. Стоит однако оговориться, что используемая в ГНСС-приемниках элементная база (в первую очередь, чипсеты) по-прежнему производится преимущественно за рубежом. Ее замена на отечественные аналоги может быть следующим перспективным шагом развития гражданской аппаратуры пользователя ГНСС в России.

▼ Список литературы

1. Transient Geo-Electromagnetics / F.M. Kamenetsky, E.H. Stettler, G.M. Trigubovich. — Ludwig-Maximilian-University of Munich. Dept. of the Earth and Environmental Sciences. Section Geophysics. — Munich, 2010. — 296 p.
2. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии в 2 т. — Т. 2. — М.: Картогеоцентр, 2006. — 360 с.
3. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 1997. — 106 с.
4. Михайлов С.В. Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS-приемником // Беспроводные технологии. — 2006. — № 2. — С. 60–71.
5. EFT Group. — <http://eft-survey.ru>.
6. Государственное бюджетное учреждение «Центр навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области». — <http://cngt.nso.ru>.
7. National Resources Canada. Precise Point Positioning. — <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-utills/ppp.php>.

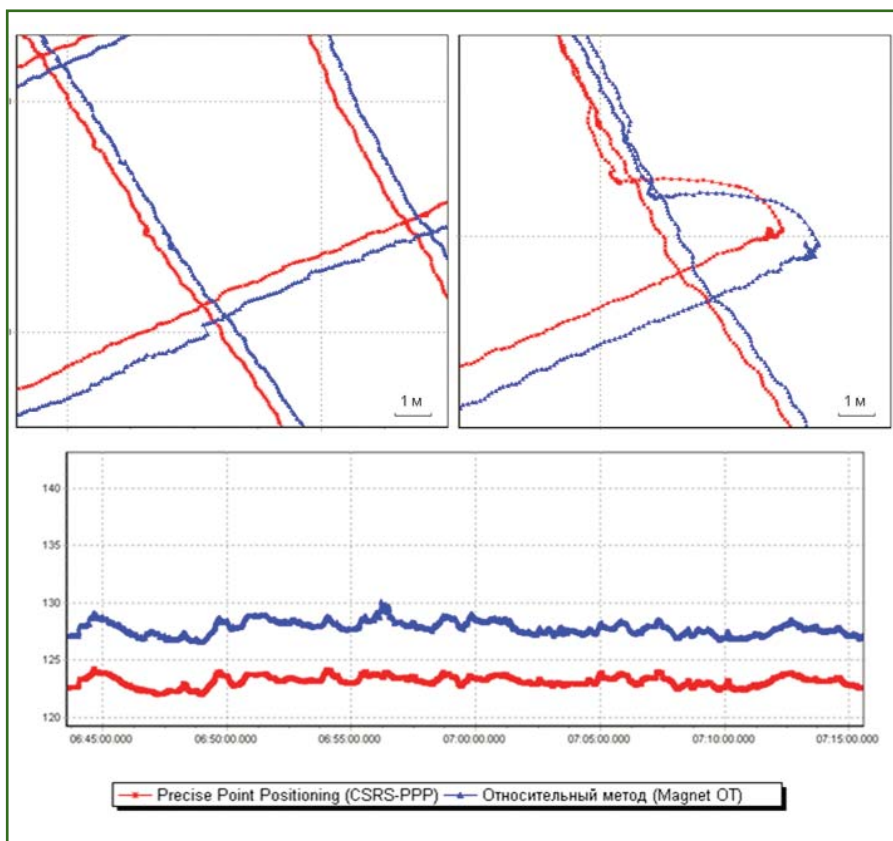


Рис. 6

Фрагменты положения траекторий, полученных различными методами обработки, в плане и по высоте