



УДК 528.7:550.837

НАВИГАЦИОННОЕ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЭРОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОДВЕСНОЙ ВЕРТОЛЕТНОЙ ПЛАТФОРМОЙ

С. О. Шевчук

Рассмотрена методика навигационного и геодезического обеспечения аэроэлектромагнитных исследований на примере системы «Импульс-Аэро» посредством спутниковых измерений в абсолютном режиме с постобработкой по алгоритму Point Precise Positioning (PPP).

Ключевые слова: спутниковое позиционирование, навигация, точное точечное позиционирование, аэрогеофизика, аэроэлектроразведка, геодезическое обеспечение.

NAVIGATIONAL AND GEODETIC SUPPORT OF AIRBORNE ELECTROMAGNETIC STUDIES WITH THE SUSPENDED-TYPE HELICOPTER PLATFORM

S. O. Shevchuk

The paper demonstrates the technique of navigational and geodetic support of airborne electromagnetic studies with the "Impuls-Aero" system by means of satellite measurements in the absolute mode with postprocessing using the Point Precise Positioning (PPP) algorithm.

Key words: satellite positioning, navigation, accurate pinpoint positioning, airborne geophysics, airborne electromagnetics, geodetic support.

В ФГУП «СНИИГГиМС» совместно с рядом научно-производственных организаций разработана аэроэлектромагнитная система «Импульс-аэро» с подвесной платформой – источником электромагнитных излучений, расположенной под фюзеляжем вертолета типа МИ-8, предназначенная для поиска геологических объектов в динамике [2].

Строение и общий принцип функционирования аэроэлектромагнитного комплекса приведены на рис. 1.

Навигационные и геодезические параметры являются важнейшей составляющей аэрогеофизической технологии с использованием вертолетной разведочной платформы и в существенной степени определяют качество полевых материалов и геолого-геофизическую результативность исследований.

На рис. 2 схематично представлены навигационные и геодезические параметры, необходимые для выполнения аэроэлектромагнитной съемки, включая обработку результатов, с использованием подвесной вертолетной платформы, а в таблице – расшифровка и назначение этих параметров в соответствии со схемой на рис. 2.

В настоящее время спутниковые технологии на базе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS – практически единственное эффективное универсальное средство навигационного и геодезического обеспечения геофизических съемок. Спутниковые технологии в сочетании с другими методами позволяют

получать значения следующих параметров навигационного и геодезического обеспечения аэро-съемочных работ с использованием подвесной вертолетной платформы:

– проводку носителя геофизической аппаратуры по проектному маршруту с координатами X_H , Y_H и контроль скорости полета V_H ;

– определение текущих плановых координат X_1 , Y_1 фюзеляжа вертолета в точке крепления трос-кабеля разведочной платформы и геодезической высоты H_1 ;

– определение текущих плановых координат X_2 , Y_2 и геодезической высоты H_2 центра разведочной платформы;

– определение текущих плановых координат X_M , Y_M и геодезической высоты H_M магнитометра.

Определение превышения h центра разведочной платформы относительно его проекции на физическую поверхность Земли и истинной высоты полета H_H выполняется с помощью высотометров различных типов.

Получение необходимых навигационных и геодезических параметров с использованием спутниковой методики может осуществляться посредством нескольких технологических схем, основанных на различных методах позиционирования. Эти схемы включают в себя не только состав геодезической аппаратуры, но и всю технологическую цепочку от подготовительных работ до обработки результатов измерений. Примером могут служить три технологии навигационно-геодезического обеспечения аэроэлектромагнитного комплекса с подвесной вертолетной платформой:

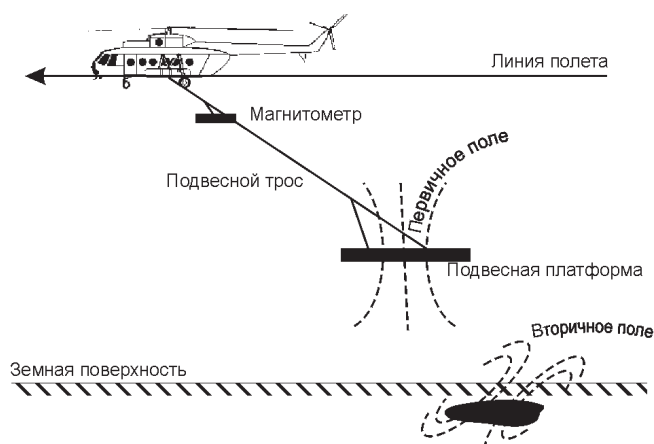


Рис. 1. Строение и принцип функционирования электромагнитного комплекса в полете

- абсолютный способ позиционирования с использованием алгоритма PPP (Point Precise Positioning);
- относительное позиционирование (совместная обработка с измерениями наземного приемника – базовой станции, установленного на точке с известными координатами);
- дифференциальный способ позиционирования (с использованием спутниковых и наземных дифференциальных подсистем).

Для перечисленных технологий общими являются элементы проводки и навигации носителя по съемочным маршрутам, а также определение истинных высот платформы и ее носителя.

В данной статье рассмотрен только абсолютный (точечный) метод определения координат с применением алгоритма PPP, который реализуется посредством одного спутникового приемника, что значительно снижает затраты за счет отсутствия необходимости выноса и привяз-

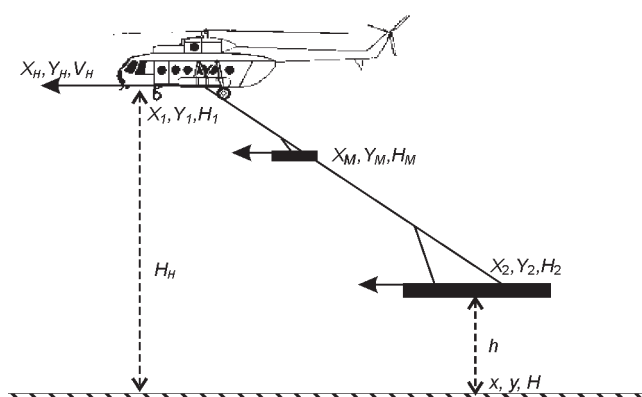


Рис. 2. Навигационные и геодезические параметры, определяемые при аэроэлектромагнитной съемке с использованием подвесной вертолетной платформы

ки базовых станций. В основу метода положено использование точных орбит (эфемерид) спутников и поправок к спутниковым часам, получением и распространением которых занимается Международная GNSS-служба (IGS).

Значения координат получают в результате постобработки с применением специального программного обеспечения (ПО) и поправок, получаемых через Интернет с серверов IGS. Обработка по алгоритму PPP в настоящее время возможна только при использовании двухчастотной фазовой аппаратуры [1].

IGS – международная научная организация, посредством обработки измерений сети ГНСС-станций получающая различные информационные данные, применяемые как в научных, так и в практических целях [4].

На июль 2011 г. в мире в сети IGS было 372 активные базовые станции, в том числе в России около 15 [4]. Файлы эфемерид и часов загружа-

Навигационные и геодезические параметры, необходимые при аэроэлектромагнитной съемке с использованием подвесной платформы

Процедура	Обозначение (ед. изм.)	Назначение
Проводка носителя (вертолет) по проектному маршруту: выдерживание линии заданного пути (ЛЗП) по проектному маршруту в допустимых пределах выдерживание в допустимых пределах истинной высоты полета относительно рельефа местности выдерживание в допустимых пределах путевой скорости вертолета	X_H, Y_H (м) H_H (м) V_H (км/ч)	Выдерживание требований технического задания на выполнение съемки, соблюдение требований безопасности полета
Определение величины превышения центра приемной антенны подвижной платформы относительно его проекции на земную поверхность в момент электромагнитного зондирования	h (м)	Обработка результатов электромагнитных исследований
Определение текущих плановых координат и геодезических высот вертолета	X_1, Y_1, H_1 (м)	Ввод поправок за влияние фюзеляжа при обработке и интерпретации результатов электромагнитных исследований
Определение текущих плановых координат и геодезических высот подвесной платформы	X_2, Y_2, H_2 (м)	Обработка результатов электромагнитных исследований
Определение текущих плановых координат и геодезических высот магнитометра	X_M, Y_M, H_M (м)	То же
Редуцирование координат и высот геометрического центра платформы на земную поверхность (топографическую осьную) на момент измерений	x, y, H (м)	Построение карты (плана) поискового объекта

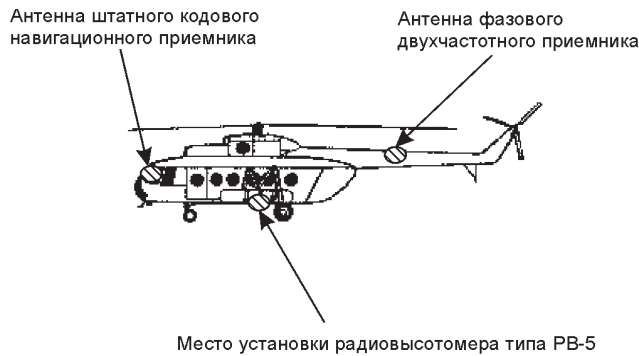


Рис. 3. Схема размещения дополнительного навигационно-геодезического оборудования на носителе подвесной платформы (вертолете)

ются на серверы IGS с задержкой. Доступ к ним бесплатный (кроме поправок, которые можно заказать для получения в реальном времени).

Для спутников GPS с задержкой до 15 мин можно получить предсказанные (Ultra-Rapid) эфемеридные данные (средняя квадратическая погрешность (СКП) положения 5 см, времени 3 нс), более точные предсказанные – с задержкой 3 ч (3 см, 0,15 нс), быстрые (Rapid) – с задержкой до 17 ч (2,5 см, 0,075 нс); окончательные (Final) (2,5 см, 0,075 нс) – с задержкой до 21 сут [2, 6].

Для спутников ГЛОНАСС данные доступны только с задержкой 14–21 сут в виде эфемерид с СКП орбит 5 см [2, 6].

По результатам многочисленных экспериментов с аппаратурой NovAtel DL-V3 и специальным программным обеспечением WayPoint GrafNav выявлено, что в кинематике точность PPP 0,2–0,7 м. При этом разница между данными, обработанными по быстрым (Rapid) и окончательным (Final) файлам орбит и поправок часов, составляет единицы миллиметров, т. е. использование окончательных файлов не дает заметного повышения точности в режиме кинематики. Таким образом, постобработку данных по алгоритму PPP с достижением точности первых дециметров в режиме кинематики можно осуществить через сутки после съемки (по быстрым поправкам).

Для получения точных и надежных решений в кинематическом режиме необходимо предварительно выполнить сеанс статической инициализации – наблюдений спутниковой аппаратурой в неподвижном положении. Перед вылетом аппаратура должна быть включена, запись измерений должна производиться не менее 20 минут до начала движения [5].

Во избежание пробелов в записи координат, вызываемых срывами фазы приемника, расположенного на подвесной платформе, рекомендуется устанавливать в контейнер платформы дополнительный кодовый приемник для более надежной интерполяции ее координат.

Данная технология требует наличия следующей навигационно-геодезической аппаратуры и ПО:

- штатный спутниковый навигатор вертолета или нештатный навигационный кодовый приемник

ГЛОНАСС/GPS для выполнения проводки вертолета по проектным съёмочным маршрутам, определения его текущих координат X_H, Y_H и контроля скорости полета V_H ;

- нештатный радиовысотометр типа РВ-5 для выдерживания необходимой высоты полета H_H ;
- прецизионный лазерный высотомер для определения истинной высоты центра платформы (приемной антенны) над земной поверхностью h ;
- гиросtabilизирующая платформа для лазерного высотомера, обеспечивающая более точное определение h ;
- два двухчастотных геодезических приемника ГЛОНАСС/GPS с выносными авиационными антеннами для определения геодезических координат и высот вертолета (X_1, Y_1, H_1) и платформы (X_2, Y_2, H_2);
- специальное ПО с поддержкой обработки по алгоритму PPP.

Рекомендуемые места размещения антенн спутниковой аппаратуры и высотомеров на летательном аппарате (ЛА) приведены на рис. 3. Антенна фазового ГЛОНАСС/GPS-приемника может устанавливаться не только на хвостовую балку, как показано на рис. 3, но и на ось лопастей вертолета. При размещении аппаратуры на платформе антенну рекомендуется закреплять на контейнере, а приемник размещать внутри него. При этом антенна должна находиться на главной оси платформы.

Лазерный высотомер устанавливается в произвольное место выносной платформы на гиросtabilизирующей установке.

При установке аппаратуры на ЛА и платформу для последующего перехода от точек установки антенн и датчиков высотомера к определяемым навигационно-геодезическим параметрам необходим ряд измерений расстояний:

- от места установки антенны двухчастотного приемника на носителе до точки крепления трос-кабеля в плане и по высоте;
- от места установки спутниковой антенны приемника на платформе до приемного центра антенны платформы в плане и по высоте;
- от точки крепления трос-кабеля до точки крепления магнитометра на нем;
- от точки крепления магнитометра на тросе до датчика приема магнитного поля;
- длина трос-кабеля с учетом тросового «паука».

При наличии координат центра платформы и точки крепления трос-кабеля можно аналитически получить координаты магнитометра (X_M, Y_M, H_M), зная его расстояние от точки крепления (рис. 4).

Технология навигационно-геодезического обеспечения аэрогеофизических исследований, основанная на применении метода абсолютного (точечного) позиционирования, включает в себя следующие процессы:

- *подготовительные и проектные работы:*



Рис. 4. Определение координат магнитометра по измеряемым координатам точки крепления трос-кабеля и центра платформы

- геодезическое и картографическое изучение района работ;
- анализ местности съемки (вид и форма рельефа, минимальные и максимальные отметки местности, растительный покров, гидрографическая сеть, наличие дорог и населенных пунктов);
- наличие места возможного временного базирования авиатранспорта;
- определение условий видимости спутников с учетом минимального допустимого угла маскировки (визирования);
- выбор места размещения на ЛА антенны спутникового приемника;
- монтаж бортового спутникового оборудования и размещение (по утвержденной установочной конструкторской документации) приемной антенны спутниковых сигналов и корректирующих поправок;
- исследование влияния на спутниковый приемник собственной бортовой аппаратуры ЛА;
- составление схемы вождения ЛА с нанесением проектной (съёмочной) информации.
- выбор спутниковой геодезической аппаратуры, необходимой для выполнения работ;
- установка необходимой аппаратуры на вертолет и платформу, выполнение необходимых замеров;
- приведение аппаратуры в рабочее состояние, при необходимости – выполнение калибровок и поверок (аппаратура должна иметь комплект необходимых документов: сертификаты соответствия СИ, свидетельства о поверке);
- испытание аппаратуры в рабочих условиях, выявление и решение проблем совместимости геодезической и геофизической аппаратуры;
 - *операции в процессе выполнения съемки:*
 - статическая инициализация фазовой спутниковой аппаратуры носителя и платформы продолжительностью не менее 20 мин;
 - выполнение навигации и проводки носителя по заданным маршрутам и контроля выдерживания координат и скорости полета;

- определение истинной высоты платформы над земной поверхностью;
- определение координат носителя, платформы и магнитометра;
- запись измеряемых данных на носители памяти;
- синхронизация записанных данных по времени;
- *операции после выполнения съемки:*
 - загрузка результатов измерений в ПК;
 - загрузка из Интернета файлов, необходимых для PPP-обработки;
 - обработка результатов измерений;
 - выполнение необходимых математических преобразований для перехода от результатов измерений к определяемым величинам;
 - составление отчетных карт и планов, вывод каталогов координат и высот;
 - оценка качества выполненных работ.

Данная технология экономически целесообразна и должна обеспечивать необходимую точность определения навигационно-геодезических параметров. Основные ее недостатки – необходимость доступа в Интернет, наличие задержек в получении информации, необходимой для обработки и слабая адаптация под систему ГЛОНАСС, зависимость решения от качества данных, предоставляемых Международной ГНСС-службой.

Автор признателен за помощь в поиске материалов и подготовке статьи своему научному руководителю А. Г. Приходе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов, А. В.** Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах [Текст] / А. В. Виноградов, А. В. Войтенко, А. Ю. Жигулин // Геопрофи. – 2010. – № 2. – С. 27–30.
2. **Серापинас, Б. Б.** Глобальные системы навигации и позиционирования [Текст] / Б. Б. Серापинас // Геопрофи. – 2010. – № 2. – С. 60–63.
3. **Электромагнитные** технологии поиска месторождений полезных ископаемых [Текст] / А. К. Захаркин, В. С. Моисеев, Г. М. Тригубович, В. В. Филатов // 50 лет на службе геологии Сибири. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 2007. – С. 477–489.
4. **About IGS** [Интернет-ресурс] // IGS Tracking Network. – Режим доступа: <http://www.igs.org/overview/viewindex.html>.
5. **Airborne Precise Point Positioning (PPP) in GrafNav 7.80 with Comparisons to Canadian Spatial Reference System (CSRS) Solutions** [Интернет-ресурс] // IGS Tracking. – Режим доступа: <http://www.novatel.com/assets/Documents/Waypoint/Reports/PPPReport.pdf>.
6. **IGS Data & Products** [Интернет-ресурс] // IGS Tracking Network. – Режим доступа: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.