Геннадий Шануров

Геотроника. Космические и наземные методы геодезии и навигации

Учебное пособие

LAP LAMBERT Academic Publishing

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.
Введение…… 3
Глава 1.
Физические и метрологические основы геотроники…… 7
Глава 2.
Системы координат и системы времени……... 33
Глава 3.
Электронная дальнометрия…… 47
Глава 4.
Наземные радионавигационные системы……. 61
Глава 5.
Спутниковые системы глобального позиционирования……. 67
Глава 6.
Геодезическая интерферометрия……. 115
Глава 7.
Практическая реализация инерциальной системы координат и земной системы координат…… 129
Глава 8.
Словарь терминов, используемых в геодезии и в навигации……... 139
Литература……. 141

ВВЕДЕНИЕ

Научно-техническая задача, которую решает высшая геодезия, - это создание, поддержание и совершенствование опорных геодезических сетей. Решение этой научно-технической задачи является необходимым условием для решения научной задачи высшей геодезии. Эту научную задачу формулируют как определение фигуры Земли и её внешнего гравитационного поля, а также как определение изменений фигуры Земли и изменений характеристик внешнего гравитационного поля Земли во времени. В учебном пособии рассмотрены современные электронные средства и методы создания и поддержания опорных геодезических сетей. Подавляющий объём измерений в геодезических сетях выполняют с использованием спутниковых приёмников, совокупность которых, совместно с соответствующим программным обеспечением, представляет собой один из трёх сегментов спутниковых систем глобального позиционирования.

Глобальную геодезическую сеть, пункты которой используют в качестве исходных пунктов для геодезических спутниковых сетей, создают и развивают сочетанием метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и метода лазерной локации искусственных спутников Земли. Эти методы также являются предметом рассмотрения в учебном пособии. Принципы работы спутниковой аппаратуры и используемых в радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой радиотелескопов возможно понять и изучить только на основе понимания и изучения принципов работы наземных дальномеров, в частности, высокоточных фазовых светодальномеров.

Объектом рассмотрения в учебном пособии являются методы навигации. Геодезия и навигация – это родственные, взаимосвязанные и взаимно дополняющие дисциплины. Спутниковые системы глобального позиционирования GPS Navstar и ГЛОНАСС изначально предназначали для решения задач именно навигации и только на этапе создания этих систем нашли возможности их использования для решения задач геодезии и, в частности, задач высшей геодезии. Выполняя обследование и рекогносцировку пунктов геодезической сети, геодезист для определения навигационных координат пунктов использует навигационный спутниковый приёмник, то есть, работает как навигатор. В самом общем смысле, геодезисты и навигаторы решают одну и ту же задачу – определение местоположения пункта или объекта в форме его координат. Разница состоит в следующем. Специалисты в области геодезии определяют координаты пунктов геодезической сети и делают это с наивысшей доступной современной технике и технологии точностью. Навигаторы с меньшей точностью определяют мгновенные координаты подвижных носителей навигационной аппаратуры. Кроме того, навигаторы определяют вектор скорости перемещения подвижного носителя спутникового приёмника. Связь геодезии и навигации настолько тесна, что автор счёл необходимым и целесообразным совместное рассмотрение этих дисциплин. При этом основное внимание уделено решению задач геодезии.

Истоком излагаемого в учебном пособии курса является курс «Радиогеодезия», который был включён в учебные планы МИИГАиК в шестидесятые годы двадцатого века. В рамках этого курса студенты изучали геодезические фазовые светодальномеры и радиодальномеры. Позже курс стал носить название «Радиогеодезические и электрооптические измерения». В семидесятые годы в курс включили изучение спутниковых систем глобального позиционирования и этот курс стал носить название «Радиогеодезические, электрооптические и спутниковые измерения». В конце девяностых годов двадцатого века профессор кафедры высшей геодезии МИИГАиК Голубев Анатолий Николаевич предложил для курса краткое название «Геотроника», которое можно интерпретировать как «геодезия и электроника». Автор согласился с этим предложением. В настоящее время материал, изложенный в учебном пособии, автор преподаёт в рамках курсов «Высшая геодезия» и «Спутниковая геодезия». В становление и развитие курса существенный вклад внесли следующие профессора и преподаватели кафедры высшей геодезии МИИГАиК: Алексей Васильевич Кондрашков, Михаил Владимирович Ратынский, Балис Балио Серапинас, Михаил Тихонович Прилепин, Владимир Михайлович Лобачёв, Анатолий Николаевич Голубев, Владимир Павлович Васильев, Виктор Павлович Глумов, Валерий Анатольевич Монахов.

Учебное пособие в значительной мере основано на книге [43, Шануров, 2001]. Автор учёл изменения, произошедшие за истекшие годы в геодезии и в навигации. Кроме этого, автор, исходя из опыта преподавания в МИИГАиК курсов «Высшая геодезия», «Спутниковая геодезия» и «Геотроника», внёс изменения в систему и в порядок изложения материала. Автор использовал также свой опыт преподавания курса «Основы высшей геодезии и геотроники» в Мадридском Политехническом Университете [58, Shanourov, 2000].

Содержание учебного пособия основано на первоисточниках. В частности, описание спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS Navstar основано на публикациях специалистов, создавших эти системы и разработавших соответствующее математическое и программное обеспечение. Автор изложил в рациональном, с его точки зрения, порядке проверенные практикой результаты разработок известных и авторитетных профессионалов, не допуская никаких домыслов и вольных интерпретаций. Текст учебного пособия не содержит результатов научных разработок автора. Ссылки на использованные источники информации приведены в начале каждой главы с тем, чтобы не прерывать этими ссылками процедуру изложения материала; ссылки на рисунки, взятые из INTERNET, даны в тексте в квадратных скобках. При описании практической стороны решаемых проблем автор, учитывая опыт других профессионалов, использовал и свой опыт выполнения полевых работ с использованием наземной и спутниковой геодезической аппаратуры.

Для того, чтобы изложение материала было кратким и, по возможности, лёгким для восприятия, автор придерживался следующих принципов.

Вопросы, исчерпывающим образом описанные в общедоступных источниках информации, таких, как учебники, даны кратко. Количество структурных схем аппаратуры сведено до необходимого минимума за счёт обобщения структурных схем, приведённых в известных и авторитетных источниках информации. Промежуточные математические выкладки не приведены. Даны исходные аналитические соотношения, описан легко проверяемый ход рассуждений и преобразований, а затем приведён конечный результат. Исключение в этом смысле составляют выкладки в разделе 5, посвящённые обработке результатов фазовых измерений в спутниковой системе глобального позиционирования.

Приступающий к изучению курса «Геотроника» должен иметь подготовку в области высшей математики и в области геодезии, достаточную для того, чтобы оперировать такими, например, понятиями, как интеграл, матрица, измерение угла и измерение расстояния.

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОТРОНИКИ

При написании этой главы использованы следующие работы: [2, Бин, 1971], [3, Борн, 1973], [4, Бурдун, 1980], [5, Вентцель, 1975], [8, Голубев, 1985], [13, Голубев, 2013], [16, Жеребцов, 1964], [18, Закатов, 1976], [25, Маркузе, 1994], [32, Саастамойнен, 1975], [33, Свешников, 1961], [37, Спиридонов, 2003], [39, Тюрин, 1976], [43, Шануров, 2001], [44, Шерклифф, 1965] [45, Яковлев, 1982], [46, Яковлев, 1989], [47, Brown, 1974], [50, Hofmann], [53, Laurila, 1976], [54, Laurila, 1983] и [Shanourov, 2000].

В процессе создания геодезической сети и в процессе навигации с помощью радиоэлектронной аппаратуры измеряют линейные величины: расстояния, разности расстояний, скорости изменения расстояний. Радиоэлектронная аппаратура производит с электромагнитными колебаниями и с электрическими колебаниями всевозможные операции. В том числе, радиоэлектронная аппаратура преобразовывает электромагнитные колебания в электрические колебания и наоборот: преобразовывает электрические колебания в электромагнитные колебания. Некоторые из этих операций характерны именно для геодезической и навигационной радиоэлектронной аппаратуры. В процессе измерения электромагнитное колебание – электромагнитная волна - распространяется сквозь атмосферу. В первом разделе рассмотрены свойства атмосферы как среды, сквозь которую в процессе измерений распространяются электромагнитные волны – свет и радиоволны. Сформулированы основные геометрические понятия, связанные с измерениями линейных величин в геодезической сети, в том числе и с метрологическим обеспечением этих измерений.

Электромагнитные колебания и волны, их характеристики

Если напряженность электрического поля электромагнитного колебания принимает одно и то же значение через равные интервалы времени T, то такое колебание называют периодическим. Интервал времени T называют периодом колебания, размерность этого интервала времени равна секунде. Величину f=1/T, обратную периоду, называют частотой колебания. Частота колебания - это количество колебаний в секунду; ее размерность равна сек$^{-1}$ или герцу (Гц). Тысяча герц (10^3Гц) - это килогерц (кГц), миллион герц (10^6Гц) - это мегагерц (МГц), миллиард герц (10^9Гц) - это гигагерц (ГГц). Простейшим периодическим колебанием является гармоническое колебание, имеющее одну частоту f. Такое колебание называют также монохроматическим. Распространяющееся в пространстве электромагнитное колебание называют электромагнитной волной.

Выберем прямоугольную систему координат X, O, Y следующим образом. Начало O этой системы координат совпадает с источником электромагнитного колебания. Положительное направление оси X совпадает

с вектором скорости $\vec{V}$ электромагнитной волны. Рассмотрим сначала колебание, которое совершается в плоскости XOY вокруг оси X. Гармоническое колебание описывают следующими формулами:

$$y(t) = A\cos(\omega t + \varphi_0) \qquad (1.1)$$

и/или:

$$y(t) = A\sin(\omega t + \varphi'_0) \quad . \qquad (1.2)$$

В этих выражениях: A - это амплитуда колебания; $\omega = 2\pi f$ - это круговая (угловая) частота колебания; величины φ_0 и/или φ'_0 - это начальная фаза (начальные фазы) колебания; если формулы (1.1) и (1.2) описывают одно и то же колебание, то разность этих величин равна $\pi/2$. В обеих формулах стоящую в круглых скобках величину называют текущей фазой, мгновенной фазой или просто фазой колебания. Амплитуду, частоту и начальную фазу гармонического колебания объединяют понятием «характеристики колебания» и/или «параметры колебания».

В рассматриваемом случае, как написано, вектор напряженности электрического поля расположен в плоскости XOY. Эту плоскость называют плоскостью колебаний. Ортогональную ей плоскость называют плоскостью поляризации. Формулы (1.1) и (1.2) описывают плоско - поляризованное или линейно - поляризованное электромагнитное колебание, то есть, линейно - поляризованную электромагнитную волну. Дальнейшие пояснения дадим на примере света – светового колебания, световой волны. Если положение вектора напряженности электрического поля в поперечном сечении светового пучка каким-либо образом «упорядочено», то такой свет называют поляризованным. Вектор напряженности электрического поля в пучке естественного света, например, в пучке солнечного света, в любой момент времени занимает случайное положение. Говорят и пишут, что естественный свет не поляризован. Если «упорядоченность» положения конца вектора электрического поля состоит в том, что конец этого вектора описывает окружность с правым или левым направлением вращения, то такую электромагнитную волну называют поляризованной по кругу (по окружности) или говорят и пишут, что эта волна обладает циркулярной поляризацией с правым или левым направлением вращения конца вектора напряженности электрического поля. Если конец вектора напряженности электрического поля описывает эллипс, то волну называют эллиптически поляризованной или говорят и пишут, что эта волна обладает эллиптической поляризацией с правым или левым направлением вращения конца вектора напряженности электрического поля. Соответствующий эллипс может иметь различное сжатие и различную ориентацию главных осей. Вид поляризации электромагнитного колебания является ещё одной, в дополнение к упомянутым ранее, характеристикой этого электромагнитного колебания, то есть, является ещё одним параметром, характеризующим это колебание.

Если колебание не является гармоническим, но является периодическим и совершается с периодом T, то это колебание представляют в виде ряда Фурье. Другими словами, любое периодическое колебание представляют в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными частоте f = 1/T. При этом колебания всех остальных частот имеют разные амплитуды и разные начальные фазы. Все эти гармонические колебания называют гармониками. Функцию, описывающую зависимость амплитуды гармоники от частоты этой гармоники называют амплитудным спектром колебания или просто спектром колебания. Функцию, описывающую зависимость начальной фазы гармоники от частоты этой гармоники называют фазовым спектром колебания. Гармонику с частотой f называют первой или главной гармоникой. Гармоники с частотами 2f, 3f, ... называют соответственно второй, третьей и т.д. гармониками. Непериодическое колебание можно представить в виде интеграла Фурье. Такое колебание имеет сплошной спектр. Примером непериодического колебания является случайный процесс.

Для описания колебательного процесса используют функции комплексного переменного. При таком описании используют следующие функции: A(k/T) - это амплитудный спектр колебания и Φ(k/T) - это фазовый спектр колебания. Эти функции объединяют в комплексную функцию - комплексный спектр:

$$S\left({}^{k}\!/_{T}\right) = A\left({}^{k}\!/_{T}\right) e^{i\Phi\left({}^{k}\!/_{T}\right)} . \qquad (1.3)$$

В этом выражении k = 2πf/V - это волновое число.

Монохроматическую волну, распространяющуюся со скоростью V, характеризуют длиной волны:

$$\lambda = \frac{V}{f} . \qquad (1.4)$$

С учётом этой формулы выражение для волнового числа приобретает вид: k = 2π/λ.

Формула, описывающая гармоническую (монохроматическую) волну, имеет вид:

$$S(t,x) = A\cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{V}\right) + \varphi_0\right] = A\cos(\omega t - kx + \varphi_0) . \qquad (1.5)$$

Если разность фаз между двумя гармоническими колебаниями одинаковой частоты не меняется с течением времени, то такие колебания называют когерентными. Если суммировать или перемножать когерентные колебания (волны) и затем осреднять результат сложения или перемножения по времени, то возникает явление интерференции. Процедуру суммирования

с последующим осреднением называют аддитивной обработкой колебаний. Процедуру перемножения с последующим осреднением называют корреляционной обработкой колебаний. Помимо когерентности необходимым условием возникновения явления интерференции является одинаковый вид поляризации взаимодействующих колебаний. Наблюдение интерференции позволяет оценить степень когерентности электромагнитных колебаний.

Операции, производимые с электромагнитными и электрическими колебаниями

Используемые в геодезии и навигации радиоэлектронные приборы выполняют всевозможные операции с электромагнитными и электрическими колебаниями. Здесь рассмотрены только те операции, которые характерны для геодезической и навигационной электронной аппаратуры. Каждую операцию (процедуру) выполняет конкретный блок. Этот блок реализует присущий только этому блоку алгоритм обработки колебаний. Например, операцию модуляции выполняет модулятор, корреляционную обработку выполняет коррелятор. Все это - совершенно различные операции, но они имеют общие признаки. Это обстоятельство иллюстрирует рисунок 1.1.

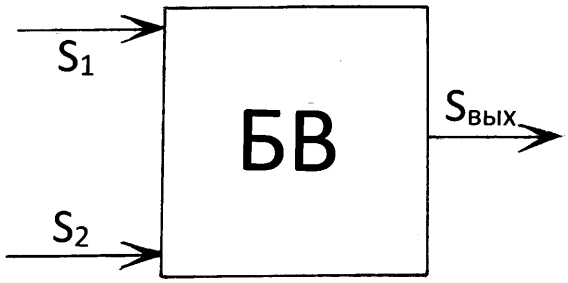

Рисунок 1.1. ***Схема обработки сигналов***

В любой операции участвуют два входных колебания: S_1 и S_2 Эти два колебания поступают на блок взаимодействия БВ по двум входным каналам. Результатом взаимодействия является выходной сигнал $S_{вых}$. Этот выходной сигнал покидает блок взаимодействия по выходному каналу.

Модуляция и кодирование. Модуляция - это произвольное, то есть намеренно осуществляемое, изменение с течением времени t какого-либо параметра P(t) колебания по определенному закону. В наземных дальномерах наиболее часто используют гармонический (синусоидальный) закон и прямоугольный закон. Рассмотрим сначала модуляцию по гармоническому закону. В этом случае изменяемый (модулируемый) параметр колебания P(t), то есть амплитуду, частоту, начальную фазу и/или вид поляризации колебания описывают формулой:

$$P(t) = P_0 + \Delta P\cos\Omega t = P_0(1 + m\cos)\Omega t \ . \qquad (1.6)$$

В формуле (1.6): P_0 - это неизмененная величина параметра P; ΔP - амплитуда модуляции; Ω - круговая частота модуляции: $\Omega = 2\pi F$, F - частота модуляции; $m = \Delta P/P_0$ - коэффициент модуляции. На рисунке 1.2 приведены графики, иллюстрирующие амплитудную модуляцию по гармоническому закону. Верхний график представляет модулируемое (несущее) колебание. Средний график представляет модулирующее колебание. Нижний график представляет результирующее модулированное колебание.

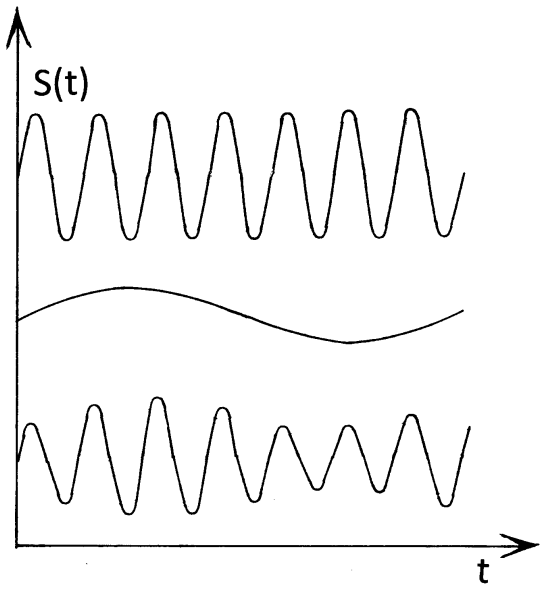

Рисунок 2.2. ***Амплитудная модуляция по гармоническому закону***

Частоту f колебания, подвергаемого модуляции, то есть частоту модулируемого колебания, называют несущей частотой, а само модулируемое колебание и соответствующую ему волну называют несущим колебанием, несущей волной или просто несущей. Колебание, которое задает закон модулирования несущей называют модулирующим колебанием. Частота модулирующего, колебания, а, следовательно, и длина волны этого модулирующего колебания задает длину рабочего эталона, с которым сравнивают измеряемое расстояние (дистанцию, дальность). Длину измеряемой дистанции сравнивают с длиной волны модулирующего колебания. Поэтому модулирующее колебание называют масштабным колебанием. Применительно к рисунку 1.1 написанное означает, что входными колебаниями, поступающими на модулятор, являются несущее и модулирующее колебания, а выходным колебанием является модулированное колебание.

Модуляция по прямоугольному закону состоит в том, что параметр колебания периодически и скачкообразно изменяет свое значение с P_1 на P_2 и обратно. Если по такому закону изменяют фазу несущего колебания, то этот вид модуляции называют фазовой манипуляцией или просто манипуляцией.

В момент изменения уровня модулирующего колебания фаза несущей волны скачком меняется на 180^0 (π радиан). Частоту модулирующего колебания называют тактовой частотой. На рисунке 1.3 приведены графики, иллюстрирующие фазовую модуляцию колебания по прямоугольному закону.

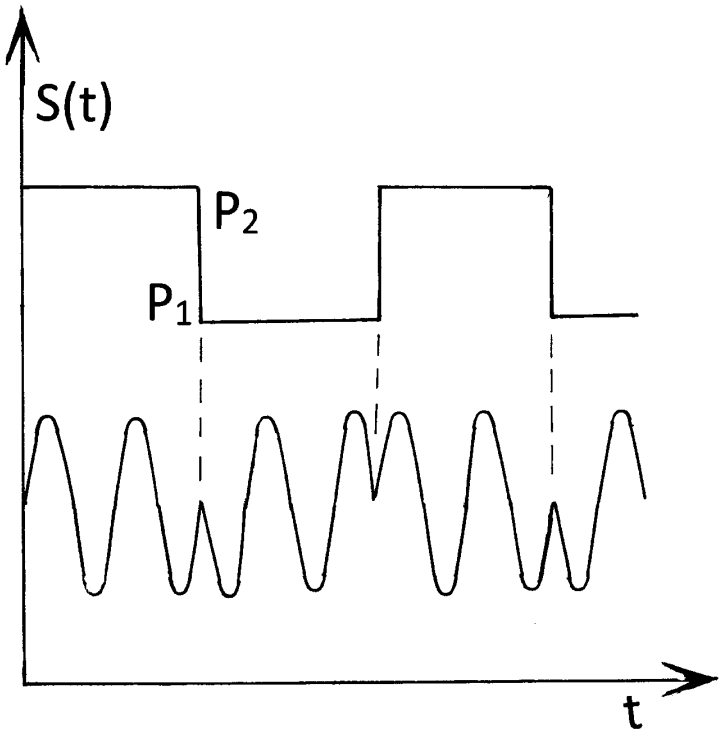

Рисунок 1.3. ***Фазовая модуляция по прямоугольному закону***

Верхний график представляет модулирующее колебание. Нижний график представляет колебание, модулированное по фазе - манипулированное колебание. Фаза этого колебания претерпевает скачки в 180^0 (π радиан) при изменении уровня модулирующего колебания.

В спутниковых системах глобального позиционирования применяют модуляцию по гораздо более сложному, чем прямоугольный, закону. Модулирующее колебание занимает уровни P_1 и P_2 в течение интервалов различной длительности. Длительность этих интервалов содержит информацию, в том числе, например, информацию о местоположении спутника в момент его наблюдения. Модулированное колебание «несет» эту информацию. Именно по этой причине такое колебание называют сигналом, а вместо термина «модуляция» употребляют термин «кодирование» либо термин «кодовая модуляция». В спутниковых системах глобального позиционирования выполняют фазовую манипуляцию несущих колебаний. Пример кодирующего сигнала иллюстрирует рисунок 1.4.

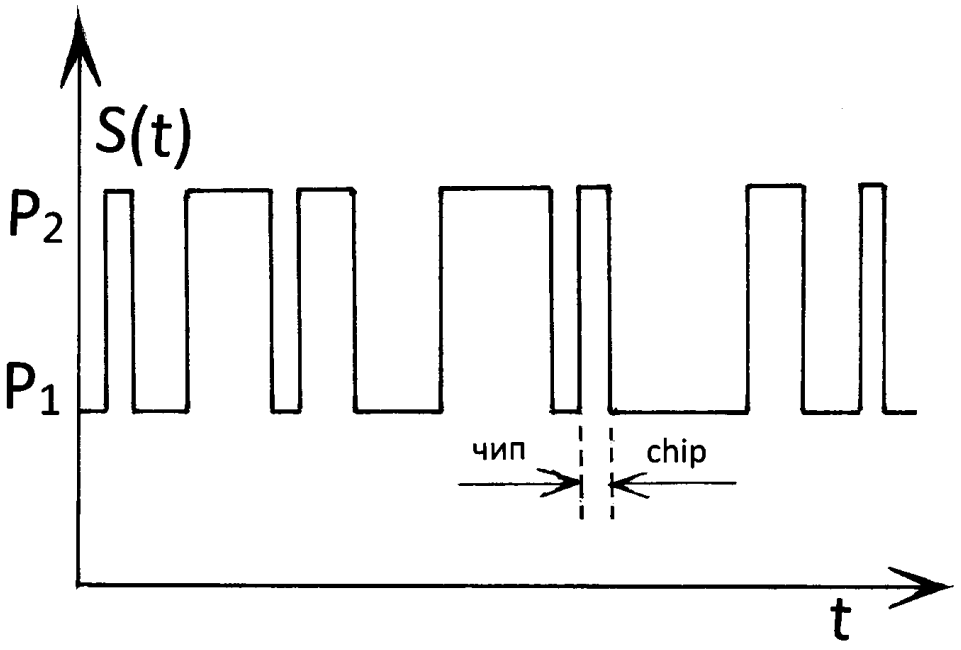

Рисунок 1.4. ***Кодирующий сигнал***

Самый короткий, элементарный интервал называют чипом (chip). Длительность всех остальных интервалов кратна длительности чипа. Величину, обратную длительности чипа, называют тактовой частотой кода. Для того, чтобы спутниковый приёмник получил и зарегистрировал содержащуюся в кодовом сигнале информацию необходимо, чтобы приёмник «знал» закономерность формирования кода. Приёмник, не способный декодировать сигнал спутника, воспринимает этот сигнал как случайный шум с широким спектром. Поэтому в отношении сигнала спутника системы глобального позиционирования употребляют термины «псевдошумовой сигнал», «псевдослучайный шум – pseudo random noise – PRN».

Демодуляция и декодирование. Демодуляция - это операция, обратная модуляции. Синонимом термина «демодуляция» является термин «детектирование». В процессе демодуляции из модулированного колебания выделяют модулирующее колебание. «Декодирование» - это выделение кодирующего сигнала из кодированного колебания. Колебание, до прохождения им измеряемой дистанции, модулируют (кодируют), а после прохождения этой дистанции - демодулируют (декодируют). В спутниковых системах глобального позиционирования декодированный сигнал используют для выполнения кодовых измерений в навигационном режиме.

Квадратирование. Для реализации геодезического режима измерений в спутниковых системах глобального позиционирования используют фазовый метод измерений. Для выполнения фазовых измерений необходимо обрабатывать именно гармонические (синусоидальные) колебания. Сигнал

спутника не является синусоидальным колебанием: излучаемые спутником несущие колебания модулированы псевдослучайным кодом. Для превращения этого кодированного сигнала в синусоидальное (гармоническое) колебание используют операцию квадратирования. Приемник перемножает принятый от спутника сигнал на самого себя – на сам этот сигнал. Результат перемножения подвергают частотной фильтрации и получают синусоидальное колебание, имеющее частоту, равную удвоенной частоте несущего колебания. Это колебание и используют для выполнения фазовых измерений.

Гетеродинирование. Гетеродинирование - это смешение (смешивание) двух колебаний, имеющих разные частоты, с последующим выделением колебания, частота которого равна разности частот исходных смешиваемых колебаний. Обычно под термином «смешение» понимают перемножение колебаний. В результате такого перемножения получают колебания нескольких частот. Среди них имеется колебание, частота которого равна разности частот входных смешиваемых колебаний. На выходе смесителя (перемножителя колебаний) устанавливают фильтр - усилитель низкой (разностной) частоты - УНЧ - low pass filter - LPF. Этот фильтр выделяет колебание разностной частоты и усиливает его по мощности. Разностная частота на много порядков ниже частоты входных колебаний. Смысл использования процедуры гетеродинирования состоит в том, что аппаратурно гораздо легче обрабатывать колебания низких частот, чем колебания высоких частот – ВЧ - и сверхвысоких частот - СВЧ. В частности, на низкой частоте гораздо легче выполнять фазовые измерения, то есть измерять разность фаз электрических колебаний.

Фазовое детектирование. Фазовое детектирование - это операция, производимая над двумя гармоническими колебаниями с целью определения разности фаз этих колебаний. Фазовое детектирование используют в фазовых дальномерах и в спутниковых геодезических приемниках. Для иллюстрации процедуры фазового детектирования, как и для иллюстрации других операций, можно использовать схему на рисунке 1.1. Роль блока взаимодействия выполняет фазовый детектор. На входы фазового детектора подают гармонические колебания. Уровень выходного сигнала $S_{вых}$ фазового детектора зависит разности фаз φ входных колебаний.

Корреляционная обработка. Корреляционная обработка - это операция, производимая над колебаниями, с целью определения степени (коэффициента) их когерентности. Эта операция состоит в том, что колебания перемножают и вычисляют среднее значение результата перемножения. Обрабатываемые колебания являются широкополосными, то есть, содержат колебания многих частот. В большинстве практических случаев эти колебания содержат случайную компоненту, либо вообще являются случайными – шумовыми колебаниями.

В отличие от гармонических колебаний, сигналы, содержащие большое число гармоник и шумовые компоненты, могут быть не только полностью когерентны или полностью некогерентны. Они могут быть частично когерентными. Проще говоря, такие сигналы более или менее «похожи». Мерой когерентности колебаний является коэффициент корреляции:

$$k_{1,2} = \frac{K_{1,2}}{\sqrt{I_1 \cdot I_2}} \quad . \qquad (1.7)$$

В этой формуле I_1 и I_2 - дисперсии колебаний. $K_{1,2}$ - функция корреляции этих колебаний. Функцию корреляции оценивают по реализациям случайных функций $S_1(t)$ и $S_2(t)$, используя формулу:

$$K_{1,2} = \overline{S_1(t) \cdot S_2(t)} \ . \qquad (1.8)$$

Здесь и далее, в последующих формулах и выкладках, верхняя черта означает осреднение по времени.

Алгоритм (1.8) реализуют при корреляционной обработке колебаний (сигналов). Роль блока взаимодействия, смотри рисунок 1.1, выполняет коррелятор. На его входы подают два сигнала $S_1(t)$ и $S_2(t)$. Коррелятор перемножает эти сигналы и осредняет результат перемножения по времени. Мощность выходного сигнала коррелятора пропорциональна коэффициенту корреляции входных сигналов.

Процедуру корреляционной обработки используют в радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и в спутниковых системах глобального позиционирования для поиска максимума коэффициента корреляции двух сигналов. Сигналы приходят на входы коррелятора, пройдя пути разной длины. Поэтому один из сигналов приходит на вход коррелятора. с некоторой временной задержкой τ относительно другого сигнала. Коэффициент корреляции этих двух сигналов достигает максимума тогда и только тогда, когда эта относительная задержка равна нулю: $\tau=0$. Графически это показано на рисунке 1.5.

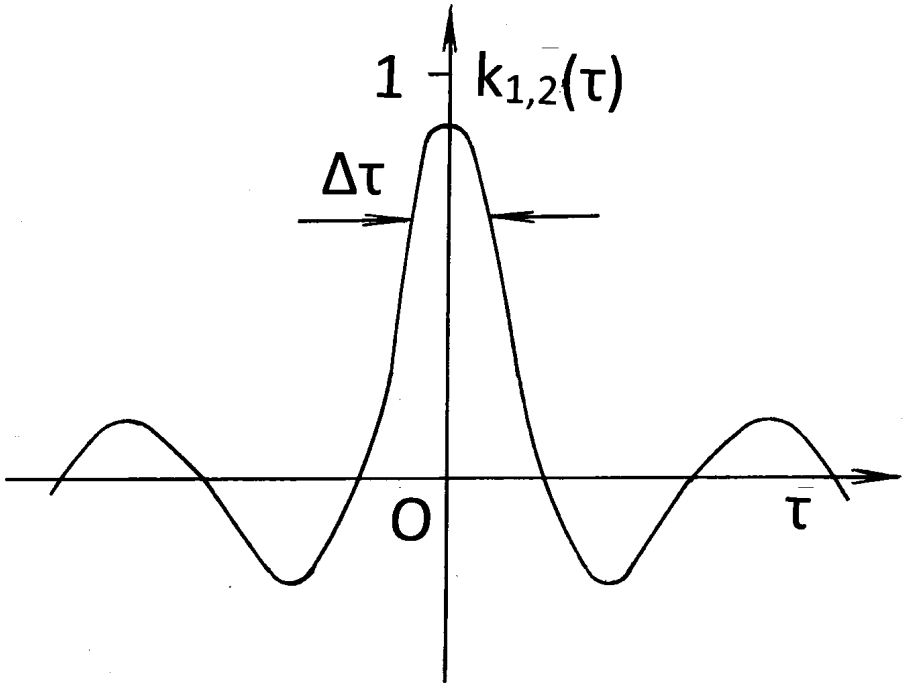

Рисунок 1.5. ***Коэффициент корреляции***

Ширина $\Delta\tau$ главного максимума функции коэффициента корреляции зависит от ширины спектра сигналов, подвергаемых корреляционной обработке. Чем шире спектр сигналов, тем меньшую ширину имеет главный максимум функции коэффициента корреляции. Следовательно, чем шире спектр принимаемых, регистрируемых и обрабатываемых сигналов, тем с большей точностью можно определить относительный временной сдвиг τ этих сигналов, вводя в один из них дополнительную задержку.

Достоинством корреляционной обработки является то, что на результат этой обработки шумовые помехи, неизбежно сопровождающие сигналы, оказывают малое влияние. Рассмотрим два «полезных» сигнала S_1 и S_2, имеющих общее происхождение и подлежащих корреляционной обработке. Оба сигнала сопровождаются случайными шумами (помехами) S_{n1} и S_{n2}, имеющими независимое друг от друга и от полезных сигналов происхождение. Эти шумовые помехи не коррелированы друг с другом и не коррелированы с полезными сигналами. Формула для функции корреляции $K'_{1,2}$ сигналов S_1 и S_2, содержащих шумовые помехи S_{n1} и S_{n2}, имеет вид:

$$K'_{1,2} = \overline{(S_1 + S_{n1}) \cdot (S_2 + S_{n2})} = \overline{S_1 \cdot S_2} + \overline{S_1 \cdot S_{n2}} + \overline{S_2 \cdot S_{n1}} + \overline{S_{n1} \cdot S_{n2}} \quad . \quad (1.9)$$

Три последние слагаемые в этом выражении равны нулю, так как входящие в них сомножители некоррелированы. Поэтому значение функции корреляции $K'_{1,2}$ искаженных шумами сигналов, равна значению функции корреляции $K_{1,2}$ этих же сигналов, но свободных от влияния шумов:

$$K'_{1,2} = K_{1,2} \ . \qquad (1.10)$$

Равенство (1.10) справедливо в том случае, если интервал времени осреднения (интегрирования) бесконечно велик. На практике интервал осреднения конечен и результат корреляционной обработки содержит остаточное влияние шумов. Это остаточное влияние тем меньше, чем больше отношение (сигнал)/(шум) - (signal)/(noise) ratio - SNR.

<u>Когерентность электромагнитных колебаний и волн</u>

Корреляционная обработка колебаний (сигналов), также, как и аддитивная обработка колебаний, позволяет оценивать степень (коэффициент) когерентности этих колебаний. Степень (коэффициент) когерентности колебаний обозначают γ. Если γ=0, то колебания полностью некогерентны: между ними нет ничего общего из-за того, что они порождены разными источниками. Если γ=1, то колебания полностью когерентны, идентичны, являются копиями друг друга. Необходимым условием этой идентичности является общее происхождение этих колебаний, то есть, необходимо, что эти колебания были бы порождены одним и тем же источником. Если величина γ лежит в пределах от 0 до 1, то говорят и пишут, что колебания «частично когерентны». Другими словами, эти колебания похожи, но не являются копиями друг друга.

Коэффициент когерентности представляют в виде:

$$\gamma = \gamma(0) \cdot \gamma(\tau) \ . \qquad (1.11)$$

В этом выражении $\gamma(0)$ - коэффициент пространственной когерентности колебаний; $\gamma(\tau)$ - коэффициент временной когерентности колебаний.

Признаком наличия или отсутствия когерентности электромагнитных колебаний является наличие (или отсутствие) явления интерференции этих колебаний. Явление интерференции световых колебаний, лежащих в области видимого для человека спектра колебаний, возможно наблюдать зрительно. Явление интерференции радиоволн наблюдают с использованием электронной аппаратуры, предварительно преобразовав электромагнитные колебания радиодиапазона в электрические колебания.

<u>Пространственная когерентность.</u> Ситуацию иллюстрирует рисунок 1.6. Выберем два пучка SA и SB электромагнитных колебаний (волн), распространяющихся от источника S. При этом длины оптических (электрических) путей SA и SB электромагнитных колебаний одинаковы.

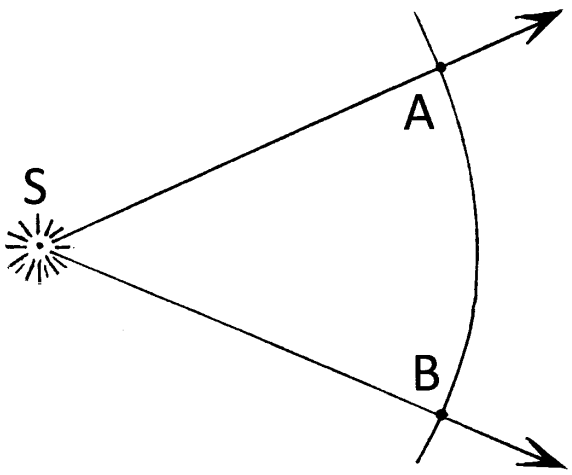

Рисунок 1.6. ***Иллюстрация понятия пространственной когерентности***

Если электромагнитные колебания, принятые и зарегистрированные в точках А и В, хотя бы частично когерентны, то есть, коэффициент их когерентности больше нуля: $\gamma > 0$, то говорят и пишут, что эти электромагнитные колебания, порожденные источником S, обладают пространственной когерентностью. Индекс (0) означает, что разность хода этих двух электромагнитных колебаний (относительная задержка) равна нулю. Коэффициент пространственной когерентности зависит от длинны волны электромагнитного колебания и от углового (видимого из точек А и В) диаметра источника S электромагнитного излучения. Чем больше длина волны электромагнитного колебания и чем меньше угловой диаметр источника S радиоизлучения, тем больше коэффициент пространственной когерентности.

Для находящегося на земной поверхности наблюдателя передающая антенна спутника системы глобального позиционирования представляет собой точечный источник радиоизлучения. Следовательно, это радиоизлучение обладает большой степенью пространственной когерентности. Написанное справедливо и для радиоизлучения квазаров, которые наблюдают методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой.

<u>Временная когерентность.</u> Ситуацию иллюстрирует рисунок 1.7. Точки А и В лежат на одном пучке (луче) распространения электромагнитного колебания. Обозначим расстояние между этими точками $l = \tau \cdot V$. Здесь V – скорость распространения электромагнитного колебания (волны), τ - временная задержка прихода волны в точку В относительно точки А.

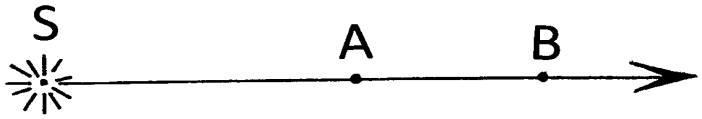

Рисунок 1.7. ***Иллюстрация понятия временной когерентности***

Если электромагнитные колебания, принятые и зарегистрированные в точках А и В хотя бы частично когерентны, то есть коэффициент их когерентности больше нуля: $\gamma > 0$, то говорят и пишут, что электромагнитное колебание, порожденное источником S, обладает временной когерентностью. При увеличении расстояния между точками А и В когерентность электромагнитных колебаний в этих точках уменьшается. Максимальные значения l_{max} и τ_{max}, при которых сохраняется ненулевая когерентность электромагнитных колебаний в точках А и В, называют, соответственно, «длиной когерентности» и «временем когерентности». Значения длины и времени когерентности зависят от ширины амплитудного спектра электромагнитного излучения источника. Чем шире амплитудный спектр электромагнитного колебания, тем меньше длина и время когерентности. Например, у белого света, обладающего очень широким спектром, длина и время когерентности близки к нулю, а у лазерного излучения, являющегося почти монохроматическим, длина и время когерентности стремятся к бесконечности.

Спутник системы глобального позиционирования излучает колебания радиодиапазона в широкой полосе частот. Эти колебания обладают малой длиной когерентности и малым временем когерентности. Именно это обстоятельство позволяет, при выполнении наблюдений в навигационном кодовом режиме, с высокой точностью измерять (определять) интервал времени τ, который затрачивает сигнал спутника на прохождение расстояния от спутника до антенны работающего в навигационном режиме спутникового приёмника. Квазары излучают шумовые колебания в широкой полосе радиочастот и это радиоизлучение обладает малой длиной когерентности и малым временем когерентности. Работающие в режиме радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой радиотелескопы принимают и регистрируют радиоизлучение квазаров в широкой полосе частот, составляющей несколько сотен мегагерц. Именно это обстоятельство позволяет с высокой точностью измерять (определять) временную задержку τ, с который радиоизлучение квазара приходит на антенну одного радиотелескопа относительно антенны другого радиотелескопа.

Глава 7. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

При написании этого раздела использованы следующие работы: [1, Баранов, 1986], [21, Крылов, 2002], [31, Прилепин, 1983], [40, Урмаев, 1981], [43, Шануров, 2001], [51, IERS, 1996], [56, NASA, 1991], и [52, Jekeli, 2006].

Приведённые в главе 2 понятие инерциальной системы координат, то есть ICRS, и понятие земной системы координат, то есть ITRS являются понятиями идеальными. Для того, чтобы геодезисты и навигаторы могли использовать систему координат в своей практической деятельности, необходимо, чтобы эта система координат удовлетворяла требованию «реализуемости» - «realizability». Это означает, что система координат должна быть фиксирована (закреплена) физически существующими пунктами и/или объектами. Необходимо также, чтобы эти пункты и/или объекты удовлетворяли также требованию «доступности» - «availability». Это означает, что на этих пунктах возможно установить геодезическую или навигационную аппаратуру, либо эти объекты возможно наблюдать с использованием геодезической или навигационной аппаратуры.

Таковыми объектами, фиксирующими инерциальную систему координат, являются квазары. Соответствующая практическая реализация инерциальной системы координат в рамках учебного пособия, названа квазиинерциальной системой координат. Международно принятым её названием является International Celestial Reference Frame (ICRF) – Международная Небесная Референцная Основа. Пунктами, наилучшим образом фиксирующими земную геоцентрическую систему координат, являются пункты глобальной геодезической сети. Соответствующая практическая реализация земной системы координат, в рамках учебного пособия, названа квазигеоцентрической системой координат. Международно принятым её названием является International Terrestrial Reference Frame (ITRF) – Международная Референцная Основа. Координацию международной деятельности по заданию и реализации ICRF и ITRF осуществляет Международная Службы Вращения Земли и Референцных Систем Координат – International Earth Rotation and Reference Systems Servise – IERS.

В соответствии с формулой (6.12), координаты вектора $\vec{D}$, соединяющего пункты глобальной геодезической сети, выраженные в квазигеоцентрической системе координат, и координаты этого же вектора, выраженные в квазиинерциальной системе координат, связывают, используя матрицу R. Аргументами этой матрицы являются Параметры Вращения Земли (ПВЗ) – Earth Rotation Parameters (ERP). Параметры Вращения Земли называют также Параметрами Ориентации Земли – Earth Orientation Parameters (EOP). Параметрами Ориентации Земли являются угловые величины, которые определяют ориентацию мгновенной оси суточного вращения Земли в квазиинерциальной системе координат. Параметрами Ориентации Земли являются координаты мгновенного полюса Земли относительно Международного Условного Начала - Условного Земного Полюса. Параметрами Ориентации Земли являются параметры прецессии и нутации. Параметрами Ориентации Земли являются вариации в скорости суточного вращения Земли. Параметры Ориентации Земли определяют с

ошибками в одну тысячную долю угловой секунды, то есть в миллисекунду, используя именно метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой.

Практическая реализация инерциальной системы координат

Для того, чтобы на миллисекундном уровне точности практически реализовать квазиинерциальную систему координат, существуют две возможности. Первая возможность состоит в том, чтобы наблюдать квазары методом РСДБ. Как написано, квазары - это естественные небесные объекты, находящиеся на расстояниях от Земли в миллиарды световых лет. По причине столь большой удаленности от Земли квазары не имеют заметных, на уровне миллисекунды, собственных движений. Следовательно, направления на квазары фиксируют квазиинерциальную систему координат ICRF именно на уровне ошибки в тысячную долю угловой секунды. Начало квазиинерциальной системы координат совмещено с барицентром, то есть, с центром масс Солнечной Системы. Основой квазиинерциальной системы координат является фундаментальный каталог, содержащий координаты 212 квазаров. Эти координаты определены и фиксированы с ошибкой в одну миллисекунду. Фундаментальный каталог включает также координаты 118218 видимых в оптическом диапазоне звёзд, определённых в ходе миссии HIPPARCOS.

Вторая возможность практически реализовать квазиинерциальную систему координат состоит в том, чтобы, реализуя метод лазерной локации, наблюдать искусственные спутники Земли LAGEOS и ЭТАЛОН. Инструментом наблюдения является спутниковый лазерный светодальномер. Фотография такого светодальномера приведена на рисунке 7.1, [wikipedia.org]. Фотография спутникового лазерного светодальномера дана также на рисунке 5.10.

Рисунок 7.1. ***Спутниковый лазерный светодальномер***

Геодезические искусственные спутники Земли

Вокруг Земли вращаются предназначенные для решения задач геодезии и геодинамики искусственные спутники LAGEOS и ЭТАЛОН. На рисунке 7.2 приведена фотография американского спутника LAGEOS, [cidorova.ru].

Рисунок 7.2. ***Спутник LAGEOS***

Спутник LAGEOS - Laser GEOdinamic Satellite - представляет собой сферу диаметром в 60 сантиметров и имеет массу около 400 килограммов. На поверхности спутника укреплены 426 трипельпризменных отражателей. Существуют два спутника: LAGEOS-1 и LAGEOS-2. Эти спутники запущены, соответственно, в 1976 и в 1992 году. Спутники расположены на круговых орбитах. Плоскости этих орбит имеют угол наклона к плоскости экватора, соответственно, в 110 градусов и в 53 градуса. Спутники LAGEOS находятся на орбитах высотой над земной поверхностью в 5900 километров. Период обращения этих спутников равен 3 часам и 45 минутам.

Существуют два российских спутника ЭТАЛОН. Конструкция спутника ЭТАЛОН аналогична конструкции спутника LAGEOS. Фотография спутника ЭТАЛОН приведена на рисунке 7.3, [kik-sssr.ru].

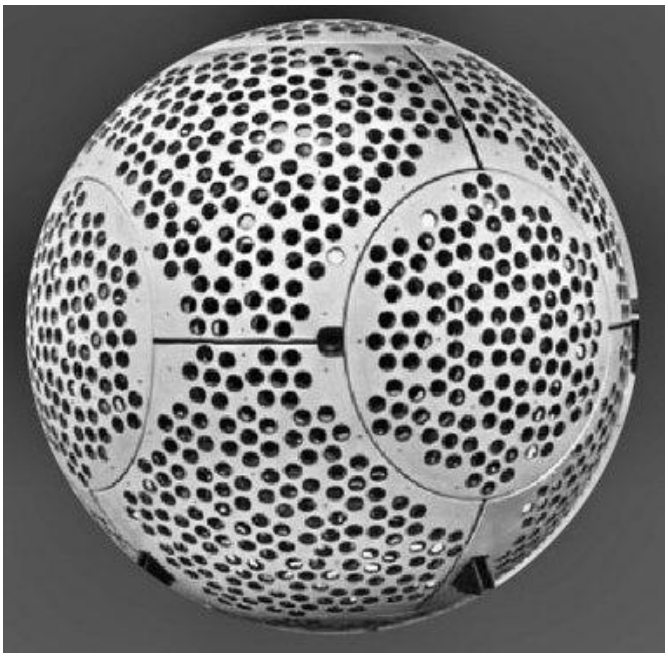

Рисунок 7.3. ***Спутник ЭТАЛОН***

Спутники ЭТАЛОН находятся на орбитах, высота которых над земной поверхностью равна высоте орбит спутников ГЛОНАСС, то есть, эти спутники находятся высоте 19100 километров. Такая высота орбит спутников ЭТАЛОН даёт возможность изучать структуру гравитационного поля Земли именно на высоте движения спутников ГЛОНАСС и позволяет уточнять эфемериды спутников ГЛОНАСС. Наблюдая методом лазерной локации спутники LAGEOS и ЭТАЛОН, получают координаты расположенных на станциях слежения спутниковых лазерных дальномеров в квазигеоцентрической системе координат с ошибкой в один сантиметр.

Практическая реализация земной системы координат

Геодезическая квазигеоцентрическая система координат связана с Землей и является условной - conventional, то есть заданной по официальной договоренности между компетентными и уполномоченными на это специалистами. Глобальную геодезическую квазигеоцентрическую систему координат фиксируют пункты глобальной геодезической сети. Как написано, эта сеть носит название Международной Земной Референцной Основы - International Terrestrial Reference Frame – ITRF. Местоположение некоторых из пунктов глобальной геодезической сети, созданной с использованием метода РСДБ и метода лазерной локации искусственных спутников Земли, представлено на рисунке 7.4, [itrf.ign.fr].

Рисунок 7.4. ***Основные станции ITRF***

На пунктах глобальной геодезической сети расположены и работают радиотелескопы. Кроме того, на пунктах глобальной геодезической сети ITRF установлены и работают лазерные спутниковые светодальномеры. Это позволяет объединить результаты, полученные методом РСДБ и методом лазерной локации искусственных спутников Земли. Такое объединение позволяет отнести координаты векторов баз, определённых методом РСДБ, к центру масс Земли с ошибкой, не превышающей нескольких сантиметров. Кроме этого, имеется возможность взаимно контролировать результаты, полученные этими независимыми друг от друга методами.

Длины сторон глобальной геодезической сети достигают нескольких тысяч километров. Как написано, координаты пунктов глобальной геодезической сети и разности координат этих пунктов определены с ошибками, лежащими в пределах одного сантиметра. На таком уровне точности необходимо учитывать деформации поверхности земной коры вследствие движений литосферных (геотектонических) плит. Материки взаимно перемещаются со скоростью до 10 сантиметров в год. На рисунке 7.5 приведена схема литосферных плит и геотектонических разломов, разделяющих эти плиты, [www.dslib.net/geo-kartografia/kartografirovanie-geodinamicheskih-processov.html].

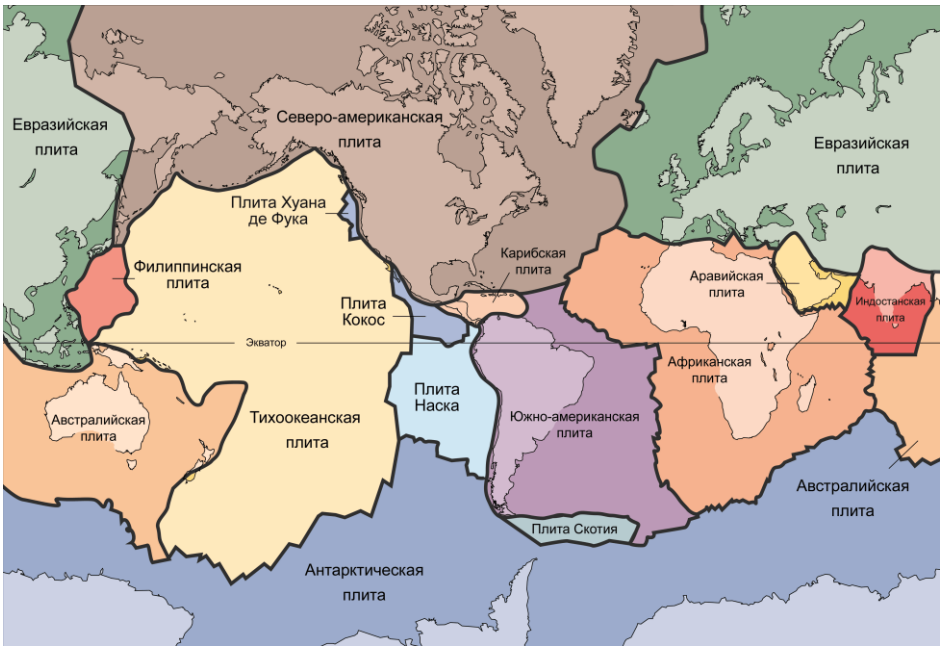

Рисунок 7.5. ***Литосферные плиты и геотектонические разломы***

Именно по причине того, что земная кора постоянно деформируется, каталог координат пунктов глобальной геодезической сети обновляют почти ежегодно. При создании обновлённого каталога координат пунктов глобальной геодезической сети используют геофизические модели, учитывающие относительное перемещение литосферных плит. Накопленные результаты измерений используют для уточнения параметров этих геофизических моделей.

Геодезической сетью, сгущающей ITRF, является сеть станций IGS – International GNSS Service – Международная Служба Спутниковых Систем Глобальной Навигации. На рисунке 7.6 показана сеть станций IGS, [sonel.org].

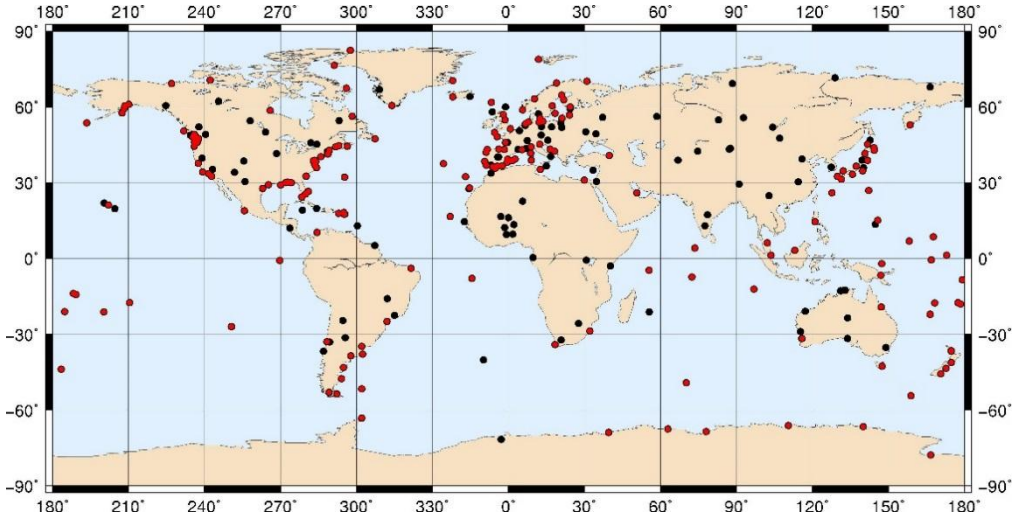

Рисунок 7.6. ***Станции сети IGS***

На рисунке 7.7 представлена стация IGS, совмещённая с радиотелескопом, представляющим собой станцию глобальной сети ITRF, [igscb.jpl.nasa.gov].

Рисунок 7.7. ***Станция сети ITRF, совмещённая со станцией сети IGS***

Станция сети IGS представляет собой постоянно действующую референцную станцию, то есть, работает в геодезическом фазовом режиме. Одновременно каждая постоянно действующая референцная станция является и дифференциальной станцией, то есть работает в кодовом режиме и предназначена для осуществления режима дифференциальной навигации.

Глава 8. СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ГЕОДЕЗИИ И В НАВИГАЦИИ

В этой главе, в дополнение к написанному в предшествующих главах учебного пособия, дано разъяснение основных терминов, используемых специалистами, работающими в области геодезии и навигации. Смысл терминов остался прежним, но имеются дополнения и изменения в форме изложения этих терминов.

Барицентр. Центр масс Солнечной Системы.

ГЛОНАСС. Система глобальной спутниковой навигации. Находится под управлением Министерства Обороны Российской Федерации.

Дифференциальная станция. Представляет собой навигационный спутниковый приёмник, установленный на пункте с известными точными геодезическими координатами и аппаратуру, транслирующую по каналам связи дифференциальные поправки.

Дифференциальные поправки. Разности точных геодезических координат дифференциальной станции и мгновенных значений координат дифференциальной станции, полученных навигационным спутниковым приёмником.

Земная система координат. Система координат, фиксированная относительно Земли и совершающая суточное вращение вместе с Землёй.

Земной эллипсоид. Эллипсоид, поверхность которого наилучшим образом соответствует поверхности геоида. Признаком соответствия является минимум суммы квадратов отклонений поверхности земного эллипсоида от поверхности геоида.

Инерциальная система координат. Система координат, не испытывающая вращения; система координат, в которой справедливы законы Ньютона.

Кодирование колебания. Модулирование (модуляция) колебания сигналом, несущим информацию.

Корреляционная обработка сигналов. Процедура обработки сигналов, позволяющая определить степень когерентности этих сигналов. Два сигнала перемножают и осредняют по времени результат этого перемножения.

Лазерная локация искусственных спутников Земли. Метод измерения расстояний (дальностей) с помощью лазерных импульсных светодальномеров до искусственных спутников Земли LAGEOS и ЭТАЛОН. Этот метод используют, совместно с методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, для создания глобальной геодезической сети и для задания общеземной системы координат.

Навигация спутниковая. Синоним термина «позиционирование спутниковое».

Общеземной эллипсоид. Земной эллипсоид, поверхность которого соответствует поверхности глобального геоида. Центр общеземного

эллипсоида совпадает с центром масс Земли. Объём общеземного эллипсоида равен объёму глобального геоида, угловая скорость суточного вращения общеземного эллипсоида равна угловой скорости суточного вращения Земли.

Позиционирование спутниковое. Определение мгновенных значений координат подвижного носителя спутникового приёмника, а также определение мгновенных значений скорости перемещения и азимута перемещения этого подвижного носителя.

Постоянно действующая референцная станция. Референцная станция, находящаяся на пункте с известными координатами и транслирующая по кагалам связи необработанные «сырые» записи сигналов, принятых со спутников системы глобального позиционирования.

Преобразование систем координат. Процедура перевычисления координат пункта или координат вектора, соединяющего два пункта, из одной системы координат в другую систему координат.

Прямоугольная геодезическая система координат. Трёхмерная декартова система координат X, Y, Z. Начало общеземной прямоугольной геодезической системы координат совмещено с центом масс Земли, то есть, совпадает с центром общеземного эллипсоида. Ось Z совпадает с малой осью общеземного эллипсоида, фиксированной на исходную фундаментальную эпоху, и имеет положительное направление в сторону севера; ось X представляет собой пересечение плоскости геодезического экватора и плоскости начального Гринвичского меридиана; ось Y дополняет прямоугольную геодезическую систему координат до правой.

Псевдодальность. Результат определения, в кодовом навигационном режиме измерений, дальности от антенны спутникового приёмника до антенны спутника. Этот результат искажён ошибкой за несинхронность показаний часов спутникового приёмника относительно показаний часов спутника системы глобального позиционирования.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ). Метод, используемый совместно с лазерной локацией искусственных спутников Земли для создания глобальной геодезической сети и для задания общеземной системы координат. Методом РСДБ с помощью радиотелескопов наблюдают квазары.

Референцная станция. Геодезический спутниковый приёмник, установленный на пункте с известными координатами.

Референц–эллипсоид. Земной эллипсоид, поверхность которого соответствует поверхности геоида на части земной поверхности: на территории одной страны или на территории группы соседствующих стран. Примером референц-эллипсоида является эллипсоид Ф.Н. Красовского.

Система времени. Способ хранения времени и способ измерения длительности интервалов времени.

Система геодезических координат. Единый для данной геодезической сети условный способ задания геодезических координат пунктов этой геодезической сети.

Система отсчёта. Совокупность системы координат и системы

времени.

Спутниковая геодезия. Техническая дисциплина; совокупность средств и методов, позволяющая решать задачи геодезии на основе результатов наблюдений искусственных спутников Земли.

Трансформирование координат. Преобразование (перевычисление) координат пунктов геодезической сети из одной системы геодезических координат в другую систему геодезических координат.

Эллипсоидальная геодезическая система координат. Криволинейная система координат. Координаты пункта геодезической сети в эллипсоидальной геодезической системе координат задают в виде геодезической широты B, в виде геодезической долготы L и в виде геодезической высоты H этого пункта. Эллипсоидальные геодезические координаты пункта определяются нормалью к поверхности земного эллипсоида, опущенной из этого пункта на поверхность земного эллипсоида.

Эталон метра. Расстояние, которое свет (электромагнитная волна) проходит в вакууме за интервал времени, равный 1/299792458 доле секунды.

Эфемериды спутника. Набор параметров, определяющих форму и размеры орбиты искусственного спутника Земли, ориентацию этой орбиты в инерциальном пространстве, а также положение искусственного спутника Земли на орбите на момент (эпоху) наблюдений.

ICRS. International Celestial Reference System – Международная Небесная Система Отсчёта. Система отсчёта, составными частями которой является инерциальная система координат и барицентрическое динамическое время. Начало инерциальной системы координат совмещено с барицентром.

ICRF. International Celestial Reference Frame – Международная Небесная Референцная Основа. ICRF представляет собой практическую реализацию ICRS. Основой ICRF является каталог, содержащий, в настоящее время, координаты 212 квазаров и координаты 118218 видимых звёзд. Основой ICRF является также барицентрическое динамическое время.

ITRS. International Terrestrial Reference System – Международная Земная Система Отсчёта. Составными частями ITRS является общеземная система координат и геоцентрическое координированное время.

ITRF. International Terrestrial Reference Frame – Международная Земная Референцная Основа. ITRF представляет собой практическую реализацию ITRS. Основой ITRF является каталог координат пунктов глобальной геодезической сети и геоцентрическое координированное время.

NAVSTAR (GPS). Система глобальной спутниковой навигации, система глобального спутникового позиционирования. Находится под управлением Департамента Обороны – Department of Defense (DoD) - Соединённых Штатов Америки.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Баранов, 1986] Баранов В.Н., Бойко Е.Г., Краснорылов И.И. и др. Космическая геодезия. Москва. Недра. 1986. 407 с.
2. [Бин, 1971] Бин Б.Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. Перевод с английского. Москва. Гидрометеоиздат. 1971. 234 с.
3. [Борн, 1973] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Москва. Наука. 1973. 720 с.
4. [Бурдун, 1980] Бурдун Г.Д. Справочник по международной системе единиц. Москва. Издательство стандартов. 1980. 123 с.
5. [Вентцель, 1975] Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. Москва. Наука. 1975. 320 с.
6. [Галазин, 1998] Галазин В.Ф., Каплан Б.Л. и др. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Под общей редакцией Хвостова В.В. Москва. Координационный научно - информационный центр. 1998. 40 с.
7. [ГЛОНАСС, 2002] Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.0. Координационный научно-информационный центр. 2002. 57 с.
8. [Голубев, 1985] Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогеодезические и электрооптические измерения. Москва. Недра. 1985. 303 с.
9. [Голубев, 1991] Голубев А.Н., Ханов В.А. Лазерная интерферометрия больших расстояний. Москва. Недра. 1991. 134 с.
10. [Голубев А., 1991] Голубев А.Н. Приборы и методы электронной дальнометрии и тахеометрии. Справочное пособие «Геодезия». Геодезические и фотограмметрические приборы. Под редакцией Савиных В.П. и Ященко В.П. Москва. Недра. 1991. 189-249 с.
11. [Голубев А., 2001] Голубев А.Н. Глобальные спутниковые навигационно - геодезические системы. Основные принципы устройства и работы. Москва. МИИГАиК. 2001. 66 с.
12. [Голубев, 2003] Голубев А.Н. Основы геотроники. Электронные методы и средства геодезических измерений. Москва. МИИГАиК. 2003. 87 с.
13. [Голубев, 2013] Анатолий Голубев. Основы геотроники. Электронные методы и средства геодезических измерений. Palmarium Academic Publishing, 2013, 133 с.
14. [Глумов, 1983] Глумов В.П. Основы морской геодезии. Москва. Недра. 1983. 184 с.
15. [Глушков, 2002] Глушков В.В., Насретдинов К.К., Шаравин А.А. Космическая геодезия: методы и перспективы развития. Москва. Национальная картографическая корпорация. 2002. 444 с.
16. [Жеребцов, 1964] Жеребцов И.П. Введение в технику дециметровых и сантиметровых волн. Москва. Ленинград. Энергия. 1964. 146 с.

17. [Жуков, 2002] Жуков А.В., Серапинас Б.Б. Практикум по спутниковому позиционированию. Москва. Издательство московского государственного университета. 2002. 119 с.
18. [Закатов, 1976] Закатов П.С. Курс высшей геодезии. Москва. Недра. 1976. 511 с.
19. [Камен, 1982] Камен Х. Электронные способы измерений в геодезии. Перевод с немецкого. Москва. Недра. 1982. 256 с.
20. [Краус, 1973] Краус Д. Джон. Радиоастрономия. Перевод с английского. Москва. Советское радио. 1973. 456 с.
21. [Крылов, 2002] Крылов В.И. Космическая геодезия. Москва. МИИГАиК. 2002. 168 с.
22. [Крылов, 2003] Крылов В.И. Введение в теорию систем отсчета. Москва. МИИГАиК. 2003. 90 с.
23. [Липкин, 2001] Липкин И.А. Спутниковые навигационные системы. Москва. Вузовская книга. 2001. 288 с.
24. [Лобачев, 1980] Лобачев В.М. Радиоэлектронная геодезия. Москва. Недра. 1980. 212 с.
25. [Маркузе, 1994] Маркузе Ю.И., Бойко Е.Г., Голубев В.В. Геодезия. Вычисление и уравнивание геодезических построений. Москва. Картгеоцентр и Геодезиздат. 1994.
26. [Морозов, 1969] Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии. Москва. Недра. 1969. 304 с.
27. [Огородова, 2006] Огородова Л.В. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая геодезия. Москва, Геодезкартиздат. 2006. 381 с.
28. [Одуан, 2002] Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. Москва. Техносфера. 2002. 399 с.
29. [Пеллинен, 1978] Пеллинен Л.П. Высшая геодезия. Теоретическая геодезия. Москва. Недра. 1978. 263 с.
30. [Поваляев, 1994] Поваляев А.А. Спутниковые радиосистемы управления движением в околоземном пространстве. Москва. Издательство МАИ. 1994. 40 с.
31. [Прилепин, 1983] Прилепин М.Т., Шануров Г.А. Метод длиннобазисной интерферометрии и его геодезические приложения. Итоги науки и техники. ВИНИТИ. Геодезия и аэросъемка. 1983. Том 21. с. 66-105.
32. [Саастамойнен, 1975] Саастамойнен Ю. Тропосферная и стратосферная поправки радиослежения ИСЗ. В сборнике: “Использование искусственных спутников для геодезии”. Под редакцией Хенриксена С., Манчини А., Човица Б. Перевод с английского. 1975, с. 348-356.
33. [Свешников, 1961] Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. Ленинград. Судпромгиз. 1961. 252 с.
34. [Серапинас, 1998] Серапинас Б.Б. Основы спутникового позиционирования. Издательство московского университета. Москва. 1998. 82 с.

35. [Сколник, 1976] Справочник по радиолокации. Перевод с английского. Редактор Сколник М. Москва. Советское радио. 1976. Тома 1,2,3.
36. [Соловьёв, 2003] Спутниковая навигация и её приложения. М., ЭКО-ТРЕНДЗ. 2003. 326 с.
37. [Спиридонов, 2003] Спиридонов А.И. Основы геодезической метрологии. Москва. Картгеоцентр - Геодезиздат. 2003. 247 с.
38. [Томпсон, 1989] Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. Перевод с английского. Москва. Мир. 1989. 568 с.
39. [Тюрин, 1976] Тюрин Н.И. Введение в метрологию. Москва. Издательство стандартов. 1976. 108 с.
40. [Урмаев, 1981] Урмаев М.С. Орбитальные методы космической геодезии. Москва. Недра. 1981. 256 с.
41. [Харисов, 1999] Харисов В.Н. и др. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. Москва. ИПРЖР. 1999.
42. [Христиансен, 1972] Христиансен У., Хегбом И. Радиотелескопы. Перевод с английского. Москва. Мир. 1972. 238 с.
43. [Шануров, 2001] Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ. Москва. МИИГАиК. 2001. 136 с.
44. [Шерклифф, 1965] Шерклифф У. Поляризованный свет. Москва. Мир. 1965. 120 с.
45. [Яковлев, 1982] Практикум по высшей геодезии. Под редакцией проф. Яковлева Н.В. Москва. Недра. 1982. 368 с.
46. [Яковлев, 1989] Яковлев Н.В. Высшая геодезия. Москва. Недра. 1989. 445 с.
47. [Brown, 1974] Brown H.H., Twiss A.B. The intensity interferometer. London. 1974. p. 320.
48. [GLONASS, 1995] Global satellite navigation system GLONASS. Interface control document. Moscow. Military Space Forces RF. 1995.
49. [GPS NAVSTAR] Global Positioning System. http://www.navcen.uscg.mil/pubs/gps/sigspec.
50. [Hofmann] B. Hofmann-Wellenhoff, H. Lichtenegger, J. Collins. Global Positioning System. Theory and Practice. Second eddition. Springer-Verlag. Wien. New York. p. 326.
51. [IERS] IERS Technical Note № 21 (IERS Conventions 1996) – http://www.iers.org/iers/earth/itrs/itrs.html
52. [Jekeli, 2006] Christopher Jekeli. Geometric Reference Systems in Geodesy. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth Sciences. Ohio State University. July 2006, p. 202.
53. [Laurila, 1976] Laurila H.S.J. Electronic surveying and navigation. N.Y. John Wiley and Sons. 1976.
54. [Laurila, 1983] Laurila H.S.J. Electronic surveying in practice. N.Y. John Wiley and Sons. 1983.

55. [Mueller, 1969] Mueller I.I. Spherical and practical astronomy as applied to geodesy. F. Urgar. N.Y. 1969.
56. [NASA, 1991] NASA TM 104552 Crustal Dynamics Project. Data Analysis - 1991. VLBI Geodetic Results 1979-1990.
57. [Phillips, 1984] Phillips A.H. Geometrical determination of PDOP. “Navigation” (USA), 1984-1985, 31, #4, pp. 329-337.
58. [Shanourov, 2000] Shanourov G.A, Robles J. Fundamentos de geodesia superior y geotronica. Universidad Politecnica de Madrid. Madrid, 2000, p. 148.
59. [Torge, 1991] Torge W. Geodesy. Walter de Gruyter. Berlin - New York. 1991.

Рассмотрены современные электронные методы и средства геодезии и навигации. Подавляющий объём измерений в этих областях выполняют с использованием спутниковых приёмников, входящих в состав спутниковых систем глобального позиционирования GPS Navstar и ГЛОНАСС. Глобальную геодезическую сеть развивают сочетанием радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой и метода лазерной локации искусственных спутников Земли. Описаны принципы работы наземной радиоэлектронной навигационной и геодезической аппаратуры. Основное внимание уделено созданию опорных геодезических сетей с использованием спутниковых систем глобального позиционирования.

Шануров Геннадий Анатольевич - доктор технических наук по специальности "геодезия"; область научных исследований: использование РСДБ и спутниковых систем глобального позиционирования в геодезии; профессор кафедры высшей геодезии МИИГАиК, приглашённый профессор (Profesor Visitante) Мадридского Политехнического Университета.

978-3-659-88549-5