

## Глава 9

# Применение сверхточного времени и частоты

Измерения времени являются присущими везде, где вопрос касается частоты или времени часов. Обычные наручные часы, использующиеся для организации нашей повседневной деятельности, являются точным инструментом. Нестабильность кварцевых наручных часов может быть меньше  $10^{-7}$  за один день. Некоторые часы автоматически подстраиваются по сигналам времени, связанным с лучшими цезиевыми стандартами. Таким образом, мы можем носить часы, точность частоты которых остается в пределах  $10^{-14}$  при условии усреднения за несколько миллионов лет. В наших собственных домах мы окружены сигналами времени и частоты: таймерами, компьютерными часами, радиоприемниками, беспроводными телефонами и т.д. Многие системы и службы зависят от времени: телекоммуникации, телевидение, энергоснабжение, определение местоположения.

Было бы интересно поупражняться, выбрав относительную нестабильность частоты, например  $10^{-10}$  и определить, какая деятельность стала бы невозможной, если бы не было стандартов частоты, способных перешагнуть за этот предел. Ясно, что глобальная система определения положения и массовое ее применение не могли бы существовать. Не существовало бы также международное атомное время, так как астрономы удерживали бы контроль мировых шкал времени. Космическая геодезия была бы недостаточно точна, чтобы давать вклад в геофизику. Должны бы предприниматься некоторые меры на различных уровнях точности. К сожалению мы должны признать, что мы неспособны обеспечить исчерпывающее рассмотрение различных случаев. Мы можем только пригласить читателя проследить историческую эволюцию техники, в частности, космической техники и телекоммуникации, где измерение времени является ключевым элементом.

В качестве примера мы приведем ряд применений измерения времени с использованием лучших стандартов, либо самых точных, либо самых стабильных на различных временах выборки, или тех стандартов, которые обеспечивают хороший компромисс между точностью и стабильнос-

тью с одной стороны и надежностью с другой стороны. В действительности если мы хотим получить надежные и удобные инструменты, то в большинстве применений мы должны допустить незначительное их ухудшение по отношению к качеству лабораторных стандартов. Для таких применений производятся тысячами промышленные рубидиевые и цезиевые часы и иногда даже используются водородные мазеры.

Какова цель применения этих инструментов? Их основное применение сконцентрировано в трех различных направлениях. Первое, измерение интервалов времени и частот, например, в измерениях расстояния с помощью радаров или лазерных дальномеров. Второе возникает в системах, основанных на синхронизме часов, как в случае глобальной системы определения положения, или на равенности частот (синхронизация). Последнее имеет место, если шкала времени используется для представления времени в некоторых физических теориях, например в моделировании орбит спутников и планет. Однако этот способ дробления измерений времени на разные категории не может служить основой для систематического представления предмета обсуждения, так как различные категории применения стремятся перекрыть друг друга. Поэтому мы проиллюстрируем наше обсуждение выбором некоторых практических и научных тем, в которых характерным является измерение времени.

## 9.1. Фундаментальные исследования

### 9.1.1. Метрология

Секунда является лучшей реализацией основных единиц международной системы единиц СИ. Поэтому совершенно естественно определять другие основные единицы в терминах секунды используя только физические законы и фундаментальные физические константы, которые вовлекаются в их определение. Если мы примем постулат, что такие константы действительно существуют (т.е. эйнштейновский принцип эквивалентности), то вся точность в реализации секунды, таким образом, в принципе, передается и на другие единицы. Таким шагом, сделанным в 1983 году, было определение метра, основанное на скорости света. Из семи основных единиц международной системы СИ (см. приложение 3), в настоящее время только три остаются независимыми, а именно: секунда, килограмм и кельвин. Например определение ампера основано на понятии силы в  $[м\ кг\ с^{-2}]$  и расстояния в  $[м]$  между двумя проводниками. Это определение, в конце концов выражается через секунду и килограмм.

Будет достигнут значительный прогресс, если килограмм удастся определить в терминах секунды. Нынешнее определение основано на массе конкретного объекта, цилиндра из платино-иридиевого сплава, содержащегося в международном бюро мер и весов (МБМВ). В этой единице

едва ли реализуется неопределенность лучше, чем  $10^{-8}$ . Возможно удастся его заменить через электромагнитные или электростатические силы. Тогда все меры кроме термодинамических будут связаны с секундой.

Процесс переноса измерения величины на измерение времени происходит и в напряжении с использованием эффекта Джозефсона, и в сопротивлении с использованием квантового эффекта Холла. Однако эти квантовые эффекты не могут служить основой для нового определения единиц, используемых в электричестве, по крайней мере не сейчас, потому что в этом случае будет потеряна связь с механикой: механический ватт должен оставаться равным электрическому ватту. В настоящее время ватт используются для поддержания вольты и ома, а их значения все еще связаны с определением ампера.

Эффект Джозефсона происходит в двух сверхпроводниках, разделенных очень тонким изолирующим барьером. Если их подвергнуть СВЧ облучению с частотой  $\nu$ , то на вольтамперной характеристике перехода появляются ступеньки, разделенные характерным значением напряжения  $V_n$  в приложенной разности потенциалов. Они теоретически определяются следующим выражением:

$$V_n = n \frac{h}{2e} \nu, \quad (9.1)$$

где  $n$  – целое число,  $h$  – постоянная Планка и  $e$  – заряд электрона.

Неопределенность в измерении отношения  $h/2e$ , приводимого в этом выражении, меньше, чем неопределенность в независимых экспериментальных определениях  $h$  и  $e$  по отдельности. Следуя международной кампании измерений в 1988 году по соглашению была принята величина, обозначаемая  $K_J$  и равная  $h/2e$ . Ее значение равно:

$$K_J = 483597,9 \text{ ГГцВ}^{-1}. \quad (9.2)$$

Это обеспечивает стабильную опору для разности потенциалов, привязанных к измерениям частоты.

Квантовый эффект Холла, известный также как эффект фон Клитцинга, происходит в случае, если тонкий полупроводниковый слой охлаждается до примерно 1 К и помещается в перпендикулярное слою магнитное поле порядка 15 Т. Напряжение Холла  $V_H$ , перпендикулярное направлению протекающего тока  $I$ , ведет себя таким образом, что сопротивление  $R = V_H/I$  совпадает с теоретическим:

$$R = \frac{1}{n} \frac{h}{e^2}, \quad (9.3)$$

где  $n$  – опять целое число. Экспериментальное определение квантового сопротивления Холла дает для  $h/e^2$  более точное значение, чем то, кото-

рое получается из независимых определений  $h$  и  $e$ , и в 1988 году по соглашению для этого отношения была принята величина  $R_K$ , а именно:

$$R_K = 25812,807 \Omega. \quad (9.4)$$

С начала 1990 годов стала возможной посылка одиночных электронов один за другим через потенциальный барьер. Поэтому становится реальным создание электрического тока, величина которого будет определяться частотой сигнала, контролирующего открытие барьера. Затем станет возможной проверка взаимного соответствия методов определения электрических единиц, так как величина тока также связывается с частотой через квантовые эффекты Холла и Джозефсона.

Согласованные значения  $K_J$  и  $R_K$  подразумевают определение электрических единиц, которые не соответствуют строго официальной системе единиц СИ. Но они имеют преимущество в том, что они обеспечивают однородное представление вольты и ома с много большей воспроизводимостью, чем та, которая может быть получена из абсолютных измерений, основанных на определении ампера.

### 9.1.2. Измерение физических констант

Некоторые константы могут быть определены просто путем измерения частоты физического явления и их значения могут поэтому быть полученными с очень малой неточностью.

Примером является постоянная Ридберга. Она оценивается с неопределенностью в пределах  $7,7 \times 10^{-12}$ . Это результат выдающейся работы, выполненной группами из высшей технической школы в Париже (Франция) и в институте Макса Планка в Гаршинге (Германия). Используя методы спектроскопии сверхвысокого разрешения они измерили частоты ряда оптических переходов атома водорода. Полученное значение постоянной Ридберга было [9.1]:

$$R_\infty = 109737,31568550 \text{ см}^{-1}. \quad (9.5)$$

Фактор Ланде  $g$  для электрона близкий к 2 был измерен в университете Вашингтона в Сиэтле с помощью удержания одиночного электрона в ловушке Пеннинга. Это было получено путем наложения однородного магнитного поля на неоднородное электрическое поле. Значение  $g$  равно удвоенному отношению ларморовской частоты прецессии электрона к его циклотронной частоте. Полученное значение с неопределенностью  $4 \times 10^{-12}$  равно [9.2]:

$$\frac{g}{2} = 1,001159652188. \quad (9.6)$$

Используя ту же технику для позитрона было получено то же самое значение  $g$  с неопределенностью  $2 \times 10^{-12}$ . Этот результат в настоящее время является наиболее точным подтверждением гипотезы, что античастицы имеют такие же свойства, как и соответствующие им частицы.

Путем сличения частот циклотронного резонанса протона и антипротона в пеннинговской ловушке было показано, что их инертные массы в пределах  $4 \times 10^{-8}$  равны [9.3]. С помощью аналогичной техники с неопределенностью до  $3 \times 10^{-9}$  было измерено отношение массы протона к массе электрона [9.4].

Как можно видеть из (9.6) значение фактора Ланде для электрона отличается от 2 на очень малую величину. Отклонение от этого значения зависит от эффектов квантовой электродинамики и может быть выражено через постоянную тонкой структуры  $\alpha$ . Это одна из наиболее важных констант атомной и квантовой физики. Недавний теоретический прогресс сделал возможным использование измерения  $g$  чтобы в пределах  $4 \times 10^{-9}$  получить [9.5]

$$1/\alpha = 137,03599944 . \quad (9.7)$$

### 9.1.3. Воздействие на атомную физику

#### (a) Проверка линейности квантовой механики

Основным уравнением квантовой механики является линейное уравнение Шредингера (6.27). Однако теоретически было показано, что может существовать слабая нелинейность [9.6]. Частоты переходов между двумя энергетическими уровнями зависели бы тогда от населенности этих уровней и вносили бы в эти переходы незначительный ангармонизм. Были выполнены экспериментальные проверки, одна с ионами бериллия  $\text{Be}^+$  в радиочастотной ловушке [9.7] и другая с атомами водорода в водородном мазере [9.8]. В обоих случаях в пределах экспериментальных неопределенностей было найдено, что частоты переходов между соответствующими сверхтонкими подуровнями не зависят от их населенности. Так как благодаря очень малой нестабильности частоты используемых в проверке приборов эти неопределенности исключительно малы, мы можем заключить, что нелинейное обобщение уравнения Шредингера не является необходимым.

#### (b) Понимание свойств атомов и молекул

Этот вклад очень важен и разнообразен и детальное описание выходило бы за рамки этой книги.

Техника спектроскопии сверхвысокого разрешения, развитая и используемая в атомных или молекулярных стандартах частоты, сделала возможным измерение частот огромного числа переходов с очень малой не-

пределенностью. Примерами являются частоты переходов атома водорода и его изотопов, изотопов рубидия с массой 85 и 87, и многих ионов с одним валентным электроном. Аналогично частоты атомных и молекулярных переходов в инфракрасном и видимом диапазонах известны теперь с неопределенностью до нескольких единиц на  $10^{-12}$ .

Эти измерения, вместе с исследованиями эффектов от магнитного и электрического полей, значительно продвинули наши знания атомных констант, таких например, как ядерное и гиромангнитное отношение и межатомная связь в молекулах.

Лучшее понимание межатомных потенциалов было получено путем измерения сечения спин-обменных столкновений и сечения спин-обменных сдвигов частоты атома водорода в диапазоне 1–373 К. Производится изучение и способ сравнения теоретических и экспериментальных значений этих сечений для атомов рубидия и цезия с малыми относительными скоростями. Эти исследования обусловлены применением в часах охлаждаемых лазером атомов.

Наблюдался неожиданный вклад в сдвиг частоты сверхтонкого перехода атомов рубидия, когда они помещались в сильное (около 5 Т) магнитное поле [9.9]. Результат предполагает, что энергия магнитного взаимодействия между ядром и электронным облаком еще недостаточно хорошо известна и необходимы оценки дальнейших членов теории [9.10]. Эти члены могут также оказывать влияние на значения сдвигов частоты из-за квадратичного эффекта Зеемана, величина которого должна приниматься во внимание в атомных стандартах частоты и времени. Этот вопрос мог бы быть исследован в экспериментах с цезиевым пучковым стандартом [9.11]. Этот стандарт был бы необычным в том смысле, что в качестве опорного использовался бы переход

$$F = 3, m_F = -1 \leftrightarrow F = 4, m_F = -1.$$

Его частота имеет экстремум в зависимости от магнитного поля в области около 82 мТ. Точные измерения частоты этого перехода, близкой к 8,901 ГГц, обеспечили бы проверку формулы Брайта-Раби (6.4), содержащую все необходимые члены для вычисления зеемановского сдвига частоты.

#### 9.1.4. Строение пространства-времени и гравитация

Большинство проверок строения пространства времени и гравитации используют измерения времени. Исчерпывающее обсуждение важности этих проверок дано в [9.12, 9.13]. Мы рассмотрим несколько примеров экспериментов, в которых атомные стандарты времени играли решающую роль. Некоторые проверки непосредственно основаны на стабильности или точности стандартов времени [9.14]. В других случаях эти стандарты являлись существенными дополнительными инструментами.

*(а) Непосредственное использование атомных стандартов времени*

Для проверки предсказаний общей теории относительности был организован ряд экспериментов с перевозимыми часами. В частности, в 1972 году Хафеле и Китинг из военно-морской обсерватории США организовали перевозку четырех цезиевых часов вокруг света на коммерческих авиалиниях. В поездках в западном направлении они обнаружили прибавление времени на  $237 \pm 7$  нс, а при поездках в восточном направлении потерю времени на  $59 \pm 10$  нс. Теоретические расчеты давали прибавление на  $275 \pm 21$  нс и потерю на  $40 \pm 23$  нс соответственно. Ухудшенная неопределенность возникает из-за недостаточного знания траектории полетов часов [9.15]. Этот эксперимент рассматривался как проверка сдвига частоты из-за гравитации, однако, он был не очень информативен, потому что Паунд, Ребка и Снидер уже выполнили эту проверку с лучшей точностью с помощью эффекта Мессбаура [9.16, 9.17]. Однако вместе с другими аналогичными экспериментами это был убедительный аргумент в необходимости понимания измерений времени в рамках общей теории относительности.

Дальнейшее измерение гравитационного сдвига частоты было выполнено Вессо и Левиным в 1976 году [9.18]. Водородный мазер с помощью зонда был поднят на высоту 10 000 км. Во время полета его фаза непрерывно сличалась с фазой наземного водородного мазера с помощью трех линий связи, исключаящих эффект Доплера. Было найдено, что в пределах экспериментальной неопределенности, а именно с относительной неопределенностью  $7 \times 10^{-5}$ , наблюдаемый сдвиг частоты согласуется с предсказаниями общей теории относительности. В таком же направлении планируются более точные эксперименты либо со спутниками с очень вытянутой орбитой вокруг Земли, либо с космическим зондом, летящим к Солнцу. Эти эксперименты интерпретируются как проверки эйнштейновского принципа эквивалентности (ЕЕР) [9.12].

Путем сличения основанных на переходе в сверхтонкой структуре цезиевых часов, и расположенными рядом часов на магнии, основанных на переходе в тонкой структуре, Годоне и др. [9.19] оказались способны установить предел эволюции во времени произведения  $g_p(m_e/m_p)$ , где  $g_p$  – гиромагнитное отношение протона,  $m_e$  и  $m_p$  массы электрона и протона соответственно. Этот (относительный) предел равен  $5,4 \times 10^{-13}$  в год. Объединив свои результаты с астрофизическими данными эти авторы показали, что относительные изменения во времени постоянной тонкой структуры меньше, чем  $2,7 \times 10^{-13}$  в год. Во время этих же экспериментов часы подвергались воздействию годовых вариаций гравитационного потенциала Солнца из-за эксцентриситета орбиты Земли. Если бы ЕЕР нарушал-

ся, то годовые вариации сказались бы на разности частот этих двух часов. Этого не произошло [9.20]. В более недавней работе сличения водородного мазера и стандарта частоты на ионах ртути  $\text{Hg}^+$  установили верхний предел [9.21]

$$\frac{1}{\alpha} \left| \frac{d\alpha}{dt} \right| < 3,4 \times 10^{-14} \text{ в год.}$$

Более того, благодаря преимуществам отличной стабильности цезиевого и рубидиевого фонтанов, измерения на интервале 24 месяцев уменьшили верхний предел возможной вариации  $\alpha$ . Теперь мы имеем [6.23]

$$\frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} < 3,1 \times 10^{-15} \text{ в год.}$$

Эти два последних результата основаны на том факте, что теоретическое выражение для сверхтонкого перехода в щелочных атомах (таких как H, Rb, Cs,  $\text{Hg}^+$ ) содержит поправочный член, зависящий от произведения  $\alpha Z$ , где  $Z$  – атомный номер элемента. Любые изменения  $\alpha$  во времени привели бы к разному изменению частот рассматриваемых стандартов.

Один из постулатов теории относительности это постулат о постоянстве скорости света в локальных измерениях. Давайте мимоходом отметим, что это постоянство может быть проверено экспериментально только в том случае, если мы имеем независимые стандарты длины и времени. Для этих целей нам необходимы материальные стандарты длины, такие как линейки, плечи интерферометра или геодезические базисные линии. Постоянство  $c$  обычно проверяется двухсторонним распространением. Оно проверялось в известном эксперименте Майкельсона-Морли [9.22], который не обнаружил каких-либо эффектов из-за движения наблюдателя по отношению к гипотетическому эфиру. Однако мы также должны проверять, что скорость в прямом направлении равна скорости в обратном направлении, или обобщая – что скорость света действительно изотропна. Такая проверка была сделана в лаборатории реактивного движения (США) в 1990 году путем использования стабильности частоты двух водородных мазеров, разнесенных друг от друга на 21 км и сличавшихся односторонним методом через оптическое волокно [9.23]. В пределах экспериментальной неопределенности не было выявлено никакой анизотропии за время перемещения базисной линии двух мазеров благодаря вращению Земли, так что  $|\Delta c|/c < 3,5 \times 10^{-7}$ . Было предложено повторить этот эксперимент опираясь на спутниковый мазер [9.24]. Это уменьшило бы относительную неопределенность до  $1,5 \times 10^{-9}$ . В некоторых областях исследований длительное сличение часов на борту спутников GPS с часами на наземных станциях привело к верхней границе  $|\Delta c|/c < 4,9 \times 10^{-9}$



для всех направлений и к  $|\Delta c|/c < 1,6 \times 10^{-9}$  для экваториальных направлений.[9.25].

(b) Косвенное использование атомных стандартов времени

В других проверках теории относительности качество измерений времени используется для целей очень точного определения положения. Радиолокационная телеметрия может таким образом использоваться для измерения движения перигелия Меркурия более точно, чем это было возможно в оптической астрометрии с применением угловых измерений [9.26]. Относительная неточность в этой исторической проверке эйнштейновской теории была уменьшена до  $10^{-3}$ . Лазерная локация лунных отражателей сделала возможным поиск возможного нарушения слабого принципа эквивалентности для массивных тел (эквивалентность инертной и гравитационной масс). Это мнимое нарушение носит название *эффект Нордтведта* [9.27]. Другие исследования были выполнены в поиске возможного изменения во времени гравитационной постоянной. Они основывались на точном измерении расстояний искусственных спутников, расположенных на орбите Меркурия.

Как показано в разделе 8.1.4а, с помощью РСДБ можно производить очень точные угловые измерения. Эти свойств были использованы для другой классической проверки общей теории относительности – отклонения света материей на более высоком уровне. Оказалось возможным измерение изгиба света от квазара при прохождении около Солнца, и даже около Юпитера [9.28].

Все эти эксперименты опираются на подробные модели орбитального движения. С этой целью используется атомная шкала ТАИ для того чтобы представить временные параметры теории так, как они определены в разделе 7.1. Так как наблюдения осуществляются на вращающейся Земле, то и параметры, описывающие это вращение необходимы с очень высокой точностью. Однако мы видели, что эти параметры определяются на основе техники времени и частоты. Совершенно ясно, что метрология времени касается такой работы исключительно сложным образом.

Одна из новых форм проверки заключается в измерении времени задержки сигналов от небесных объектов при их прохождении вблизи Солнца (*эффект Шапиро*). Время вовлекается в определение положения РСДБ, в орбитальные модели, в стабильность наземных и космических часов и в метод радиолокации. Этот метод задержки применяется к сигналам от миллисекундных пульсаров.

Мы также должны добавить сюда исследования, включающие в себя измерение времени миллисекундных пульсаров, обсуждавшееся в разделе 8.3.

## (с) Предельные цели этих проверок

Со времени публикации эйнштейновской общей теории относительности было разработано много других теорий гравитации. В большинстве этих теорий гравитация рассматривается, как и в общей теории относительности, через проявление строения самого пространства-времени, описываемого математически метрикой. В дополнение к метрике некоторые другие теории предполагают существование полей, или даже заменяют метрику полями.

В слабых гравитационных полях и при малых скоростях по сравнению со скоростью света используется пост-ньютоновская метрика, например, (3.14) с низким уровнем приближения. Согласно работе Нордтведта [9.29] и Вилла [9.30] различные конкурирующие теории были закодированы путем введения десяти параметров, известных как PPN параметры, где PPN установлено для *параметризованного пост-ньютоновского* формализма. Эти параметры использовались для представления пост-ньютоновской метрики в единственном выражении, но они имели различные значения в различных теориях. Затем наблюдения приводили к оценкам их значений или значений одной из их комбинаций. Например, мы видели, что относительный гравитационный сдвиг частоты равен  $\Delta U/c^2$  согласно общей теории относительности. Его выражение в PPN равно  $(1+\alpha)\Delta U/c^2$ . Параметр  $\alpha$  (не путать с тонкой постоянной структуры) тогда является измеряемой величиной, которая согласно общей теории относительности равна нулю. Эксперимент Вессо и Левина показывает, что  $|\alpha| < 2 \times 10^{-4}$ .

Вплоть до недавнего времени проверки, проводимые в солнечной системе для слабых полей и малых скоростей, в пределах экспериментальных неопределенностей давали PPN параметры, согласующиеся с общей теорией относительности. Это означает только то, что мы еще неспособны сделать различия между теориями, последствия которых могут отличаться при моделировании Вселенной и ее эволюции. Вот почему проверки должны включать в себя сильные гравитационные поля, такие как поля вблизи двойных пульсаров. Наблюдение и моделирование таких астрономических объектов как черные дыры также имеет ключевую важность для космологии.

Космология действительно является предельной целью этих исследований. Это величайшая мечта человека и не являются ли такие мечты славой человечества? В духе тех же исследований единая теория, объединяющая все микроскопические явления, а также все мировые элементарные частицы физики все еще не родилась, чтобы пожинать свои плоды. Лучшее понимание строения пространства-времени и гравитации было бы значительным успехом космологии.

Для тех, кого не убедили эти цели или для тех, кто вкладывает свое время и деньги в надежде на более быструю отдачу, мы можем добавить, что применение релятивистских теоретических рамок становится абсолютно необходимым. В качестве примера приведем сверхточное определение положения. В дополнение к его очевидному применению в транспорте оно является решающим для измерения крупномасштабных деформаций земной коры (относящееся к предсказанию землетрясений) и мониторинга уровня мирового океана, приводящего к климатическим изменениям. Поэтому озвучивание экспериментальных основ этих теорий имеет непреходящую важность.

## 9.2. Определение положения, геодезия и навигация

### 9.2.1. Принципы время частотных методов

Кроме многих применений в других областях, идея определения расстояний, основанная на принципах измерения двухстороннего времени распространения сигнала с помощью радио и лазерной техники широко используется в астрономии и геодезии. Далее возможен метод трехмерного определения положения при условии, что три цели доступны и наблюдатель не находится с ними в одной плоскости. Этот принцип управляет сверхточной геодезией путем лазерной локации искусственных спутников.

В спутниковой системе определения положения для наблюдателя более удобно использовать односторонние передачи со спутников. При этом также требуется много меньше излучаемой мощности. Однако неизбежное отсутствие синхронизации между передатчиком и приемником должно как-то компенсироваться. Во всемирных системах и в глобальной геодезии используются два решения. Одно из них основано на доплеровском сдвиге частот, передаваемых спутниками. В другом решении используется *псевдодальность*, которая определяется из разности времени приема, измеренного на приемных часах, и времени передачи, измеренного на спутниковых часах, что позволяет таким образом исключить ошибки синхронизации.

Для того чтобы представить простое описание доплеровского метода, давайте предположим, что частота  $\nu_0$  передатчика известна наблюдателю и наблюдатель фиксирован по отношению к земной поверхности. Здесь мы не будем рассматривать релятивистские эффекты, хотя на практике они должны быть приняты во внимание. Наблюдатель измеряет принимаемую частоту  $\nu_{\text{OR}}$  и вычисляет разность  $\Delta\nu = \nu_{\text{OR}} - \nu_0$ . Затем эта разность интегрируется на временном интервале  $\Delta t = t_2 - t_1$ . После интегрирования мы получим число  $n$  периодов  $P = \nu_0^{-1}$  потери (если  $n < 0$ ) или прироста (если  $n > 0$ ) на приеме в зависимости от того куда движется спут-

ник, от наблюдателя или к нему соответственно. Величина  $снР$  есть просто разность между расстоянием до спутника на даты  $t_2$  и  $t_1$ . Если на эти даты известно положение спутника в системе координат, установленной по отношению к Земле, то положение наблюдателя должно находиться на хорошо определенном гиперboloиде в этой системе координат. Так как спутник продолжает двигаться по орбите, то измерения повторяются и таким образом продолжают воспроизводиться гиперboloиды, имеющие только одну общую точку, которая должна являться положением наблюдателя. Однако на практике наблюдение одиночного спутника может привести к удовлетворительной точности только тогда, когда известна высота наблюдателя. Конечно, это описание сильно упрощено. Должны учитываться различные факторы, такие как возможная отстройка частоты, рефракция, собственное движение наблюдателя и т.д. Однако основные особенности системы достаточно ясны. Измерения с одним спутником дают «фиксированный» но не мгновенный способ, потому что спутник должен наблюдаться на части его орбиты. Полный набор направлений получается более быстро, если использовать низкоорбитальный спутник. Для глобального покрытия Земли низкоорбитальными спутниками требуются полярные орбиты.

Метод псевдодальности включает в себя несколько синхронизованных космических или наземных передатчиков, положение которых известно в земной системе координат. Если два передатчика одновременно излучают сигналы, то наблюдатель измеряет разность времени приема сигналов и затем находит разность расстояний до этих передатчиков. Тогда наблюдатель оказывается расположенным на известном гиперboloиде. Если передатчиков четыре, то положение наблюдателя определяется немедленно. Из-за геометрических ограничений необходимо, чтобы передатчики находились в космосе. Но для воздушной и морской навигации, когда известна высота, используется двумерная наземная система определения положения. В обоих случаях избыточная информация, получаемая из дополнительных передатчиков, обеспечивает точность и безопасность. Кроме определения положения в качестве подарка получают сличения часов наблюдателя с часами системы. Как мы видели в главе 7, этот побочный продукт имеет очень важное значение для целей распространения времени.

Стоит отметить тесное соотношение между доплеровским методом и методом псевдодальности, хотя на практике это соотношение может укрываться за способом математического истолкования данных. Такие методы, применяемые с использованием искусственных спутников, опираются на точное описание орбит спутников в наземной системе координат. Это достигается путем создания сети следящих станций с известными положениями. Измерения немедленно передаются на центр управления, где они обрабатываются за самые краткие по возможности сроки для того,

чтобы передать орбитальные модели обратно на спутники и хранить их как можно более обновленными, готовыми для передачи потребителю.

Мы уже упоминали глобальную систему определения положения GPS, основанную на измерениях псевдодальности, потому что она может использоваться для сличения часов чтобы распространять время (главы 5 и 7) и измерять вращение Земли (глава 8). Можно отметить настоящий бум в росте числа пользователей GPS в ее стандартном назначении, т.е. для определения положения. В следующем разделе мы надеемся удовлетворить любопытство читателя, представив описание системы немного более детально, хотя этой теме уже посвящено много специализированных работ. В частности, ссылка [9.31] объясняет, как работает система и объясняет различные способы ее применения в геодезии. Далее мы обрисуем другие системы.

### **9.2.2. Глобальная система определения положения**

#### **(a) Спутники и их сообщения**

Система Навстар (навигационное спутниковое время и дальность) сегодня более известная акронимом GPS, зародилась из исследований, начатых в 1965 году. Ее развертывание продолжалось до 1995 года. Это был также и исследовательский период, давший некоторые представления о размерах предприятия. GPS появилось в результате слияний проектов военно-морских и военно-воздушных сил США (проекты Тимэйшн и 621В соответственно)

В системе используются двадцать четыре спутника с почти круговыми орбитами на высоте около 20 000 км, распределенные в шести орбитальных плоскостях на интервалах  $60^\circ$  долготы и наклонением  $55^\circ$  к экватору. Орбитальный период этих спутников составляет половину звездного периода вращения Земли. (Последний равен 23 часа 56 мин. и соответствует возрастанию угла  $A_s$ , определенного в разделе 8.1.2, на  $360^\circ$ ). Следовательно, неподвижный наблюдатель на Земле каждые 23 часа 56 мин видит один и тот же самый спутник,двигающийся по небу по одной и той же траектории с тем же азимутом и восхождением. В конфигурации, подходящей для определения положения наблюдателя, с любой точки земной поверхности (кроме нескольких кратковременных исключений) всегда видны по крайней мере четыре спутника.

Первые одиннадцать спутников системы, известные как Block I, имели с самого начала рубидиевые стандарты, затем цезиевые стандарты, а также, в целях безопасности, резервные кварцевые часы. Спутники Block II запускались с 1985 года с двумя цезиевыми часами, двумя рубидиевыми часами и дополнительным кварцевыми часами. Они имели срок службы около восьми лет.

Основной принцип, разработанный до GPS, это синхронизация бортовых часов. На практике часы физически не синхронизированы, но спутники передают данные, которые можно использовать для расчета разности показаний между часами спутника и базовым временем системы, а именно временем системы GPS с неопределенностью в несколько наносекунд.

Сигналы GPS передаются на двух несущих частотах, одинаковых для всех спутников системы. Это частоты L1 на 1575,42 МГц и L2 на 1227,60 МГц. Цифровая информация, которую они передают, называемая навигационное сообщение, осуществляется переменной фазы несущей на 180°. Она состоит из следующих компонент:

- псевдо-случайный код C/A,
- псевдо-случайный код P,
- сообщение, несущее числовые данные.

Псевдослучайный код взаимно ортогональный и разный для разных спутников. Автокорреляционная функция каждого кода равна почти нулю, за исключением нулевой задержки. Это объясняет, каким образом приемники различают различные спутники, генерирующие свои коды, и как они измеряют время приема сигнала с каждого спутника (максимальная корреляция) с помощью своих внутренних часов.

C/A код (*Coarse Acquisition* – грубый код или *Clear Access* – код общего пользования) передается только на частоте L1, сдвигаемой по фазе на 90°. Он повторяется с периодом в 1 мс и включает в себя 1023-битовую последовательность.

Код P (*Precise* – точный или *Protected* – защищенный) передается и на частоте L1 и на частоте L2. Его период повторения равен 267 дням, но однонедельный сегмент передается и изменяется каждую неделю. Он может быть зашифрован для исключения несанкционированного доступа потребителя.

Навигационное сообщение передается с низкой скоростью модуляции 50 бит с<sup>-1</sup>. Оно состоит из 1500-бит кадра (продолжающегося 30 с), который подразделяется на пять субкадров. Содержание субкадров от 1 до 3 повторяется из кадра в кадр (если их содержание не было обновлено) и представляет информацию о передающем спутнике, т.е. его состоянии, элементах орбиты и коэффициентов для вычисления поправок на часы, используемые в данное время. Субкадры 4 и 5 обеспечивают информацию о системе в целом, т.е. модели для вычисления ионосферных задержек, разность между UTC и GPS временем, грубые эфемериды и состояние других спутников системы, информацию о кодах. Так как вся эта информация слишком объемная, чтобы поместить ее всю в двух субкадрах, то она передается по субкадрам 4 и 5 из двадцати пяти последова-

тельных кадров. Полный набор информации может быть получен таким образом только путем слежения за спутником в течение 12,5 минут. Это объясняет, почему слежение растягивается на 13 минутный период если на кону стоит применение очень точного измерения времени (см. раздел 5.6.3). На каждой частоте и L1 и L2 передаваемый сигнал является результатом модуляции соответствующей коду и сообщению. Отметим, что во время передачи одного бита сообщения, т.е. 20 мс, C/A код повторяется двадцать раз.

### *(b) Стандартная работа системы*

Под «стандартной работой» мы понимаем применение системы для простого определения положения в реальном времени с использованием обычных GPS приемников. Мы не будем обсуждать множество других способов применения этих приемников.

Определение спутниковой орбиты и вычисление поправок часов, выполняемое станцией с ведущими часами, основано на слежении за спутниками с помощью пяти контрольных станций. Геометрические координаты этих станций известны с неопределенностью в несколько десятков сантиметров по отношению к опорной системе координат, которая называется WGS84. Было предпринято много попыток согласовать систему WGS84 с системой IERS, известной как ITRF и упоминавшейся в разделе 8.1.6. Сейчас отклонения систем друг от друга составляют порядка одного дециметра. Таким образом орбитальные параметры, вычисляемые и передаваемые в WGS84 системе, на практике являются и параметрами в ITRF и то же самое можно сказать о координатах наблюдателя.<sup>1</sup>

Время GPS согласовано с UTC (USNO) в пределах 100 нс по модулю одной секунды. Последняя следует за UTC в пределах 100 нс.

Орбиты описываются посредством шести параметров, похожих на параметры Кеплера, а именно: главная полуось, эксцентриситет, наклонение к экватору, прямое восхождение узла, аргумент перигея и средняя аномалия. Однако орбиты искусственных спутников возмущаются неоднородностями гравитационного поля Земли, давлением солнечного излучения, лунно-солнечным приливным потенциалом и остаточной атмосферой. Таким образом согласно методу, обычно принятому у астрономов, орбитальные параметры рассматриваются как переменные. Используя их значения в данный момент мы получим орбиты очень близкие к истинной орбите в диапазоне соседствующих времен. Передаются

<sup>1</sup> Национальные картографии и морские карты были установлены в региональных системах с помощью традиционных методов геодезии. Предполагается преобразование их в ITRF, хотя это еще не достигнуто. Расхождения между ними WGS84 и ITRF могут достигать несколько сотен метров. Это должно приниматься во внимание и в некоторые приемники необходимо вносить необходимые поправки.

их изменения скорости, и параметры должны меняться каждый час или около этого.

Неопределенность положения движущегося наблюдателя может быть снижена до 10 м при приеме Р кода на обеих частотах. При приеме С/А кода неопределенность составляет около 30 м. До мая 2000 года, когда применялся режим SA (*Selective Availability – селективный доступ*), для не имеющего доступа потребителя неопределенность составляла около 100 м.

#### (с) Другие применения

GPS может использоваться в дифференциальном режиме для увеличения точности в применении к локальному позиционированию. Положение движущегося наблюдателя соотносится с точностью известных положений близлежащих неподвижных станций, одновременно следящих за тем же самым спутником. При этом значительно уменьшаются некоторые ошибки, включая ошибки из-за эфемерид, шума спутниковых часов, рефракции и SA, если он используется. Неопределенности могут быть уменьшены до нескольких метров в реальном времени. Дифференциальное определение положения используется также для определения относительного положения приемников времени и улучшения таким путем точности сличений часов. Так как эти приемники неподвижны, то может быть выполнено усреднение по времени и неопределенности их относительных координат могут быть уменьшены до дециметров [9.32].

Для высокоточных применений, таких как сантиметровая геодезия и изучение вращения Земли, используется слежение за фазой несущей частоты. Модуляция снимается путем умножения принимаемого сигнала самого на себя. Так как модуляция достигается путем обращения фазы, то получается чистая удвоенная частота. В этой области изучение координируется международной службой, известной как *международная GPS служба для геодинамики* (IGS). Эта служба устанавливает точные эфемериды GPS спутников, доступные в течение одной или двух недель после их установления. Они полезны в частности для уменьшения неопределенности в сличениях времени для ведения шкалы TAI.

#### (d) Гражданское дополнение к GPS

В вопросах применения для гражданских целей система GPS критиковалась за отсутствие точности, вызываемое включением SA, а также за отсутствие предупреждений в реальном времени о неисправностях с одним из спутников системы. Так как число видимых спутников только-только превышает минимально необходимое число четыре, то такая неисправность может привести к неправильному определению местоположения с



пагубными последствиями. Поэтому возникает вопрос, а не надо ли установить параллельную GPS гражданскую систему.

Сложность системы GPS обусловлена в частности ее военным назначением. Были сконструированы системы, работающие на тех же линиях, но без часов на борту спутников. Время обеспечивается единственными ведущими часами на земле и передается на спутниковые преобразователи. Однако этот тип систем не удовлетворяет нуждам вооруженных сил для полностью автономной работы, т.е. работы, для которой нет необходимости передачи данных с земных станций. Такая автономия, хотя и ухудшает качество, может оказаться жизненно необходимой во время конфликтов.

В настоящее время в разработке находятся две линии. Первая включает в себя совместное использование GPS и ее российского аналога ГЛОНАСС, который мы кратко обсудим позже. Число доступных спутников может возрасти до сорока восьми с десятком спутников или около того, видимых одновременно. Результирующая избыточность означает, что «больные» спутники могут быть обнаружены и исключены. Уже разработаны смешанные приемники GPS/ГЛОНАСС. Другое направление включает в себя установку гражданского дополнения к GPS, в котором передатчики будут установлены на геостационарных спутниках и будут передавать коды GPS [9.33]. В 2002 году европейское сообщество решило создать систему GALILEO, работающую на тех же принципах что и GPS и ГЛОНАСС. Система будет включать в себя 30 спутников и будет совместимой с GPS. Она обеспечит аналогичные возможности для сличения времени и сверхточных применений.

### 9.2.3. Другие системы определения положения

В СССР, а в последующем в России параллельно GPS была разработана система ГЛОНАСС. Она работает по тем же принципам, хотя спутники движутся по незначительно отличающимся орбитам на высоте около 20 000 км. Неподвижный наблюдатель также видит спутник, движущийся по одной и той же кажущейся траектории каждые 23 часа и 56 минут, но каждый день это новый спутник и спутники имеют однонедельный период. Спутники узнаются по частотам. Орбитальные модели передаются в координатной форме. В дополнение базовая шкала времени, известная как время ГЛОНАСС, не столь тесно совпадает с UTC. Геодезическая система координат также другая. Это приводит к сложной, но все же возможной задаче создания смешанных GPS/ГЛОНАСС приемников.

Прежде чем появились GPS и ГЛОНАСС, с 1964 года для морской навигации широко применялась доплеровская система Навсат. В этой системе шесть спутников с полярными орбитами на высоте 1100 км излучали частоты 150 МГц и 400 МГц, а также синхронизационные

маркеры. Сообщения об орбитальных моделях передавались фазовой модуляцией.

Другая доплеровская система, известная как DORIS, была разработана французским национальным центром изучения космоса (CNES) для определения положения с высокой точностью [9.34]. В ней используется противоположный Навсату метод в том смысле, что частоты излучаются наземными радиомаяками, положение которых должно быть определено, и принимаются спутниками. И радиомаяки, и спутники оборудованы сверхстабильными кварцевыми генераторами. Частоты близки к 400 МГц и 2 ГГц. Нестабильность частоты генераторов на радиомаяках и на спутниках должна быть менее  $5 \times 10^{-13}$  за время счета (интервал  $\Delta t$  определен в разделе 9.2.1) и  $10^{-12}$  за время пролета (например за 1000 с). Бортовые частоты определяются путем сличений с наземными ведущими часами, настроенными на TAI. Неопределенность должна быть меньше 10 мкс. Основная сеть от сорока до пятидесяти радиомаяков на Земле служит для определения орбит спутников. Система была испытана при слежении с Земли за спутником Spot-2. Она затем была принята как одна из систем определения положения для океанографических спутников TOPEX/POSEIDON, которые будут обсуждаться ниже. В последнем случае было показано, что неопределенность радиальной компоненты положения спутника составляет около 3 см. Для двух других координат неопределенность составляет около 20 см. DORIS также определяет местоположение радиомаяков с неточностью до 2 см. Эта точность позволила системе DORIS выделиться из богатства средств, используемых IERS для конструирования ITRF и измерения вращения Земли.

Система PRARE (*Precise Range and Rate Range Equipment – оборудование для точного определения дальности и скорости*) была разработана в Германии для точного определения орбит спутников [9.35]. Она также включает в себя космический бортовой сегмент, сеть следящих станций и обрабатывающий центр. В ней объединяется метод псевдодальности и доплеровского измерения сигналов, передаваемых спутниками на частотах 2 ГГц и 8 ГГц. Эта сеть совместно с системой GPS используется европейским космическим агентством (ESA) в программе спутникового исследования Земли (ERS). Она имеет точности того же порядка, что и DORIS.

### 9.3. Интерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ)

В разделе 8.1.4 мы обсуждали роль, которую играет интерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ) в измерениях всемирного времени. Она применяется для изучения вращения Земли и конструирования небесных и земных координатных систем. Угловые разнесения между источниками должны быть большими и разнообразными для того чтобы выделить ве-

личины, которые необходимо определить. Мы уже видели, что этот способ измерений использует преимущество стабильности частоты водородных мазеров.

РСДБ сначала была создана для изучения строения небесных источников с малыми угловыми размерами, излучающих в радиодиапазоне спектра. Разрешающая способность улучшается при приеме более высоких частот и при большем разнесении антенн. При использовании антенн земного базирования в сантиметровом и дециметровом диапазонах достигается угловое разрешение  $0,001''$ . Использование миллиметрового диапазона длин волн находится в состоянии разработки и угловое разрешение достигает  $0,0001''$ . РСДБ проекты использования антенн наземного и космического базирования должны бы обеспечить угловое разрешение до нескольких десятых угловой микросекунды [9.36].

РСДБ используется также различными способами для определения положения небесных источников по отношению к компактным внегалактическим источникам, образующим первичную систему координат. В этом случае мишенями являются соседние источники и типичное угловое разрешение измерений должно составлять несколько градусов.

Эта техника может быть использована разными способами, для того чтобы расширить небесную систему координат ICRF до оптического диапазона (см. раздел 3.3.2b). В частности, космический астрометрический проект HIPPARCOS дает нам каталог угловых положений и собственных движений около 100 000 звезд с внутренней сходимостью на уровне  $0,001''$  и  $0,001''/\text{год}$  соответственно, но он неспособен установить начальное вращение и скорость вращения всего каталога в целом [9.37]. Каталог HIPPARCOS должен быть согласован с ICRF. Одна из технических возможностей, используемых для этих целей, это РСДБ наблюдение нескольких десятков радиоисточников, принадлежащих каталогу HIPPARCOS. Путем объединения различных методов была получена оценка, что согласование достигается в пределах  $0,0005''$  со средними данными наблюдений HIPPARCOS (1991 год). Однако они ухудшаются со скоростью около  $0,00025''$  в год из-за неопределенностей в собственном движении звезд [9.38].

Дифференциальные РСДБ часто используются для слежения за космическими зондами для того, чтобы определить их положение относительно ICRF и таким образом определить положение других искусственных спутников, расположенных на орбитах вокруг других планет.

## 9.4. Программа TOPEX-POSEIDON

В качестве примера мы обсудим многие аспекты времени и частоты в программе TOPEX-POSEIDON.

Измерение вертикального расстояния между искусственным спутником Земли и поверхностью моря с помощью бортового альтиметра впер-

вые было испытано между 1975 и 1978 годами на американском спутнике Geos-3. Оно было продолжено со спутником Seasat в 1978 году. Хотя после нескольких месяцев спутник вышел из строя, все же были получены доказательства того, что эти измерения полезны для изучения океанов и их взаимодействия с атмосферой, для климатологии и внутренней геофизики. Geosat подтвердил эти выводы в 1985–1989 годах. Затем были разработаны более амбициозные программы в европейском космическом агентстве (ESA) в ERS (спутниковое изучение Земли), а в сотрудничестве между NASA и CNES (Франция) была разработана программа TOPEX-POSEIDON. Спутник ERS 1 был запущен в 1991 году и за ним последовал в 1995 году спутник ERS 2. Спутник по программе TOPEX-POSEIDON был запущен 10 августа 1992 года.

Радиолокационные пучки пересекают достаточно большие области поверхности моря для усреднения эффектов от морских волн. Высотные измерения включают в себя различные элементы, показанные на рис. 9.1.

- *Опорный эллипсоид* – это математическая поверхность, которая примерно соответствует поверхности моря и принимается по соглашению. Это устраняет необходимость опоры на геоцентр.
- *Геоид* – это поверхность постоянного гравитационного потенциала, после введения поправок на периодические члены, производимые приливным потенциалом. Он должен бы совпадать со средней поверхностью моря, если бы воды океанов были бы однородны и неподвижны.
- *Истинная поверхность моря* – определяется как поверхность, на которой усреднены эффекты от морских волн.
- *Орбита спутника* – устанавливается в геоцентрической системе координат. Ее высота вычисляется над опорным эллипсоидом.

Высотные измерения дают высоту спутника над истинной поверхностью моря. Если мы знаем орбиту спутника, то мы получим *высоту поверхности моря над опорным эллипсоидом*.

Два элемента имеют большую научную важность, это высота  $h_2$  геоида над опорным эллипсоидом, которая может быть положительной или отрицательной и достигать значений в сотни метров или около того, и высота  $h_1$  поверхности моря над геоидом, которая тоже может быть положительной или отрицательной и достигать значения около одного метра. Мы сразу же отметим, что измерения дают сумму этих двух элементов. Эта неоднозначность удаляется через их изменчивость. В течение нескольких лет геоид может приниматься как неизменный, и получают данные об изменениях поверхности океана. Если мы предположим, что океанские эффекты имеют нулевое среднее время усреднения, то средняя поверхность представляет пространственную неоднородность геоида. В долгосрочных наблюдениях здесь остаются трудности. Например, таяние

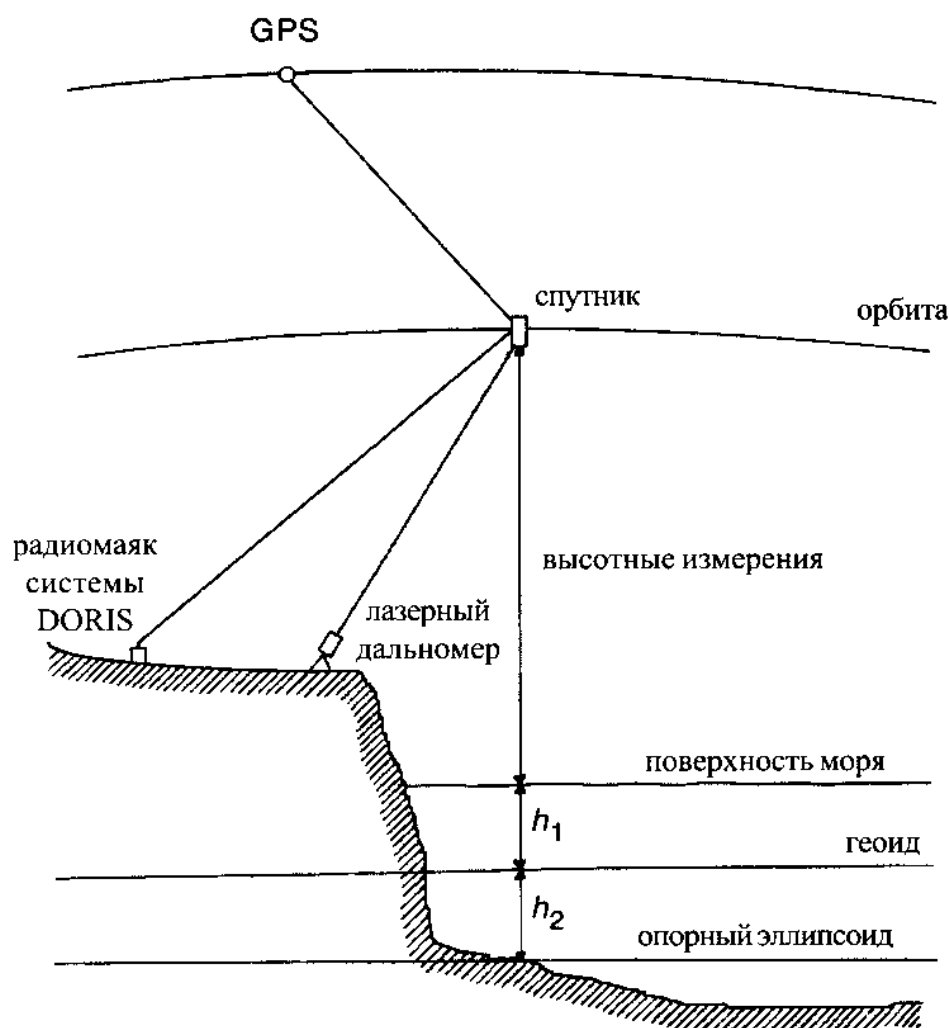


Рис. 9.1. Геометрические элементы измерения высоты над океаном

ледяных полярных шапок воздействует и на уровень моря и на форму геоида.

На форму отклика радиолокатора влияют условия на море. Кроме данных о высоте путем анализа отклика радиолокатора можно получить информацию о морских волнах, включая их высоту и направление движения.

На уровень моря влияют разности температур, соленость, атмосферные и динамические эффекты, такие как центробежные силы и силы Кориолиса. Поэтому легко видеть, что их изучение может обнаруживать течения, водовороты и перенос тепловой энергии, приводящий к климатическим изменениям. Однако величины таких эффектов не превышают нескольких дециметров. Для их изучения их необходимо измерять с неопределенностью в несколько сантиметров. Интересно перечислить научные темы, упомянутые в объявлении на предложения по исследованиям, объявленные CNES, пока TOPEX-POSEIDON находился в стадии подготовки [9.39]:



- провести изучение постоянных и изменчивых кругооборотов в океанах и их взаимодействие с атмосферой в глобальном и локальном масштабах и улучшить наше понимание климатической роли океана;
- разработать улучшенные объяснения океанических круговоротов в региональных масштабах за времена в несколько месяцев;
- получить улучшенное понимание переноса тепла в океане;
- провести изучение приливных моделей;
- изучить статистику океанских изменений;
- улучшить знания гравитационных полей и связанного с ними геоида;
- изучить физику волн.

Спутник TOPEX-POSEIDON имеет круговую орбиту с высотой около 1300 км и наклоном к экватору  $66^\circ$ . Поэтому он не охватывает полярные области. След его орбиты, т.е. вертикальная проекция орбиты на земную поверхность, повторяется каждые 10 дней и расстояние между следами на экваторе равно 316 км и уменьшается с повышением широты. Программа, планируемая раньше до 1997 года, все еще продолжалась в 2002 году. Геофизическая оценка программы и научные результаты ясно показывают, насколько она была успешной. Это засвидетельствовано одной тысячей двумястами страницами публикаций, посвященных этой теме в томах 99 и 100 *Журнала по геофизическим исследованиям* 1994 и 1995 годов и последующими публикациями во многих других научных журналах. В частности, неопределенность высоты поверхности моря над эллипсоидом составляет за один проход около 5 см. Она включает в себя неопределенность орбиты и неопределенность высотомерных измерений почти в равных пропорциях. Если применить усреднение за один месяц, то неопределенность может быть уменьшена до 1 см. Было также показано, что изменения среднего уровня моря могут быть выполнены с разрешением до  $1 \text{ мм год}^{-1}$ . Эти достижения вместе с успехом программ ERS 1 и 2 послужили толчком для создания проектов с применением следующих высотомерных спутников. (ERS 1 и 2 являются дополняющими друг друга, потому что они имеют различающиеся следы и повторяются разными способами.) В таких проектах изучались бы долговременные эффекты, включая долговременные изменения уровня моря, а также обеспечивался бы непрерывный мониторинг. 7-го декабря 2001 года NASA в сотрудничестве с CNES запустили первый, из планируемой серии, высотомерный спутник Jason-1.

Оставив в стороне научные результаты, которые не являются главной целью данного рассмотрения, мы обсудим теперь роль, которую играли время и частота в программе TOPEX-POSEIDON.

Альтиметр это ни что иное, как радиолокатор, измеряющий время пролета сигнала. Неточность часов альтиметра должна быть меньше чем

$10^{-10}$ , если ее вклад должен быть пренебрежимо мал. Нестабильность его частоты за время пролета, равное примерно 10 мс, должна иметь примерно то же значение. Измеренные данные должны выражаться в TAI с точностью до нескольких десятков микросекунд.

Измерения времени очень важны при определении орбиты спутника. Точность, требуемая для TOPEX-POSEIDON (неопределенность несколько см в радиальном направлении) оставила далеко позади все, что ранее было достигнуто. Использовались три основные системы слежения, а именно: лазерные дальномеры с угловыми отражателями на спутнике, бортовой приемник GPS и система DORIS. Эти время-частотные системы обсуждались в разделе 9.2. Для моделирования орбиты необходимы знания гравитационного потенциала Земли. Модель основана на слежении за очень большим числом спутников с совершенно разными орбитами. Такое слежение также включает в себя время-частотную технику определения положения. Более того, в настоящем случае модель была улучшена путем слежения за самим спутником TOPEX-POSEIDON. Такой анализ требует точного определения параметров вращения Земли, потому что орбиты описываются в невращающейся системе координат, в то время как положение спутника должно приводиться в опорной системе, сопровождающей Землю в ее вращении. Этот мониторинг вращения сейчас решается исключительно техникой и средствами времени и частоты (см. раздел 8.1.4). Параметры вращения могут быть определены из слежения системы DORIS за TOPEX-POSEIDON, но полезно объединить результат с результатами от других методов. Самые стабильные часы, которые могли бы быть построены, требуются для РСДБ методов.

Наконец разными способами в измерения вовлекается TAI. Она является основой для синхронизации (до 1 микросекунды на следящих станциях), опорой для точности по частоте и в применении временного аргумента в динамических теориях, используемых для орбитальных вычислений.

## 9.5. Телекоммуникация

Телекоммуникационные сети имеют структуру дерева, в которой окончания ветвей являются пользовательскими терминалами. Несколько иерархических уровней содержат узлы, в которых сообщения переключаются с одного канала на другой. В режиме аналоговых передач несколько сообщений передаются вместе через один и тот же коммуникационный канал путем применения SSB модуляции (модуляция с одной боковой полосой) без передачи несущей. Для того чтобы правильно воспроизвести сообщение, частоты генераторов, которыми оборудованы модулирующие/демодулирующие центры, должны быть синтонизированы почти до  $10^{-8}$  [9.40].

Цифровая передача голоса является значительным совершенствованием. Звуковые частоты от 300 Гц до 3600 Гц усредняются со скоростью 8000 раз в секунду и кодируются в восьмибитовые слова. А потом оказывается возможным смешать сообщения вместе и передать их одновременно через один и тот же канал до 30 сообщений за одно и то же время посредством процесса уплотнения. Для того чтобы разделить каналы необходим прием опорной частоты. Однако между частотами уплотнения и разделения каналов допускается достаточно существенный сдвиг, потому что временной сдвиг не слышен.

Для передач цифровых данных, в которых потери информации из-за сдвига времени недопустимы, возникает необходимость в хорошей синхронизации, т.е. в хорошей настройке частоты по всей сети. Эта проблема привела к нынешнему развитию *синхронной цифровой иерархии* (SDH).

Здесь частоты в узлах и на терминалах должны быть настроены в пределах  $10^{-11}$  на дневном усреднении. В дополнение международный союз электросвязи ставит условием, чтобы эти частоты были фиксированы по отношению к частоте UTC и, следовательно, к частоте TAI в пределах  $10^{-11}$  в нормализованном значении [9.41].

В контексте данной работы нужды телекоммуникаций могут показаться умеренными. Более изощренное решение требуется для поиска путей понижения стоимости. Тем не менее, цезиевые часы являются необходимыми на ведущем узле сети. Узлы других уровней и пользовательские терминалы оборудуются кварцевыми генераторами, которые автоматически подстраиваются по самой сети. GPS может дать вклад в контроль частоты опорного узла или узлов высокого уровня.

Несмотря на свое название SDH (синхронная цифровая иерархия) основана на синхронизации (т.е. к достижению совпадения частот). Использование синхронизации в собственном смысле иногда пропагандируется за те преимущества, которые оно могло бы принести. Иногда даже были некоторые разговоры о будущей необходимости доступа в реальном времени к UTC в пределах 100 нс для нужд телекоммуникации [9.42]. Это без сомнения проект, который довольно далеко удален в будущее, о котором мы не способны получить дальнейшие подробности.