

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРИМЕРЕ GPS

К.М. Антонович (СГГА, Новосибирск)

В 1963 г. окончил Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (НИИГАиК) по специальности «астрономогеодезия». 15 лет руководил станцией оптических наблюдений ИСЗ Астросвета АН СССР при НИИГАиК. В настоящее время — заведующий кафедрой астрономии и гравиметрии Сибирской государственной геодезической академии (СГГА).

Запуск первого американского навигационного спутника системы NAVSTAR был произведен в 1978 г., в то время как российская система ГЛОНАСС начала формироваться с запуска трех спутников в 1982 г. К этому времени на орбитах вокруг Земли вращалось уже 6 американских спутников. Именно с их помощью были получены первые впечатляющие результаты геодезических измерений с применением GPS. В 1982 г. в Массачусетском институте технологий (США) была образована исследовательская группа под руководством Ч. Кунселмана, в которую входили И. Бок, Р. Кинг, Д. Коллинз, А. Лейк и др. Эта группа провела испытания прототипа приемника Macrometer. При статических измерениях базовых линий в сеансах, длившихся по несколько часов, были получены относительные ошибки, равные $(1-2) \cdot 10^{-6}$. Позднее А. Лейк напишет в своей книге: «Это было шокирующее открытие. Внезапно появилась измерительная система, способная превзойти точность традиционных первоклассных геодезических сетей» [1].

В течение 1983–1984 гг. съемки с приемником Macrometer V-1000 доказали состоятельность GPS-технологий. Группой ученых Массачусетского института технологий была создана сеть сгущения 1-го класса из 30 станций в районе Эйфель — западной части Рейнских Сланцевых гор (Герма-

ния) [2], а в начале 1984 г. — сеть сгущения в округе Монгомери (штат Пенсильвания, США). В обоих случаях точность измерений была на уровне $(1-2) \cdot 10^{-6}$ при длине линий около 10 км и превышала точность существующих сетей [1].

В 1984 г. спутниковая технология была использована в Станфордском университете (штат Калифорния, США) при создании высокоточной инженерной сети для строительства Станфордского линейного ускорителя [3]. Традиционные измерения углов и расстояний были объединены с GPS-наблюдениями базовых линий. При этом была достигнута миллиметровая точность, подтвержденная лазерным трассированием ускорителя, воспроизводившим прямую линию с точностью до 0,1 мм.

Очевидное преимущество новой технологии заключалось в том, что прямой видимости между пунктами не требовалось а, следовательно, не было необходимости в построении высоких сигналов. Метод позволял автоматизировать наблюдения и вычисления, сводя к минимуму личные ошибки наблюдателя, одновременно предъявляя более высокие требования к индивидуальным способностям исполнителей при работе со сложными вычислительными комплексами. В дополнение к указанным преимуществам нужно отметить возможность проведения наблюдений практически в

любую погоду и время суток.

Однако при объединении спутниковых и классических сетей возникли некоторые трудности, вызванные несоответствием поверхностей относимости. В спутниковом методе сеть наблюдается на общем земном эллипсоиде (например, WGS-84), в классической геодезии измерения ведутся относительно геоида (или квазигеоида).

Т. Энгелис, Р. Рапп и И. Бок, получив ортометрические высоты пунктов Эйфелевой сети, показали, как следует объединять классическое измерение высот с определением из GPS-измерений разностей геодезических высот [4]. Дж. Ладд сообщил о достижении точности в 10^{-6} за время наблюдений в 15 мин бескодowym двухчастотным приемником Macrometer II, что дало импульс к разработке **технологии быстрой статики** [5]. Становятся доступными коммерческие программы для обработки фазовых и кодовых измерений, включающие уравнивание, координатные преобразования и построение геоида [1].

В 1984 г. Б. Ремонди изложил теоретические основы GPS-измерений (www.ngs.noaa.gov) [6]. Им же была разработана технология кинематической съемки, при которой антенна одного из приемников остается неподвижной, а второй приемник вместе с антенной либо постоянно перемещается, либо движется от одной станции к другой, останавливаясь на каж-

дой из них на несколько секунд. Оба приемника должны непрерывно производить фазовые измерения, постоянно наблюдая не менее четырех спутников. Первый вид съемок стал называться **истинной** или **непрерывной кинематикой** (кинематикой траектории), а второй — **кинематикой «стой и иди»** («Stop-and-Go»).

В последующие два года Дж. Мадером было осуществлено определение координат в процессе аэрофотосъемочных работ [7]. Высокоточное определение координат аэрофотоаппарата позволило значительно сократить число опознавательных знаков и снизить объемы работ по их изготовлению, установке и привязке на местности. Определение координат аппаратуры, находящейся в движении, нашло применение в таких приложениях, как дистанционное зондирование, аэрофотосъемка, съемка дна рек, шельфа и многих других.

Кинематические съемки требуют разрешения неоднозначностей фазовых отсчетов на стартовой базовой линии. Этот процесс называется инициализацией кинематической съемки. В процессе кинематической съемки необходимо поддерживать постоянный захват сигналов не менее четырех спутников. Если число наблюдаемых спутников становится менее четырех, то инициализацию необходимо повторить. Можно представить, насколько это неудобно при съемках в воздухе или на воде. Инициализация на земле выполняется путем наблюдения короткой базовой линии или на точке с известными координатами. В 1990 г. Б. Хофманн-Велленхоф и Б. Ремонди предложили третий способ инициализации — посредством перестановки антенн приемников [8]. Однако более важным для кинематических съемок оказался метод, разработанный в 1989 г.

Г. Сеебером и Г. Вюббеной и получивший название **«инициализации на лету»** («On-the-Fly», OTF). Описание этого метода имеется в [1, 9, 10]. В данном методе определяется целая неоднозначность фазы непосредственно во время движения спутникового приемника. Метод можно использовать при постобработке, съемке в режиме реального времени, а также для точной навигации.

С. Лихтен и Дж. Бордер в 1987 г. сообщили о достижении повторяемости результатов в $(2-5) \cdot 10^{-8}$ в трех компонентах вектора, полученного из статической съемки [11]. Однако здесь, как и во многих других ситуациях, следует различать абсолютную точность, т. е. внешнюю сходимость, характеризующую истинными ошибками, и внутреннюю сходимость. В последнем случае результаты часто могут иметь общие, близкие по величине и знаку систематические ошибки, обусловленные одними и теми же источниками.

Во второй половине 80-х годов было проведено несколько экспериментов и исследовательских проектов, в ходе которых изучалось влияние различных факторов на точность GPS-измерений. Была продемонстрирована хорошая сходимость GPS-измерений базовых линий с методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. Сформировалось мнение, что точность GPS-измерений можно повысить за счет **увеличения точности эфемерид**. Этого можно достичь двумя способами. Первый способ — включать элементы орбиты в число определяемых параметров и оценивать их вместе с компонентами базовых линий. Второй — организация службы точных эфемерид. Последний оказался общедоступным после образования Международной геодинимической GPS-службы (МГС, IGS) [9].

Использование российской системы ГЛОНАСС для целей геодезии активизировалось в 1988 г. после ее регистрации в международных организациях. Почти сразу после этого события в университете Лидса (Англия) был создан кодовый приемник, работающий в режимах GPS и ГЛОНАСС [12]. Привлекательность применения в области геодезии российской системы заключалась в более высокой чем у GPS мощности сигнала и отсутствии режима загробления данных (который был у GPS в тот момент времени). Особенно интересна возможность увеличения количества наблюдаемых спутников, что предоставляло преимущество в точности и скорости при наборе нужного объема измерений, в частности, при съемках в режиме реального времени. Однако использование ГЛОНАСС в точной геодезии встретило ряд трудностей. В частности, потребовались уточнения в теории обработки, вызванные тем, что в российской системе каждый спутник ведет передачи на своих частотах [13, 14]. Появилась необходимость определить параметры связи координатных систем WGS-84 и ПЗ-90, в которых даются параметры движения спутников в режимах GPS и ГЛОНАСС соответственно [15]. Тем не менее, в 90-е годы ряд фирм (Ashtech, Javad, 3S Navigation) выпустили одно- и двухчастотные геодезические приемники, работающие в режиме ГЛОНАСС/GPS. В настоящее время из-за недостаточного числа рабочих спутников ГЛОНАСС интерес к интегрированной аппаратуре несколько ослабел.

А. Браун в 1989 г. разработал метод дифференциальных GPS-съемок, называемый теперь **«метод дифференциальных GPS для широких зон»** (Wide area differential GPS, WADGPS) [16]. Были предприняты попытки стандартизации метода дифференциальных GPS в режиме

реального времени, результатом которых стало появление стандарта RTCM-104, разработанного Радиотехнической комиссией для службы морского судоходства (Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM) [1].

В течение 1991–1992 гг. геодезическим сообществом под эгидой Международной ассоциации геодезии изучались пределы возможностей GPS в глобальном масштабе. Исследования начались с эксперимента по использованию GPS для Международной службы вращения Земли (МСВЗ) и геодинамики (GPS experiment for IERS and Geodynamics, GIG) и продолжились в 1993 г. уже в связи с проведением кампании по созданию МГС. В результате было установлено, что с помощью GPS-измерений можно получать точные параметры вращения Земли. Особый интерес представил факт вывода геоцентрических координат, которые согласовывались по точности с оценками спутниковой лазерной дальнометрии на уровне 10–15 см. Было продемонстрировано, что неоднозначность фазовых GPS-измерений можно разрешать в гло-

бальном масштабе, обеспечивая ежесуточную повторяемость порядка 10^{-9} . Такие результаты оказались возможными при равномерном распределении станций наблюдений по всему земному шару. Была доказана возможность регулярного получения точных орбит спутников GPS. С 1 января 1994 г. МГС начала регулярную деятельность, результаты которой приведены в табл. 1 (<http://igsceb.jpl.nasa.gov>). С этого же года МСВЗ начала использовать данные GPS для вывода параметров вращения Земли (ПВЗ) [17].

Говоря о методах определения пространственного положения с применением GPS, следует отметить **технология создания активных геодезических сетей**. В таких сетях на каждой станции с точно известными координатами (базовой станции) установлены постоянно работающие приемники GPS. Данные их наблюдений и координаты доступны по линиям связи, при этом точные измерения координат можно выполнять только одним приемником. Данные со станций активной сети могут использоваться для мониторинга различных природных явлений,

точной навигации и т. п. В США построение активной сети CORS (Continuously Operating Reference Stations) было начато в 1995 г. Национальной геодезической службой. В настоящее время сеть насчитывает более 370 станций (www.ngs.noaa.gov/CORS). Подобные сети меньших размеров создаются в Англии, Канаде, России, Японии и других странах. Дальнейшее повышение точности построения сетей многие ученые связывают с разработкой теории моделирования условий наблюдений [9].

Отмена с 1 мая 2000 г. режима «селективного доступа» (Selective Availability) привела не только к повышению точности абсолютного метода определения положений (средняя квадратическая ошибка уменьшилась примерно со 100 до 15 м при вероятности 95%), но и точности относительного метода. Это отмечается в последних работах, посвященных мониторингу с применением кинематики в режиме реального времени, например, мониторингу подвесных мостов [18].

Применение GPS в различных областях деятельности объясняется высокой точностью и

Результаты деятельности МГС

Таблица 1

Вид информации	Точность данных	Задержка	Частота обновления
Эфемериды спутников GPS и поправки часов спутников:			
— предсказанные (сверхбыстрые)	25 см / 7 нс	реальное время	2 раза в сутки
— быстрые	5 см / 0,2 нс	17 ч	ежесуточно
— окончательные	<5 см / 0,1 нс	≈13 суток	еженедельно
Эфемериды спутников ГЛОНАСС (окончательные данные)	30 см	4 недели	еженедельно
Параметры вращения Земли ($x_n, y_n / LOD^*$):			
— быстрые данные	$(0,2'' / 0,03 \text{ с}) \cdot 10^{-3}$	17 ч	ежесуточно
— окончательные данные	$(0,1'' / 0,02 \text{ с}) \cdot 10^{-3}$	≈13 суток	ежесуточно
Координаты станций в ITRF (в плане / по высоте)	3 мм / 6 мм	12 суток	еженедельно
Скорости движений в ITRF (в плане / по высоте)	2 мм / 3 мм за год	12 суток	еженедельно
Тропосферная зенитная задержка на каждые 2 ч	4 мм	4 недели	еженедельно

* — LOD (Length of Day) — отличие продолжительности суток от номинального значения

быстротой наблюдений. Обычная точность измерений коротких базовых линий (примерно до 30–50 км) двухчастотными приемниками GPS характеризуется следующими средними квадратическими погрешностями определения планового положения:

— в статике — $2-3 \text{ мм} + 0,5 \cdot D \cdot 10^{-6}$ (для линии в 10 км погрешность равна 7–8 мм);

— в кинематике — $10 \text{ м} + 2 \cdot D \cdot 10^{-6}$.

Точности по высоте ниже в 2–3 раза.

При использовании эфемерид МГС возможно достижение точностей 10^{-7} – 10^{-9} на линиях в тысячи километров.

По данным, приведенным в табл. 2, составленной И. Боком и его коллегами [9], можно проследить, как за последние 20 лет повышалась точность спутниковых определений пространственных координат.

Из таблицы видно, насколько важными факторами являются качество эфемерид спутников (и параметров их часов), точность опорной сети и качество моделирования ошибок (тропосферной задержки, многопутности, фазовых центров антенн).

Эфемериды МГС даются в формате SP3. Точные эфемериды состоят из положений спутников и их скоростей через рав-

но отстоящие эпохи. Обычный интервал передачи данных составляет 15 мин. С 1985 г. Национальная геодезическая служба США (NGS) распространяет точные GPS-орбиты в особых ASCII-форматах SP1 и SP2 и их бинарных аналогах ECF1 и ECF2. Позднее ECF2 был модифицирован в формат EF13. Форматы SP1 и ECF1 содержат данные о координатах и скоростях, а SP2 и ECF2 — только о координатах. Это сокращает объем хранимых данных почти вдвое, поскольку скорости можно вычислить через положения спутников. В 1989 г. NGS решила добавить к орбитальной информации поправки часов спутников. Более того, второе поколение форматов может содержать до 85 спутников (GPS и других) вместо 35 спутников для форматов первого поколения. Соответствующий ASCII-формат обозначается как SP3, а его бинарный аналог — ECF3 или EF18 (в модифицированной версии). Большой вклад в работы по совершенствованию форматов и интерполированию эфемерид внес Б. Ремонди [10].

Повышение точности эфемерид сделало возможным применение **абсолютного метода позиционирования по фазе несущей волны с разрешением неоднозначности**, который

разработан в Лаборатории реактивного движения (США) и в суточном сеансе обеспечивает точность 2 см [19].

Совершенствование математических моделей тропосферной задержки и способов определения метеорологических параметров в работах Х. Хопфилд, Ю. Саастамойнена, А. Найелла и многих других привело к появлению GPS-метеорологии.

Спутниковые методы определения координат нашли применение как в традиционных геодезических работах, так и во многих других приложениях, например:

— геодинамика (от локального до глобального масштабов, включая движение тектонических плит, определение ПВЗ и т. п.);

— геология (поиск и разведка месторождений);

— гляциология (движение ледников в Гренландии и Антарктиде);

— гидрология (съемки шельфа, акваторий портов, дна рек и т. п.);

— городской и земельный кадастр;

— службы времени и частоты; — строительство различных сооружений (автодороги, железные дороги, электростанции, морские платформы и т. п.);

— археология (привязка раскопок к единой системе координат);

Динамика повышения точности определения пространственных координат с помощью спутниковых методов

Таблица 2

Год	Относительная ошибка, b	Источники улучшения	Основные источники ошибок
1983	10^{-6}	геодезические приемники (измерение фазы несущей волны)	атмосферная рефракция, ошибки орбит
1986	10^{-7}	двухчастотные измерения фазы	тропосферная рефракция, ошибки орбит
1989	10^{-8}	Международная сеть пунктов слежения (CIGNET)	тропосферная рефракция, ошибки орбит
1992	$5 \cdot 10^{-9}$	улучшение глобального слежения за спутниками (МГС)	тропосферная рефракция, ошибки орбит и фазовых центров
1997	10^{-9}	повышение точности орбит, моделирование тропосферы и фазовых центров антенн	ошибки глобальной системы отсчета, специфические ошибки пунктов, атмосферные градиенты

Примечание. Средняя квадратическая ошибка в плане: $M_b \text{ (мм)} = [(0,1 - 1,0 \text{ мм})^2 + (2 \cdot b \cdot D)^2]^{1/2}$, где D — расстояние между пунктами

— биология (контроль поведения животных);

— сельское хозяйство (мониторинг сельхозугодий, управление механизмами);

— навигация и управление транспортными средствами с определением их местоположения на электронных картах.

В последние годы значительно возрос интерес к применению спутниковых технологий для мониторинга механизмов, машин и других объектов, включая людей. Появились службы, которые специализируются на определении местоположения (Location based service, LBS). Спутниковые методы объединяются с инерциальными системами, псевдолитами — передатчиками с фиксированным местоположением, имитирующими спутниковые сигналы, и другими средствами определения местоположения, что повышает их эффективность.

Подводя итог, отметим, что спутниковые технологии развиваются быстрыми темпами по нескольким направлениям:

— совершенствование работы непосредственно систем и спутников;

— разработка теории методов глобального спутникового позиционирования (общая теория методов относительных определений, теория кинематических съемок с инициализацией на земле и в движении и т. п.);

— разработка миниатюрных приемников, игнорирующих режим шифрования точного P-кода («Anti-Spoofing») [20];

— разработка форматов для точных эфемерид [21];

— стандартизация моделей геодинимических явлений (координатных систем с временной эволюцией) [22];

— расширение областей применения спутниковых методов (определение ПВЗ, геодинимика, метеорология, мониторинг ионосферы);

— создание специальных

служб и сетей (МГС, активные сети).

В заключение следует отметить, что успешное внедрение спутниковых методов в геодезическое производство невозможно без соответствующего учебно-информационного обеспечения — издания соответствующей литературы, в том числе учебников.

▼ Список литературы

1. Leick A. GPS Satellite Surveying. — New York: A Wiley-Interscience Publication, 1995. — 560 p.

2. Bock Y., Abbot R. I., Counselman III C. C. et al. Establishment of three-dimensional geodetic control by interferometry with the Global Positioning System // J. of Geophys. Res., 1985, V. 90 (B9). — P. 7689–7703.

3. Ruland R., Leick A. Application of GPS to a high precision engineering survey network. // Proc. Pos. with GPS, 1. — 1985 — P. 483–493.

4. Engelis T., Rapp R., Bock Y. Measuring orthometric height differences with GPS and gravity data // Manuscripta Geodaetica, Vol. 10, No. 3, 1985. — P. 187–194.

5. Ladd J.W., Counselman III C.C. and Gourevitch S.A. The Macrometer II dual-band interferometer surveyor // Proc. Pos. with GPS, Vol. 1. — P. 175–180.

6. Remondi B. Global Positioning System carrier phase: description and use. // Bull. Geodesique, 59 (4). — P. 361–377.

7. Mader G.L. Dynamic positioning using GPS carrier phase measurements. // Manuscripta geodaetica, 1986, Vol. 11. — P. 272–277.

8. Hofmann-Wellenhof B., Remondi B.W. The Antenna exchange: One aspect of high-precision GPS kinematic survey. // GPS-Techn. Appl. Geod. and Surveying. Proc. Int. GPS-workshop Darmstadt, Apr. 10–13, 1988, — Berlin etc., 1988. — P. 261–277.

9. GPS for geodesy. Teunissen P.J.G., Kleusberg A. (Eds.). — Berlin: Springer, 1998. — 650 p.

10. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System theory and practice. — Fifth, revised edition. — Wien, New-York: Springer-Verlag, 2001. — 382 p.

11. Lichten S.M., Border J.S. Strategies for high precision GPS orbit determination. // J. of Geophysical Research, 92 (B12), 1987. — P. 12 751–12 762.

12. Dale S.A., Kitching I.D., Daly P. Position-Fixing Using the USSR's GLONASS C/A Code. // IEEE Aerosp. and Electron. Syst. Mag., 1989, Vol. 4, No. 2. — P. 3–10.

13. Leick A., Beser J., Mader G. Processing GLONASS Carrier Phase Observations. Theory and First Experience. // Proc. ION-GPS 95, Institute of Navigation. — P. 1041–1047.

14. Wang J. An approach to GLONASS ambiguity resolution // J. of Geodesy, Vol. 74, No. 5, 2000. — P. 421–430.

15. Совместное использование GPS и ГЛОНАСС: оценка точности различных способов установления связи между ПЗ-90 и WGS-84 / Галазин В.Ф., Базлов Ю.А., Каплан Б.Л., Максимов В.Г. // «Навигация-97». Сб. трудов второй Межд. конф. «Планирование глобальной радионавигации», 24–26 июня 1997 г. Том I, II. — М.: НТЦ «Интернавигация». — 1997. — С. 299–310.

16. Brown A. Extended differential GPS. // Navigation Vol. 36, No. 3. — 1989. — P. 265–285.

17. IERS Technical Note 21. D.D. McCarthy (ed.). IERS Conventions (1996). — Paris: Central Bureau of IERS — Observatoire de Paris, July 1996. — 95 p.

18. Kai-yuen Wong, King-leung Man and Wai-yee Chan. Monitoring Hong Kong's bridges // GPS World, Vol. 12, No. 7, 2001. — P. 10–17.

19. Zumberge J.F., Heflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M. and Webb F.H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. // J. of Geoph. Research, Vol. 102, No B3, 1997. — P. 5005–5017.

20. Langley R.B. Smaller and smaller. The evolution of the GPS receiver // GPS World, Vol. 11, No. 4, 2000. — P. 54–58.

21. Gurtner W. RINEX: The receiver-independent exchange format // GPS World, 1994, Vol. 5, No. 7. — P. 48–52.

22. IERS Technical Note 27. The International Terrestrial Reference Frame (ITRF97) / Boucher C., Altamimi Z., Sillard P. — Paris: Central Bureau of IERS — Observatoire de Paris, May 1999. — 192 p.