

3. МЕТОДЫ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

3.1. Решение геодезических задач по наблюдениям искусственного спутника Земли

Существуют два основных метода использования ИСЗ в геодезии: *геометрический* и *динамический*.

В *геометрическом* методе осуществляется построение пространственных геодезических сетей с помощью синхронных (одновременных) наблюдений ИСЗ с исходных и определяемых пунктов земной поверхности, при которых точное знание законов движения спутника не обязательно, то есть ИСЗ используется как высокая визирная цель. Пусть векторы \mathbf{R}_A и \mathbf{R}_B определяют положение соответственно исходного (A) и определяемого (B) пунктов наблюдений в общеземной системе координат (X, Y, Z) , а векторы ρ_A и ρ_B в этой же системе координат – измеренные положения спутника (m) на орбите относительно точек наблюдений (рис. 3.1).

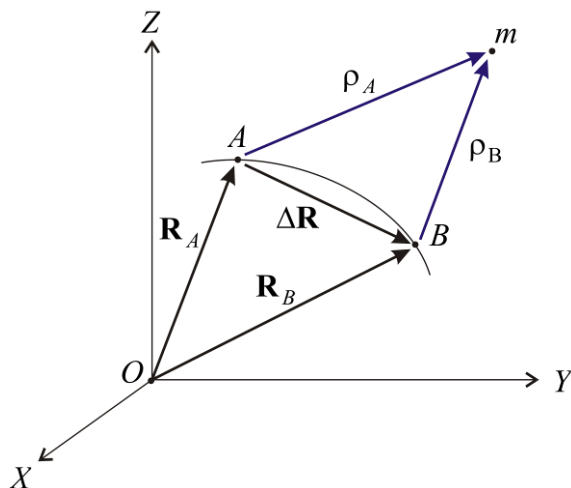


Рис. 3.1. Геометрический метод космической геодезии

Тогда уравнение, определяющее связь измеренных и определяемых величин, имеет вид

$$\Delta \mathbf{R} = \mathbf{R}_B - \mathbf{R}_A = \boldsymbol{\rho}_A - \boldsymbol{\rho}_B. \quad (3.1)$$

Из (3.1) следует, что если известны координаты одного пункта, то по результатам измерений векторов $\boldsymbol{\rho}_A$ и $\boldsymbol{\rho}_B$ можно вычислить координаты второго в системе исходного пункта, при этом не нужно знать теории движения ИСЗ.

Динамический метод космической геодезии дает возможность определить координаты пунктов в абсолютной системе, отнесенной к центру масс, параметры гравитационного поля Земли, а также уточнить элементы орбиты спутника. Частным случаем динамического метода является *орбитальный* метод, когда совместно определяются только элементы орбиты и координаты пунктов наблюдений, при этом требуется знание адекватной модели движения ИСЗ.

В общем виде геоцентрический радиус-вектор \mathbf{r} ИСЗ представляет собой сложную функцию элементов орбиты \mathbf{E} , параметров гравитационного поля Земли \mathbf{G} и времени t :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{E}, \mathbf{G}, t). \quad (3.2)$$

Если измеренными величинами в общем случае можно считать топоцентрический радиус-вектор $\boldsymbol{\rho}$, то его связь с геоцентрическим положением спутника \mathbf{r} определится известным выражением

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r}(\mathbf{E}, \mathbf{G}, t) - \mathbf{R} = \mathbf{r}(\mathbf{E}_0 + \Delta \mathbf{E}, \mathbf{G}_0 + \Delta \mathbf{G}, t) - (\mathbf{R}_0 + \Delta \mathbf{R}). \quad (3.3)$$

Здесь \mathbf{R} – геоцентрический радиус-вектор пункта измерений на поверхности Земли; $\mathbf{E}_0, \mathbf{G}_0, \mathbf{R}_0$ – приближенные значения соответствующих величин.

После линеаризации (3.3), полагая безошибочными моменты регистрации времени t , имеем систему уравнений поправок измерений

$$\frac{d\boldsymbol{\rho}}{d\mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{d\mathbf{E}} \Delta \mathbf{E} + \frac{d\boldsymbol{\rho}}{d\mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{d\mathbf{G}} \Delta \mathbf{G} - \frac{d\boldsymbol{\rho}}{d\mathbf{R}} \Delta \mathbf{R} + (\boldsymbol{\rho}_0 - \boldsymbol{\rho}) = \mathbf{V}, \quad (3.4)$$

где ΔE , ΔG , ΔR – поправки к приближенным элементам орбиты, параметрам гравитационного поля и координатам пунктов наблюдений соответственно;

ρ_0, ρ_i – векторы приближенных и измеренных величин;

V – вектор поправок к результатам измерений.

Из решения системы уравнений (3.4) по способу наименьших квадратов находятся искомые поправки ΔE , ΔG , ΔR .

3.2. Методы наблюдений искусственного спутника Земли

Методы наблюдений искусственных спутников Земли можно разделить на две группы: *оптические* и *радиоэлектронные*.

К *оптическим* наблюдениям относятся визуальные, фотографические, фотоэлектрические и лазерные наблюдения. Точность визуальных наблюдений недостаточна для использования их в геодезических целях. Фотографические наблюдения ИСЗ имели широкое распространение в 1960-70 гг. При этом наблюдения спутника привязывались к шкале времени, а его положение на снимке – к опорным звездам в системе некоторого фундаментального каталога. Однако турбулентные процессы, происходящие в атмосфере, не позволяли получить из фотографических наблюдений направления с точностью, превышающей 0,4–0,5", поэтому в оптическом диапазоне стали выполняться только лазерные измерения дальности.

Интерференционные, доплеровские и радиодальномерные измерения относят ко второй группе – *радиоэлектронной*.

Наибольшее распространение в геодезической практике из различного рода интерференционных систем получила длиннобазисная радиоинтерферометрия. Здесь в качестве радиоисточника используются удаленные от Земли на сотни световых лет космические радиоисточники – квазары.

В доплеровском методе измеряют разность частоты, принимаемой на станции, и стандарта частоты. Так, если передатчик на борту ИСЗ излучает сигнал с частотой колебания f , то наземный приемник зарегистрирует излучение с частотой f_E , смещенной на величину

$$\Delta f_D = f_E - f = -\frac{f V_r}{c}, \quad (3.5)$$

где c – скорость распространения радиоволн; V_r – радиальная скорость спутника. При выполнении доплеровских измерений производится подсчет числа n периодов доплеровской частоты за промежуток времени между излучением t_1 и приемом t_2 сигнала. Тогда

$$\Delta f_D = -\frac{n}{t_2 - t_1},$$

и на основании (3.7) имеем

$$V_r = \frac{cn}{f(t_2 - t_1)}. \quad (3.6)$$

Доплеровские системы позволяют получать радиальную составляющую топоцентрической скорости ИСЗ с погрешностью не большей, чем 0,01 м/с.

При выполнении радиодальномерных измерений импульсный передатчик спутника принимает посылаемый наземной станцией сигнал, модулированный по фазе, и ретранслирует его как фазовую модуляцию с измененной несущей частотой. На наземной станции фазометром измеряют фазовый сдвиг модуляции и по нему вычисляют расстояние.

К классу радиодальномерных измерений относится спутниковое нивелирование. Спутниковое нивелирование (спутниковая альтиметрия) используется с целью определения высот геоида, получения информации о топографии Мирового океана, определения (уточнения) положения центра масс Земли и в других случаях. Метод спутникового нивелирования состоит в определении расстояний от спутника до подстилающей поверхности (вода, суша) по измеренным разностям времени между моментами посылки и возврата вертикально направленного радиоимпульса.

3.3. Современные методы космической геодезии

К современным методам космической геодезии относятся (рис. 3.2):

– лазерные наблюдения спутников и Луны;

- спутниковая альтиметрия;
- радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ);
- доплеровские наблюдения (система DORIS);
- спутниковая градиентометрия и системы «спутник – спутник»;
- глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС – ГЛОНАСС, GPS).

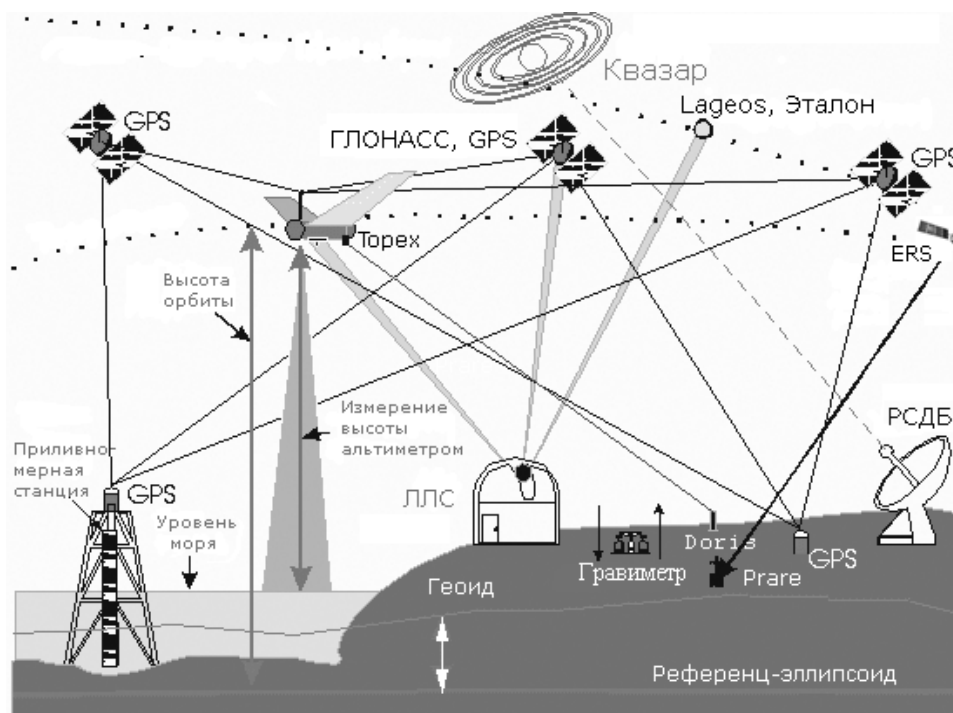


Рис. 3.2. Современные методы космической геодезии

Лазерная локация искусственных спутников Земли. Лазерная локация искусственных спутников Земли – это измерение точных расстояний между лазерным телескопом (дальномером), расположенным на поверхности Земли, и отражателями на поверхности пролетающего спутника. С наземного пункта посылаются ультракороткие импульсы в направлении на ИСЗ. Зондирующий импульс запускает счетчик интервалов времени. Затем на этом же пункте регистрируется отраженный от спутника сигнал. Отраженный импульс регистрируется высокочувствительным детектором (отраженный импульс очень слабый, иногда даже может содержать всего один фотон). Вернувшийся сигнал останавливает счетчик, и записывается

время прохождения сигнала τ «туда» и «обратно», по которому можно вычислить двойные дальности (так называемые *two-way ranges*). Технические аспекты работы спутниковых лазерных дальномеров подробно рассмотрены в работе [11].

Поскольку скорость распространения света известна, то можно вычислить пройденное светом расстояние. В силу влияния тропосферы, релятивистских и других эффектов необходимо внести соответствующие поправки в измеренные дальности. В общем виде уравнение наблюдений лазерной локации имеет вид

$$\rho = c \cdot \tau / 2 + \Delta\rho_{tropo} + \Delta\rho_{centr} + \Delta\rho_{kalibr} + \Delta\rho_{rel} + \Delta\rho_{br}, \quad (3.7)$$

где τ – время прохождения лазерного импульса прямо и обратно;

$\Delta\rho_{centr}$ – поправка за несовпадение центра масс спутника, к которому относятся получаемые из интегрирования координаты, и отражателей (данная величина зависит от наблюдаемого спутника);

$\Delta\rho_{kalibr}$ – поправка за калибровку дальномера;

$c = 299\,792\,458$ м/с – скорость света [12];

$\Delta\rho_{tropo}$ – поправка за влияние тропосферы;

$\Delta\rho_{rel}$ – поправка за релятивистские эффекты (задержка Шапиро);

$\Delta\rho_{rb}$ – поправка за систематическую погрешность лазерного дальномера (так называемая *range bias*), которая является уникальной для каждой комбинации «пункт – спутник».

Скорость света не является постоянной при прохождении луча через атмосферу, и это вносит наибольшую ошибку в измерения. Тем не менее, эта погрешность для волн оптического диапазона значительно меньше, чем для волн радиодиапазона.

Первые лазерные наблюдения ИСЗ выполнены в 1965 г. (ИСЗ BEACON-B), их точность составила несколько метров [13]. Наиболее активное развитие лазерная локация ИСЗ получила в 1970-90-х гг. В 1975–1976 гг. осуществлен запуск геодезических спутников правильной сферической формы (Starlette и LAGEOS-1 (Laser GEODynamics Satellite)), специально разработанных для лазерной локации, что позволило определять орбиты

этих спутников сначала с дециметровой, а затем и с сантиметровой точностью. К концу 1980-х гг. по лазерным наблюдениям ИСЗ получены значительные результаты, превосходящие по точности другие измерительные средства. К середине 1990-х гг. точность измерения дальностей достигает субсантиметровой точности [13]. На орбиту выводятся новые спутники, предназначенные для лазерной локации: AJISAI (1986 г.), Эталон-1 и Эталон-2 (1989 г.), LAGEOS-2 (1992 г.), Stella (1993 г.).

Для координации работ международной сети станций лазерной локации спутников с целью выполнения геофизических исследований и установления высокоточной земной системы отсчета Международной Ассоциацией Геодезии (International Association of Geodesy – IAG) в 1998 г. образована Международная Служба Лазерной Локации (International Laser Ranging Service – ILRS) [14]. Международная Служба Лазерной Локации насчитывает 52 станции, из них 8 расположены на территории Российской Федерации (рис. 3.3) [15].

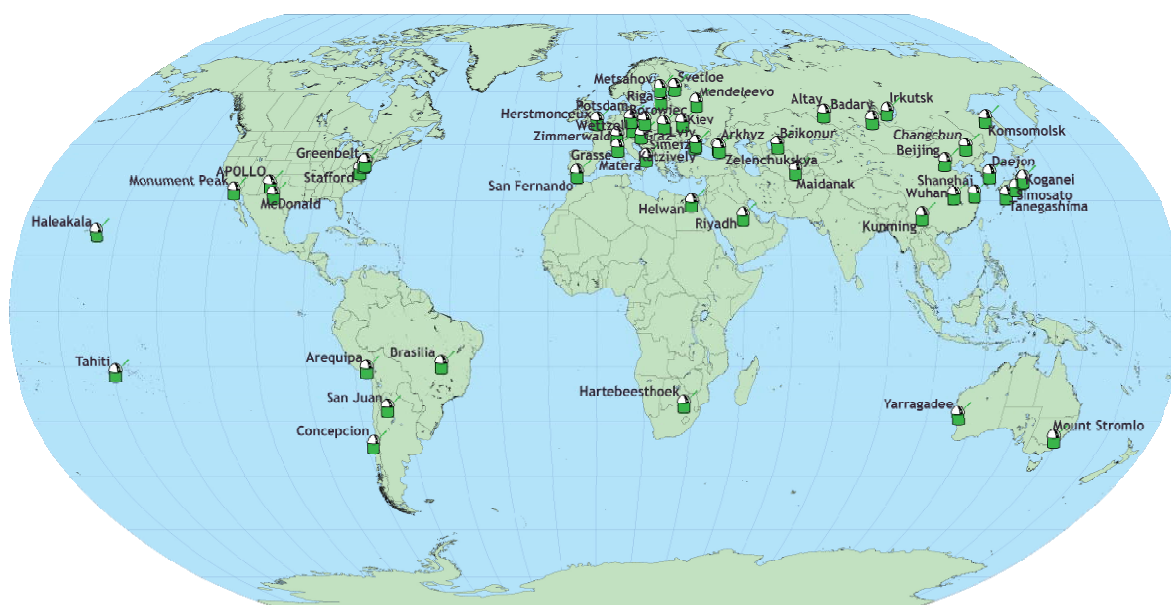


Рис. 3.3. Станции Международной Службы Лазерной Локации [15]

В настоящее время станциями ILRS наблюдается около 30 спутников, оборудованных лазерными отражателями. Среди них не только спутники, непосредственно предназначенные для решения задач геодезии, геофизи-

ки и геодинамики, но и научно-исследовательские спутники, для которых нужны определения точных элементов орбит. Средствами Службы производятся мониторинг и контроль орбит космических градиентометрических комплексов и систем «спутник – спутник» (GOCE, GRACE, CHAMP), выводимых на орбиту спутников навигационных систем ГЛОНАСС, Galileo, QZSS, Compass, а также различных спутников дистанционного зондирования Земли. В настоящий момент орбитальная группировка «лазерных геодезических» ИСЗ (т. е. спутников сферической формы, специально разработанных для использования в лазерных наблюдениях) насчитывает 9 спутников (Starlette, LAGEOS-1, LAGEOS-2, AJISAI, Эталон-1, Эталон-2, Stella, Larets, LARES, БЛИЦ) с различными высотами и углами наклона орбит.

Отечественные спутники Эталон-1 и Эталон-2 выведены на орбиту в 1989 г. и имеют самую большую высоту орбиты (почти 20 000 км). Одна из основных целей запуска этих спутников – изучение негравитационных эффектов, воздействующих на спутники системы ГЛОНАСС [16]. В то же время эти спутники используются, благодаря стабильности их орбиты, для определения вариаций продолжительности суток.

Искусственный спутник БЛИЦ, запущенный в 2009 г., был разработан в ОАО «Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения"» для исследования возможностей применения линзы Люнеберга в качестве отражателя для лазерной локации ИСЗ с субмиллиметровой точностью измерения дальностей [17]. Спутник состоял из внутреннего стеклянного шара (радиусом 53,52 мм) и внешней стеклянной оболочки (радиусом 85,11 мм), включающей две равные полусферы, одна из которых прозрачна, а другая имела алюминиевое отражающее покрытие. Обычно в качестве отражающих элементов применяются уголковые отражатели, расположенные равномерно по всему спутнику (например, Эталон-1) или собранные в панели (ГЛОНАСС и GPS). Все спутники, в конструкции которых использованы уголковые отражатели, имеют ошибку цели, то есть смещение центра отражения лазерного импульса относительно центра масс спутника в зависимости от угла прихода лазерного излучения на отражатель, и ненулевую сигнатуру (удлинение отраженного импульса и искажение его формы). Эти факторы препятствуют достижению

субмиллиметровой точности измерения дальностей. ИСЗ БЛИЦ имел практически нулевую ошибку цели и нулевую сигнатуру. Поэтому прецизионная привязка центра оптического отражения к центру масс спутника осуществлялась с погрешностью менее 100 мкм во всех условиях космического полета при произвольных рабочих углах прихода излучения на отражатель. ИСЗ БЛИЦ прекратил свое существование 22 января 2013 г. после столкновения с фрагментом космического мусора [18].

Первая в России наземная оптико-лазерная система, где установлено два телескопа траекторных измерений, расположена на Алтае. Дальность действия лазерного луча – от 500 до 40 000 км. Точность координат обнаруженного космического объекта – до 1 см. И целью их будут спутники, расположенные на более высоких орбитах. Единственным ближайшим аналогом алтайскому центру слежения будет американский центр спутникового слежения на острове Мауи (Гавайи), где стоит несколько телескопов, самый большой из которых имеет диаметр 3,5 м.

Наиболее существенным недостатком метода лазерной локации спутников является его зависимость от погоды, поскольку для оптического диапазона электромагнитного излучения облачный покров является непреодолимым препятствием.

Радарные системы не зависят от погоды; используемые длины волн – сантиметрового и дециметрового диапазона. Время распространения значительно зависит от влияния рефракции радиоволн в атмосфере. Различают однонаправленный и двунаправленный способы измерений расстояний. Лучшие современные стационарные лазерные дальномерные системы обеспечивают среднюю квадратическую погрешность одного выстрела около 10 мм, а для нормального места – 2-3 мм. Эти характеристики относятся к спутникам, удаленным примерно на 6 000 км (Lageos, Эталон). Этот уровень точности невозможно выдерживать для более далеких спутников из-за слабого сигнала, а для более близких спутников – из-за локальных гравитационных воздействий.

Спутниковая альтиметрия. Спутниковая альтиметрия – это метод измерения расстояния между спутником и поверхностью океана с помощью альтиметра. При этом пучок света или монохроматический луч отражается от поверхности Земли и по времени его прохождения вычисля-

ется расстояние. Спутниковая альтиметрия – первый способ измерений «спутник – земля». Для этого используется бортовой радиовысотомер – радарный альтиметр [19]. Базовых станций на Земле не требуется.

Радиовысотомер осуществляет радиолокационное зондирование земной поверхности по нормали. Отраженный сигнал принимается на борту спутника. Высота спутника над морской поверхностью определяется на основе соотношения:

$$h = 1/2 c \Delta t, \quad (3.8)$$

где c – скорость света;

Δt – задержка времени приема отраженного сигнала.

Если высота орбиты спутника над эллипсоидом h известна, то появляется принципиальная возможность получения высот геоида над отсчетным эллипсоидом:

$$\zeta = H - h - \delta h_g - (\delta h_T + \delta h_A + \delta h_B + \delta h_H), \quad (3.9)$$

где ζ – высота геоида над отсчетным эллипсоидом;

H – геодезическая высота спутника над отсчетным эллипсоидом;

h – измеренная альтиметром высота ИСЗ над морем определяется по формуле (3.8);

δh_g – отклонение морской топографической поверхности от геоида;

δh_T – приливная поправка;

δh_A – влияние атмосферной рефракции;

δh_B – изменение морской топографической поверхности, обусловленное атмосферным давлением;

δh_H – влияние инструментальной погрешности.

К настоящему времени реализовано более 10 национальных и международных проектов в области спутниковой альтиметрии, в том числе отечественный проект ГЕО-ИК.

Метод спутниковой альтиметрии требует точного знания орбитального положения ИСЗ, в первую очередь – его радиальной составляющей.

Спутники GEOS-3 (1975 г.) и SEASAT-1 (1978 г.) – первые спутники, которые несли радарные альтиметры и интенсивно использовались для

геодезических целей. В настоящее время используются системы спутниковой альтиметрии TOPEX-POSEIDON, GFO, JASON-1, JASON-2, ENVISAT, ГЕО-ИК-2, обеспечившие значительный вклад в геодезию, геофизику и океанографию. Первый лазерный альтиметр запущен на спутники ICESAT. В стадии подготовки спутниковая альтиметрия с лазерной системой (ICESat-2 планируется запустить в 2018 г.) [20].

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой. Исследование радиоизлучения от «фиксированных» источников, настолько удаленных, что их собственное движение не может наблюдаться с Земли, позволяет получить базисные линии (расстояния между станциями) очень большой длины и не требует при этом измерений элементов их орбиты. Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой позволяет измерить базисную линию длиной в тысячи километров с точностью до нескольких сантиметров.

Принцип метода основан на том, что сигналы от квазаров σ на антенны радиотелескопов, находящихся друг от друга на большом расстоянии, поступают не одновременно, а с некоторым запаздыванием τ , обусловленным разностью расстояний от базисных пунктов до квазара (рис. 3.4).

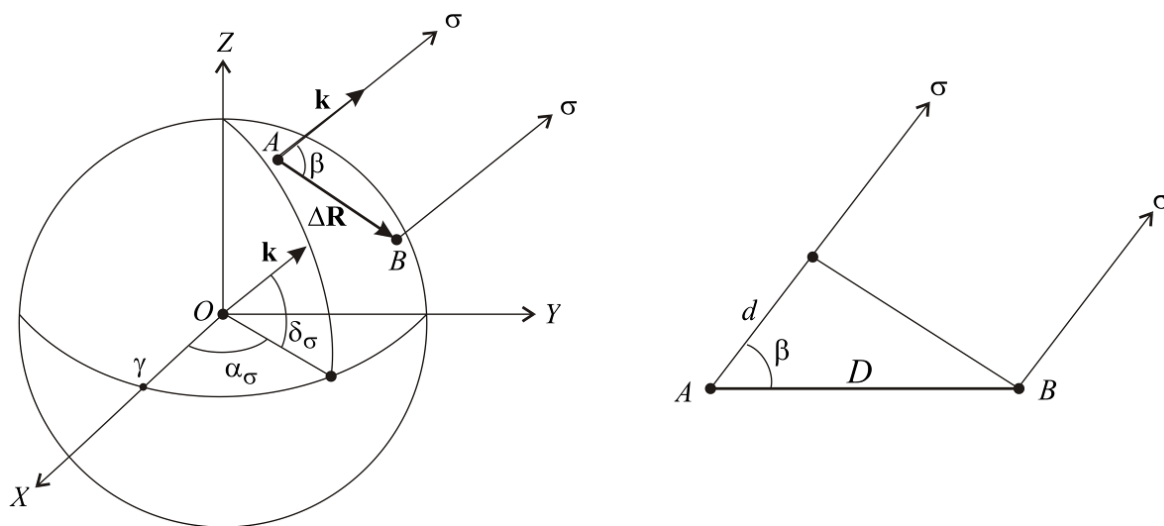


Рис. 3.4. Геометрия длиннобазисной радиоинтерферометрии

Положим $d = \tau c$ – разность расстояний от базовых пунктов A и B до квазара σ ; c – скорость распространения электромагнитных волн; D – ба-

зисная линия; β – угол между базисной линией и направлением на квазар. Тогда, согласно рис. 3.4 имеем

$$c\tau = D \cos\beta. \quad (3.10)$$

Направление на квазар определяется единичным вектором \mathbf{k} , компоненты которого в общеземной системе координат имеют значения

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \cos\delta_\sigma \cos(\alpha_\sigma - S_0) \\ \cos\delta_\sigma \sin(\alpha_\sigma - S_0) \\ \sin\delta_\sigma \end{bmatrix},$$

где $\alpha_\sigma, \delta_\sigma$ – прямое восхождение и склонение квазара; S_0 – истинное звездное время на меридиане Гринвича.

Скалярное произведение вектора положения $\Delta\mathbf{R}$ станции A относительно станции B и вектора \mathbf{k} дает

$$\Delta\mathbf{R} \cdot \mathbf{k} = |\Delta\mathbf{R}| \cos\beta = D \cos\beta,$$

или, с учетом выражения (2.16):

$$\begin{aligned} c\tau = \Delta\mathbf{R} \cdot \mathbf{k} = \\ = \Delta X \cos\delta_\sigma \cos(\alpha_\sigma - S_0) + \Delta Y \cos\delta_\sigma \sin(\alpha_\sigma - S_0) + \Delta Z \sin\delta_\sigma. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) является уравнением связи измеряемой величины τ , координат $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ пункта B относительно пункта A , прямым восхождением α_σ и склонением δ_σ квазара. Следует заметить, что для радиоточников (квазаров) погрешности в прямых восхождениях составляют $\pm 0,000\ 35''$, а в склонениях – $\pm 0,000\ 40''$.

РСДБ позволяет очень жестко определить ориентировку опорной геодезической сети по отношению к небесной сфере. Однако необходимо учитывать погрешности, источниками которых являются движение полюсов, дрейф материков и изменения параметров вращения Земли.

Система «КВАЗАР». Технология радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами широко используется в международных и национальных

проектах. Постоянно действующий радиоинтерферометрический комплекс «КВАЗАР» является в настоящее время базовой системой фундаментального координатно-временного обеспечения России. Созданы три радиоастрономические обсерватории комплекса: в поселке Светлое Ленинградской области, вблизи станицы Зеленчукская Карачаево-Черкесской Республики, в урочище Бадары Республики Бурятия. В результате этого сформировалась РСДБ-сеть с базами $2\ 015 \times 4\ 282 \times 4\ 405$ км. Первичная обработка и анализ данных ведется Центром корреляционной обработки РАН в г. Санкт-Петербурге. Все обсерватории комплекса спроектированы одинаковым образом и в качестве основного элемента включают в себя полноповоротный прецизионный радиотелескоп нового поколения с диаметром зеркала 32 м, оснащенный высокочувствительными криорациометрами в диапазоне волн от 1,35 до 21 см. Существенными элементами каждой обсерватории являются: система частотно-временной синхронизации, состоящая из водородных стандартов времени и частоты с нестабильностью 3×10^{-15} при времени осреднения 1 000 с, хранящих размеры единицы времени (1 с) с частотой (1 Гц); аппаратура привязки шкал времени по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS с точностью не хуже 50 нс; аппаратура контроля и измерения параметров высокостабильных сигналов. Все обсерватории комплекса «КВАЗАР» оснащены ГЛОНАСС/GPS-приемниками, в обсерватории «Бадары» установлена и успешно функционирует система DORIS, а обсерватория «Зеленчукская» недавно оснащена квантово-оптической системой «Сажень-ТМ». Современная аппаратура комплекса обеспечивает получение высокоточных результатов, что подтверждается стабильной повторяемостью и сравнением их с помощью различных средств (РСДБ, GPS/ГЛОНАСС и SLR). По своим параметрам комплекс «КВАЗАР» входит в число первоклассных РСДБ-станций, которых сейчас в мире не более десяти. Всего в международных программах участвуют более 30 станций, расположенных на всех континентах.

Основное назначение комплекса обсерваторий – получение информации о параметрах вращения Земли, координатах пунктов наблюдения, координатах небесного полюса и координатах квазаров. Радиоинтерферометрическая сеть «КВАЗАР» позволяет обеспечить независимость Рос-

сийской Федерации от данных Международных служб (IERS, IVS, IGS, ILRS, IAU) при определении параметров вращения Земли, а также обеспечить этими данными гражданских и военных потребителей. Только РСДБ-метод позволяет определить абсолютную привязку шкалы Всемирного времени UT1, что необходимо для координатно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС.

DORIS. DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) – система спутникового определения параметров орбиты и точного позиционирования по доплеровским спутниковым измерениям – разработана Национальным центром космических исследований в сотрудничестве с Национальным географическим институтом (Франция). DORIS является одним из четырех космических геодезических методов, участвующих в работе глобальной геодезической системы наблюдений (GGOS Global Geodetic Observing System) [21]. В 2003 г. создана Международная Служба International Doris Service (IDS) [22].

Основной целью IDS является предоставление услуг для поддержки геодезической и геофизической научно-исследовательской деятельности через DORIS наблюдательных данных, полученных с достаточной точностью, чтобы удовлетворить целям широкого спектра применений и экспериментов. Из этих данных следующие продукты являются производными:

- координаты и скорости станций слежения;
- геоцентр и масштаб наземных координат;
- высокая точность эфемерид спутников DORIS;
- параметры вращения Земли.

Принцип позиционирования, используемый в DORIS, основан на эффекте Доплера.

Система DORIS включает бортовое оборудование, сеть маяков, оборудованных автономными источниками питания, и Центр контроля и обработки данных в Тулузе (Франция). В системе DORIS измеряется скорость изменения расстояний до спутника по сигналам от плотной сети наземных радиомаяков.

Глобальная наземная сеть состоит из 58 радиомаяков, размещенных в нескольких десятках стран (рис. 3.5), более 20 из них используются в других точных навигационных системах, что позволяет проводить взаимную

калибровку. Два ведущих радиомаяка, один в Тулузе, другой в Куру (Французская Гвиана), связаны с Центром управления и используются для закладки данных на борт КА.



Рис. 3.5. Наземные станции (58 станций) DORIS по состоянию на март 2014 г. [23]

Двухканальный бортовой радиоприемник позволяет проводить фазовые измерения при работе с двумя радиомаяками в зоне видимости и использовать методы дифференциальной навигации для уменьшения погрешностей автономных навигационных определений. Бортовые измерения выполняются каждые 7–10 с на опорной частоте 2 036,25 МГц (в S-диапазоне), дополнительная частота 401,25 МГц используется для устранения ионосферных задержек радиосигнала. Опорная частота генерируется идентичными сверхстабильными наземными генераторами и бортовым хронизатором.

Обработка измерений основана на использовании фильтра Калмана: каждое поступившее измерение включается в обработку в темпе измерений и уточняет вектор состояния, предвычисленный вперед на 10 с.

Система DORIS устанавливалась на спутниках SPOT 2, SPOT 3, TOPEX/POSEIDON, ENVISAT, SPOT 4, SPOT 5. Измерения, записанные на борту и переданные на наземный сегмент, служат для привязки данных ДЗЗ, совершенствования модели внешних сил, действующих на КА, и определения плотности электронов в ионосфере. За время эксплуатации системы накоплен архив данных, позволяющих определять фактическое положение наземных радиомаяков и учитывать динамику смещения их координат.

Полученные данные обрабатываются на Земле, обеспечивая сантиметровую точность определения орбит. Точность определения положения КА вдоль орбиты составляет 1 см, по радиусу-вектору – 5 см [24].

Спутниковая градиентометрия и системы «спутник – спутник».

Технологические достижения в области космических исследований позволили разработать концепции определения гравитационного поля Земли с высоким разрешением [25]:

- наблюдения «спутник – спутник» (измерения расстояний и скорости изменения расстояний между спутниками);
- спутниковая градиентометрия (измерение разности ускорений силы тяжести внутри спутника).

Система «спутник – спутник» (SST – satellite to-satellite). Технология «спутник – спутник» состоит в измерении расстояний и скорости изменения расстояний между спутниками. При этом предусматривается два варианта взаимного расположения спутников: высокий спутник и низкий спутник и два спутника, расположенных на близких орбитах на расстоянии 50–300 км друг от друга (рис. 3.6).

В системе «спутник – спутник» в режиме «высокий – низкий» околоземная орбита низколетящего спутника (НОО) непрерывно отслеживается спутниками, снабженными глобальными системами местоопределения типа GPS/ГЛОНАСС или Galileo. На спутнике НОО устанавливают акселерометр. Негравитационные силы, действующие на низкий спутник, измеряются акселерометрами. Спутник ЛЕО является зондом в гравитационном поле Земли, который можно точно и непрерывно наблюдать. Наблюдаемые 3D ускорения соответствуют гравитационным ускорениям. Тем самым измеряются трехмерные возмущающие ускорения, вызванные

гравитационным полем Земли. Эти ускорения соответствуют первым производным гравитационного потенциала W . Поле силы тяжести выводится путем обращения полученной информации относительно орбиты низкого спутника.

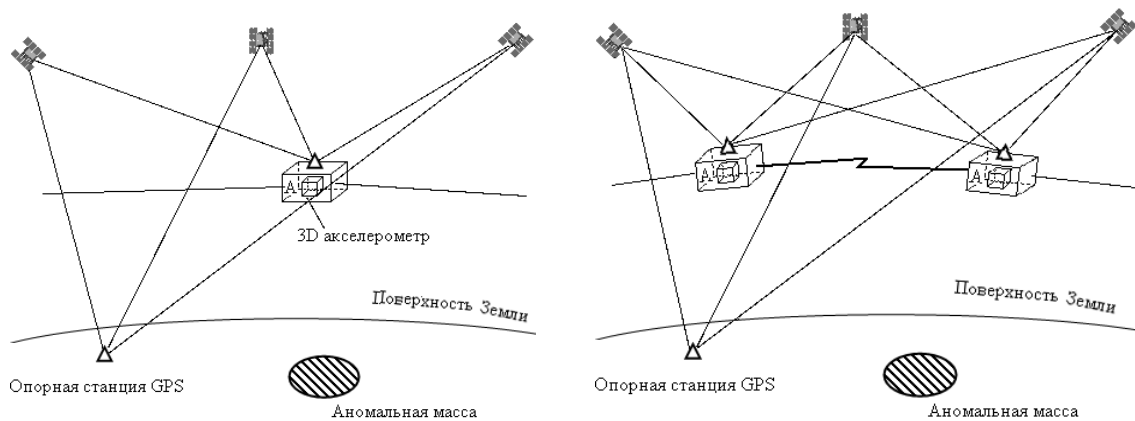


Рис. 3.6. Разные концепции, посвященные гравитационным полевым миссиям: SST-HL, SST-LL, SGG [25]

Система «спутник – спутник» в режиме «высокий – низкий» впервые была применена в программе полета на Луну «Аполлон» для контроля с Земли лунного модуля. Последующий анализ этих данных обнаружил сильные аномалии в гравитационном поле Луны (масконы).

Система «спутник – спутник» SST-HL, из которых один высокий, другой низкий, реализована в проекте CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical and Application). Реализация данного проекта осуществлена Научно-исследовательским центром Потсдама (Geo Forschung Zentrum Potsdam) (Германия).

Спутник CHAMP запущен 15 июля 2000 г. с космодрома Плесецк (Россия). Масса спутника – 522 кг, длина – 8,33 м, период обращения – 93,61 мин. Наклонение $87,3^\circ$, высота в начале – 450 км, в конце – 300 км.

Оборудование: 16-канальный GPS-приемник с многоантенной системой, трехосный акселерометр, лазерные отражатели для локации с Земли, магнетометр, цифровой счетчик дрейфа ионов.

Предусматривает следующие цели:

- изучение глобального поля силы тяжести или конкретнее – уточнение длинноволновой части статического поля и ее временных вариаций (вызванных, например, перераспределениями атмосферных масс, океанической циркуляцией, изменением уровня моря за счет таяния полярного льда);

- изучение глобального магнитного поля или конкретнее – уточнение основного магнитного поля и магнитного поля земной коры и их пространственно-временных вариаций;

- профилирование ионосферы и тропосферы или более определенно – уточнение атмосферы с точки зрения ее температуры, содержания водяных паров и электронной структуры по данным о преломлении сигналов GPS.

Первоначально ожидалось, что CHAMP проработает от четырех до пяти лет, но благодаря своей устойчивой конструкции даже при низкой траектории полета миссия просуществовала в два раза дольше. Проект был использован для измерения гравиметрического поля Земли, магнитного поля Земли и для оптического зондирования атмосферы.

Для обеих концепций КА на низких орбитах являются сенсорами гравитационного поля Земли. Для измерения относительных скоростей могут использоваться однонаправленные и двунаправленные межспутниковые системы. Нерегулярные изменения этой скорости содержат гравитационную информацию. Чем ниже орбита спутника, тем более отчетливой и детальной становится информация.

В системе «спутник – спутник» в режиме «низкий – низкий» два спутника двигаются по одной и той же орбите друг за другом, но отделены несколькими сотнями километров (около 220 км). Расстояния между ними и скорости изменения этих расстояний измеряются с предельно возможной точностью (до 10 микрон!). Орбита каждого спутника подвержена индивидуальному влиянию возмущающих ускорений, которые соответствуют первым производным гравитационного потенциала. Информация от обоих спутников дает разности ускорений. Кроме того, положения спутников НОО определяются другими спутниками с GPS на борту. Так что режим «высокий – низкий» также, по существу, имеет место. Эффект

действия на спутник негравитационных сил, например, за счет аэродинамического сопротивления, должен быть компенсирован или измерен акселерометром. Спутники собирают информацию, выполняя тщательно выверенные маневры на орбите. В то время как один спутник покачивается и медленно перемещается в неровном гравитационном поле Земли, второй, следующий на расстоянии 220 км, измеряет колебания в разделяющем их расстоянии вплоть до микрона. Именно изменения расстояния и описывают природу и масштабы гравитационных аномалий, над которыми пролетают спутники.

Система «спутник – спутник» SST-LL, в которой оба спутника низкие, реализована в проекте GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). GRACE – совместный проект Американского национального управления по авиации и космонавтике (NASA) и Немецкого центра авиационных и космических полетов (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR).

Основными целями проекта являются:

- определение глобального гравитационного поля Земли с высокой разрешающей способностью;
- изучение вариации силы тяжести во времени;
- изучение с помощью GPS-измерений явлений преломления в ионосфере и тропосфере путем детального определения электронного содержания.

Спутники запущены 17 марта 2002 г. с космодрома Плесецк (Россия). Деятельность миссии GRACE основана на работе двух абсолютно идентичных спутников, находящихся на расстоянии 220 км друг от друга, на полярной орбите высотой около 500 км над Землей. При пролете над гравитационными аномалиями это расстояние изменяется, поскольку спутники сильнее или слабее притягиваются Землей. Например, если летящий впереди спутник находится над районом с более высокой гравитацией, то его «притянет» к Земле немного сильнее, чем другой аппарат. И вот это расстояние, которое отражает изменение в силе притяжения над данным участком земной поверхности, может быть измерено. На спутниках установлены микроволновые дальнометры с точностью измерений вплоть до одного микрометра. Именно высокая точность измерения расстояния ме-

жду спутниками позволяет улавливать малейшие изменения в силе притяжения [26].

Оборудование: высокостабильный генератор частоты, обслуживающий дальномерную систему KBR, GPS-приемник, цифровая звездная камера, уголковые отражатели для лазерной локации с Земли.

Спутниковая градиентометрия (SGG). Для реализации принципа спутниковой градиентометрии были разработаны градиентометры различного типа: комбинации акселерометров, криогенные градиентометры, градиентометры ротационного типа.

Спутниковая градиентометрическая аппаратура не связана с Землей, и поэтому измеряет одну или несколько компонент тензора вторых производных потенциала силы притяжения $V(x, y, z)$ в осях (x, y, z) , связанных со спутником:

$$\begin{pmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Если полный тензор измерен на орбите, то гравитационное ускорение \vec{F} в точке P получается путем интегрирования по пути PP_0 :

$$\text{grad}V = \vec{F} = \vec{F}_0 + \int_{t_0}^t V\dot{r}dt, \quad (3.13)$$

где \vec{F}_0 – ускорение в начальной точке P_0 в момент t_0 . Для вычисления $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ необходимо знать путь $r = r(t)$. Высокие требования к точности градиентометрических измерений распространяются и на точность определения координат спутника.

17 марта 2009 г. с российского космодрома Плесецк стартовала ракета-носитель «Рокот» с европейским спутником GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer – «Исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений») на борту. Аппарат GOCE – совместный проект многолетней работы исследователей и инженеров из

45 европейских компаний (Европейское космическое агентство) – предназначен для исследования гравитационного поля Земли. Для этого на спутнике установлен градиометр, который будет измерять гравитационное поле с высочайшей точностью. Точность измерений обеспечивают шесть необычайно чувствительных акселерометров, способных почувствовать отклонение в силе притяжения в одну десятитриллионную от нормального уровня. Помимо градиометра, GOCE оснащен навигационным прибором, принимающим сигналы GPS для точного позиционирования аппарата над поверхностью Земли, а лазерный отражатель позволит с высокой точностью отслеживать движение спутника при помощи наземных лазеров (рис. 3.7). Управление GOCE осуществляется из Центра управления в немецком городе Дармштадте.

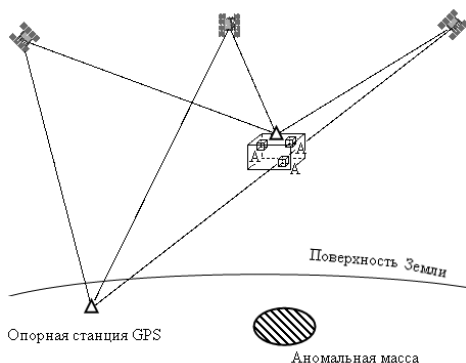


Рис. 3.7. Спутниковая градиентометрия с трехосным градиентометром

Цель проекта GOCE – исследование гравитационного поля и стационарной циркуляции Мирового океана:

- измерить аномалии гравитационного поля с точностью порядка 1 мГал;

- измерить форму земного геоида с точностью 1-2 см.

Масса спутника – 1 052 кг (с учетом массы ксенона (40 кг), используемого в качестве топлива). Орбита – низкая квазикруговая околоземная гелиосинхронная орбита на границе света и тени. Наклонение – $96,7^\circ$, высота орбиты – 255–285,4 км. Эксплуатационный ресурс – 20 месяцев.

Изготовитель ракеты-носителя – Государственный космический научно-производственный центр имени М. В. Хруничева (г. Москва, РФ).

По сравнению с режимом «низкий – низкий» системы «спутник – спутник» с большим базисом между двумя спутниками НОО в случае спутниковой градиентометрии базисное расстояние между двумя акселерометрами стремится к нулю. Это достигается размещением обоих акселерометров на одном и том же спутнике. Таким образом, спутниковая градиентометрия представляет собой измерение разностей ускорения в трех пространственных взаимно ортогональных направлениях шестью акселерометрами (по два на каждой из трех осей), установленными на одном и том же спутнике. Измеренный сигнал есть разность гравитационного ускорения спутника, где гравитационный сигнал является результатом притяжения.

Стрелообразная форма спутника, а также его «плавники» помогают спутнику сохранять ориентацию и уменьшают торможение в верхней атмосфере, которое довольно значительно на высоте его орбиты – около 255 км. Низкая орбита спутника и высокая точность акселерометров в 10^{-12} м/с^2 позволила улучшить точность определения геоида до 1-2 см при пространственном разрешении полуволны ондуляции геоида порядка 100 км ($1 \times 1^\circ$). Для компенсации атмосферного торможения и других негравитационных воздействий на спутнике установлен непрерывно работающий ионный двигатель, использующий для создания импульса ионизированные атомы ксенона [27].

В ближайшие годы планируется реализация градиентометрического проекта на низких орбитах (160–180 км) с использованием градиентометров с чувствительностью 10^{-4} Э (при времени осреднения 1–1 000 с). Этот проект позволит решить широкий круг важнейших задач: выбор наиболее реального механизма горообразования, понимание динамики ядра Земли, определение механических свойств земной коры и ее динамики, построение региональных геологических моделей для оценки минеральных ресурсов, изучение океанических циркуляций, улучшение гравитационных моделей для повышения точности траекторных и ГНСС-измерений. Данные градиентометрии, дополняя и контролируя результаты морских и наземных гравиметрических измерений, а также данные спутниковой

альтиметрии, позволят устранить систематические погрешности, присутствующие каждому отдельному методу.

Задачи, решаемые современными методами космической геодезии.

Использование современных методов космической геодезии позволило значительно повысить точность реализаций земной и небесной систем координат и оценок параметров вращения Земли, получить наблюдательный материал для проверки изменений геодинамических параметров, осуществлять изучение и мониторинг процессов, происходящих в тропосфере и ионосфере Земли, изучать движение литосферных плит и т. п.

Каждый из методов решает определенный круг задач.

РСДБ является единственным инструментом для установления небесной системы координат (ICRF) и параметров перехода к земной системе (ITRF), позволяет непосредственно определять параметры нутации и поправки ко Всемирному времени. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами позволяет с одновременными наблюдениями небольшого количества глобально расположенных станций оценить все параметры вращения Земли и получить реализацию небесной системы координат, однако этот метод не позволяет получить положения геоцентра. Особенности этого метода измерений является то, что он всепогоден. К существенным недостаткам стоит отнести высокую стоимость телескопов и значительные инструментальные ошибки ввиду массивности конструкций. Кроме того, координаты станций определяются не относительно геоцентра, а относительно некоторого выбранного начала.

Спутниковые методы (ГНСС, DORIS и SLR) имеют похожий круг решаемых задач в силу того, что все они основываются на орбитах ИСЗ, однако наблюдения выполняются в разных диапазонах – радио- и оптическом.

Метод ГНСС получил наиболее широкое распространение благодаря своим очевидным достоинствам: сравнительно низкая стоимость наземной аппаратуры, всепогодность, высокая частота наблюдений. Причем получение результатов возможно в реальном времени. Все спутники системы ГЛОНАСС оборудованы лазерными отражателями.

Основное применение DORIS – высокоточное определение орбит спутников, оснащенных альтиметрической аппаратурой для изучения по-

верхности океанов. При наличии нескольких таких спутников на околоземных орбитах появилась возможность использовать эту систему для определения координат станций-маяков, положения геоцентра и вариаций продолжительности суток. Данный метод также является всепогодным. Кроме того, для реализации метода не требуются специальные конструкции космического аппарата.

Круг задач, решаемых с использованием лазерной локации спутников, чрезвычайно широк – он охватывает все задачи космической геодезии. Кроме того, это единственный метод измерений, позволяющий непосредственно определять координаты геоцентра (исходное начало общеземной системы координат) [28].

К достоинствам данного метода относятся [28]:

- система оптическая, поэтому не зависит от ошибок измерения запаздывания сигнала при прохождении атмосферы. При этом поправки за рефракцию могут быть учтены с точностью до долей сантиметра;

- широкий набор наблюдаемых ИСЗ;

- высокая точность измерений расстояний (0,5–2,0 см);

- получение результатов измерений дальности до спутника практически в реальном времени;

- наличие результатов измерений в банках данных, начиная с 1975 г., что позволяет изучать некоторые параметры на продолжительном временном интервале;

- определение координат геоцентра и геоцентрических координат станций;

- контроль точности определения орбит ИСЗ с использованием радиотехнических методов в силу различной физической природы.

К достоинствам спутниковой градиентометрии и системы «спутник – спутник» следует отнести их высокую чувствительность к малым изменениям в гравитационном поле Земли, что позволяет определять его тонкую структуру. Малые изменения уровня Мирового океана, объема ледниковых масс и глобального водного цикла отражаются на структуре гравитационного поля планеты и его изменениях со временем. Преимущества этих методов очевидны:

- непрерывность измерений, независимость от погодных условий;

– высокоточное определение орбит в реальном времени по наблюдениям ГНСС;

– чувствительность к высокочастотным составляющим геопотенциала.

К недостаткам данных методов следует отнести погрешности определения низкочастотной составляющей гравитационного поля, затруднения в определении коэффициента при второй зональной гармонике. Указанные космические измерительные средства не могут дать такой продолжительный ряд наблюдений, как SLR, что делает невозможным изучение долгопериодических изменений в коэффициентах гравитационного поля.

Каждый из рассматриваемых методов имеет свои систематические погрешности, обусловленные методикой проведения наблюдений, инструментальными погрешностями, а также программным обеспечением первичной и вторичной обработки наблюдений.

Систематические погрешности можно частично устранить с помощью сочетания наблюдений различных методов в единую систему и получения общего решения. Для проведения наблюдений методами космической геодезии с помощью двух и более высокоточных измерительных систем создаются пункты коллокации. Пункты коллокации предназначаются для повышения точности реализации общеземной геоцентрической системы координат, распространяемой с использованием ГНСС [29].

Преимущества современных методов космической геодезии раскрываются в полной мере при условии получения совместных решений по результатам одновременных наблюдений нескольких методов [30].

3.4. Глобальные системы спутникового позиционирования

Бурное развитие космическая геодезия получила с совершенствованием глобальных систем позиционирования, позволяющих эффективно решать традиционные и новые задачи геодезии [31, 32]. В начале 1980-х гг. появились спутниковые радионавигационные системы (СРНС) – американская GPS и советская ГЛОНАСС. Каждая из этих СРНС при полном развертывании состоит из 24 спутников, движущихся на почти круговых орбитах с высотой около 20 000 км. Спутники GPS распределены в шести, а спутники ГЛОНАСС – в трех орбитальных плоскостях, развернутых че-

рез 60° и через 120° по долготе восходящего узла и с наклоном орбиты 55 и 65° соответственно. Период обращения спутников составляет примерно 12 часов. Орбиты расположены таким образом, что в любое время над любой точкой земной поверхности видно «созвездие» не менее чем из четырех космических аппаратов. На борту каждого спутника имеются атомные эталоны частоты и времени; аппаратура для передачи и приема радиосигналов; бортовые вычислительные средства, предназначенные для хранения и обработки данных, полученных от наземных центров управления, и разнообразное вспомогательное оборудование. Спутники непрерывно передают сигналы, содержащие информацию об их положении и точном времени, а также дальномерные коды, позволяющие измерять расстояние.

Определение координат пользователя СРНС производится с помощью специальных спутниковых приемников. Каждый приемник может производить измерения либо независимо от других приемников, либо синхронно с другими приемниками. В первом случае, называемом *абсолютным методом*, достигается точность однократного определения координат порядка 1–15 м. Более высокую точность можно получить при одновременных наблюдениях спутников несколькими приемниками. При таком методе измерений один из приемников обычно располагается в пункте с известными координатами. Тогда положение остальных приемников можно определить относительно первого приемника с точностью несколько миллиметров. Этот метод получил название *относительного метода*.

Методы ГЛОНАСС/GPS измерений можно разделить на *статические* и *кинематические*. При статических измерениях все приемники находятся на пунктах в неподвижном состоянии. Продолжительность наблюдений составляет от пяти минут до нескольких часов и даже суток, в зависимости от требуемой точности и расстояний между пунктами. При кинематических измерениях один из приемников находится постоянно на опорном пункте, а второй приемник (мобильный) находится в движении. Точность кинематических наблюдений немного ниже, чем в статике (обычно 2-3 см на линию до 10 км).

В основе определения координат спутникового приемника лежит четырехлучевая линейная засечка. Роль опорных пунктов выполняют

космические аппараты (не менее четырех), координаты которых известны в любой момент времени. При помощи земной и спутниковой аппаратуры измеряются расстояния $S_{i,A}$ до ИСЗ. Аналитическое решение заключается в решении системы уравнений

$$S_{i,A}^2 = (x_i - X_A)^2 + (y_i - Y_A)^2 + (z_i - Z_A)^2, \quad (3.14)$$

где X_A, Y_A, Z_A – искомые координаты приемника; x_i, y_i, z_i ($i = 1, 2, 3, 4, \dots$) – известные координаты спутников, отнесенные к определенному моменту времени.

3.5. Роль спутниковых методов в геодезии

Первые искусственные спутники Земли применялись в геодезии только как высоко поднятые визирные цели. Развитие динамического метода космической геодезии, когда спутник стал носителем координат, позволило решать геодезические задачи комплексно – определять координаты станций наблюдений, параметры гравитационного поля Земли и многое другое. В настоящее время с высокой точностью определены фундаментальные геодезические постоянные, определяющие геодезическую отсчетную систему. Основные задачи координатно-временного обеспечения решаются при использовании современных быстро развивающихся космических технологий: радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, лазерной локации ИСЗ, глобальных систем позиционирования, доплеровских систем. Эти технологии используются для решения таких задач, как установление небесной и земной опорных систем координат; определение параметров ориентации этих систем – постоянный мониторинг вращательного движения Земли. К параметрам ориентации Земли (ПОЗ) относят координаты полюса, Всемирное время, прецессию и нутацию. Международная служба вращения Земли публикует данные о ПОЗ в отчетах, месячных и еженедельных бюллетенях.

Особая роль отводится космической геодезии в развитии государственной геодезической сети [33]. Дальнейшее развитие государственной геодезической сети с использованием глобальных систем позиционирования

начато в 1999 г. Сеть, как и прежде, строится от общего к частному. Она включает в себя геодезические построения различных классов точности:

- фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС);
- высокоточную геодезическую сеть (ВГС);
- спутниковую геодезическую сеть 1-го класса (СГС-1);
- астрономо-геодезическую сеть 1-го и 2-го классов;
- геодезические сети сгущения 3-го и 4-го классов.

Сеть ФАГС создается с целью долгосрочного поддержания высокоточной трехмерной геоцентрической системы координат и включает в себя постоянно действующие пункты и обсерватории для наблюдения за ИСЗ и другими космическими объектами; периодически определяемые пункты, наблюдения на которых планируется повторять через интервал не более 10 лет. Пункты ФАГС равномерно располагаются на территории страны с расстоянием между смежными точками 650–1 000 км. На пунктах ФАГС измеряется абсолютное значение силы тяжести. Пространственное положение пунктов здесь определяется методами космической геодезии в геоцентрической системе координат. Средняя квадратическая погрешность определения положения центра масс Земли составляет 10–15 см, а средняя квадратическая погрешность взаимного положения пунктов ФАГС должна быть не более 2 см по плановому положению и 3 см по высоте с учетом скорости их изменения во времени.

Пункты ВГС опираются на пункты ФАГС и удалены один от другого на 150–300 км. Основные функции ВГС состоят в дальнейшем распространении на всю территорию России геоцентрической системы координат и уточнении параметров взаимного ориентирования геоцентрической и референцной систем координат. Средняя квадратическая погрешность определения планового положения пунктов ВГС не должна превышать $3 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-8} D$ (D – расстояние между пунктами в мм) и $5 \text{ мм} + 7 \cdot 10^{-8} D$ по геодезической высоте.

Основная функция СГС-1 состоит в обеспечении оптимальных условий для реализации точностных и оперативных возможностей спутниковой аппаратуры при переводе геодезического обеспечения территории России на спутниковые методы определения координат. Пункты СГС-1 проектируются в наиболее удобных для использования местах с хорошими

условиями наблюдений, со средними расстояниями между смежными пунктами около 25–35 км. При этом предусматривается максимально возможное совмещение пунктов сети с существующими грунтовыми реперами для исключения дорогостоящих работ по закладыванию центров. Средняя квадратическая погрешность определения положения пунктов СГС-1 относительно ближайших пунктов ФАГС и ВГС не должна превышать 1-2 см в районах с сейсмической активностью 7 и более баллов и 2-3 см в остальных районах страны.

3.6. Геодинамические исследования методами космической геодезии

С развитием новых средств изучения фигуры Земли и ее гравитационного поля все большее значение приобретает кинематический аспект геодезии – определение изменений положений точек земной поверхности и параметров гравитационного поля Земли во времени. Появился новый раздел в науке о Земле, лежащий на стыке геодезии, геофизики и астрономии, занимающийся проблемами изучения изменений пространственного положения точек и гравитационного поля Земли во времени и их интерпретаций и получивший название *геодинамики*.

Динамика Земли проявляется в движениях полюса и неравномерности ее вращения. Новые возможности в изучении движения полюсов открывают доплеровские и лазерные наблюдения ИСЗ, лазерная локация Луны, длиннобазисная радиоинтерферометрия.

Для объективной интерпретации изменений точек земной поверхности привлекаются различные современные теории: тектоники плит, упругих деформаций, приливов и вращения Земли и др.

В последние десятилетия благодаря значительному повышению точности измерительной техники, используемой для определения параметров движения, ИСЗ, методы космической геодезии стали широко применяться для изучения глобальных и региональных геодинамических процессов и движения Земли как планеты. Важнейшим вкладом космической геодезии в глобальную тектонику стало подтверждение достоверности движений литосферных плит. Движение крупных плит достаточно стабильно на по-

верхности сфероида и происходит со средней скоростью 50 мм/год. Локальные тектонические движения вблизи границ плит характеризуются большим вертикальным сдвигом.

Принципиальное отличие результатов, полученных по наблюдениям ИСЗ, от данных наземных гравиметрических и астрономических наблюдений состоит в том, что они не связаны с отвесной линией и не подвергаются влиянию особенностей внутреннего строения Земли. Поэтому совместный анализ спутниковых наблюдений, гравиметрических и астрономических данных дает возможность получать новые научные результаты и количественно оценить механические деформации Земли.

Вопросы для самоконтроля

1. Спутники, используемые для решения геодезических задач.
2. Классификация методов наблюдений ИСЗ.
3. Радиотехнические методы: доплеровские наблюдения, измерения дальностей, использование интерферометров.
4. Геометрический метод космической геодезии.
5. Фундаментальное уравнение космической геодезии.
6. Динамический метод космической геодезии.
7. Построение Мировой геодезической сети.
8. Уточнение фундаментальных геодезических постоянных.
9. Орбитальный метод космической геодезии.
10. Современные методы космической геодезии.