

Глава 8

Астрономические времена

Хотя астрономические времена больше не являются лучшей мерой времени, они продолжают играть важную роль в современных исследованиях. Всемирное время UT свидетельствует о вращении Земли и используется для установления всемирного координированного времени UTC, являющегося практической базой единого времени для всего мира. Эфемеридное время ET являлось лучшим представлением динамического времени до наступления в 1955 году атомного времени, и оно все еще используется для обработки астрономических наблюдений, выполненных до этой даты. И, наконец, существует некоторая надежда, что *пульсарное время* может проявить лучшую долговременную стабильность, чем атомное время. В данной главе мы объясним, как эти времена определяются, реализуются и применяются.

8.1. Всемирное время

8.1.1. Концептуальные определения

Историческое рассмотрение развития, приведшего к всемирному времени UT, представляет нам серию метаморфоз истинного солнечного времени (см. раздел 4.2). Проще дать основанное на вращении Земли концептуальное определение, в котором проявляется современная роль всемирного времени.

Существуют различные формы всемирного времени. Одна из них, непосредственно связанная с вращением Земли, называется UT1. Другие формы будут определены в разделе 8.1.3.

В разделе 3.3.2b мы определили геоцентрические координатные системы. Одна из них является невращающейся в пространстве (*небесная система*), а другая вращается вместе с Землей (*земная система*). Вращение земной системы по отношению к небесной системе является *вращением Земли*. Мы покажем, как эти системы реализуются в международной опорной небесной системе ICRF, обозначаемой здесь через (C), и международной опорной земной системе ITRF, обозначаемой здесь (T). Должно быть описано вращение системы (T) по отношению к системе (C). Для того чтобы сделать

Глава 8

Астрономические времена

Хотя астрономические времена больше не являются лучшей мерой времени, они продолжают играть важную роль в современных исследованиях. Всемирное время UT свидетельствует о вращении Земли и используется для установления всемирного координированного времени UTC, являющегося практической базой единого времени для всего мира. Эфемеридное время ET являлось лучшим представлением динамического времени до наступления в 1955 году атомного времени, и оно все еще используется для обработки астрономических наблюдений, выполненных до этой даты. И, наконец, существует некоторая надежда, что *пульсарное время* может проявить лучшую долговременную стабильность, чем атомное время. В данной главе мы объясним, как эти времена определяются, реализуются и применяются.

8.1. Всемирное время

8.1.1. Концептуальные определения

Историческое рассмотрение развития, приведшего к всемирному времени UT, представляет нам серию метаморфоз истинного солнечного времени (см. раздел 4.2). Проще дать основанное на вращении Земли концептуальное определение, в котором проявляется современная роль всемирного времени.

Существуют различные формы всемирного времени. Одна из них, непосредственно связанная с вращением Земли, называется UT1. Другие формы будут определены в разделе 8.1.3.

В разделе 3.3.2b мы определили геоцентрические координатные системы. Одна из них является невращающейся в пространстве (*небесная система*), а другая вращается вместе с Землей (*земная система*). Вращение земной системы по отношению к небесной системе является *вращением Земли*. Мы покажем, как эти системы реализуются в международной опорной небесной системе ICRF, обозначаемой здесь через (C), и международной опорной земной системе ITRF, обозначаемой здесь (T). Должно быть описано вращение системы (T) по отношению к системе (C). Для того чтобы сделать

это описание, мы можем обратиться к классической кинематике. Время t понимается здесь как абсолютное и реализуется международным атомным временем TAI с пренебрежимо малой неопределенностью.

Хотя для ориентации (Т) по отношению к (С) достаточно трех функций времени (три угла Эйлера), предпочтительнее представление из пяти параметров, включающих направление оси вращения (I). Ось перемещается по отношению и к (Т) и к (С).¹ Используются следующие параметры.

- Две угловые координаты, представляющие положение (I) в (С), описывают *прецессию-нутацию*. Наблюдаемые значения обычно представляются в виде отклонений от теоретической модели прецессии-нутации выбранной по соглашению. В настоящее время отклонения от теоретической модели составляют около $0,01''$. Они будут уменьшены до $0,001''$, когда новая модель, принятая в 2000 году, будет внедрена в практику.
- Две угловые координаты (I) в (Т), описывающие *движение земных полюсов*. Они представляются в виде отклонений между направлением оси (I), которая должна быть ориентирована на север, и оси X^3 системы (Т), обозначаемой через Z в публикациях международной службы вращения земли IERS: $x(t)$ измеряется вдоль начального меридиана, $y(t)$ – перпендикулярно меридиану на запад. Значения $x(t)$ и $y(t)$ не превышают $1''$, что соответствует 30 м на поверхности Земли.
- Завершает представление угол $A(t)$, описываемый вокруг оси вращения (I). Положение оси (I) это то положение, которое она занимает на дату t .

Угол A может быть определен, как мы увидим, двумя способами. UT1 выражается в виде функции от A через математические соотношения в которых числовые параметры выбраны так, что какой бы ни был сделан выбор, получались бы те же самые значения UT1. Эти соотношения установлены так, чтобы удовлетворить следующим условиям.

- (1) Производная UT1 по времени должна быть пропорциональна модулю (изменяющегося) вектора вращения. Тогда, в предположении равномерного вращения, UT1 выполняет свою историческую роль в качестве равномерного времени и его нынешняя роль состоит в простом представлении вращения Земли.
- (2) Константа пропорциональности, подразумеваемая в (1), и фаза выбраны так, чтобы и через тысячелетия Солнце проходило через начальный меридиан (Гринвичский меридиан) в среднем в 12 часов UT1.

¹ Мгновенная ось вращения (IAR) имеет суточное и внутри-суточное движения и в (Т) и в (С). Хотя амплитуды движения меньше чем $0,02''$, они создают практические неудобства. IAR заменяется близкой к ней осью, не имеющей этих движений. Эта ось впервые была определена международным астрономическим союзом IAU в 1976 году и затем ее определение было улучшено в 2000 году. Соответствующие полюса называются звездным эфемеридным полюсом CEP и звездным переходным полюсом (Celestial Intermediate Pole) CIP соответственно. В дальнейшем неявно подразумевается CIP вместе с его экватором.

Строго говоря, условие (2) несовместимо с условием (1), потому что даже если вращение Земли равномерное, то средняя продолжительность истинных солнечных суток очень медленно изменяется. Однако предпочтение было отдано условию (1), а условие (2) выполняется только приблизительно. Происходящий из-за этого приближения сдвиг между UT1 и чередованием дня и ночи ничтожно мал и составляет меньше одной секунды за несколько столетий.

Если вектор вращения земли $\omega(t)$ и его длина $\omega(t)$, то мы имеем

$$\frac{d(UT1)}{dt} = \frac{\omega(t)}{\omega_0}, \quad (8.1)$$

где ω_0 – постоянная угловая скорость, соответствующая $d(UT1) = dt$, значение которой выбрано так, чтобы удовлетворить условию (2). В интегральной форме это означает, что

$$[UT1](t) = [UT1](t_0) + \frac{1}{\omega_0} \int_{t_0}^t \omega(t) dt, \quad (8.2)$$

где постоянная интегрирования также выбирается так чтобы удовлетворить условию (2).

Уравнение (8.2) выражает концептуальное определение UT1, в то время как соотношения между двумя видами A и UT1, представленные в разделе 8.1.2, дают практические определения.

Давайте рассмотрим некоторые полезные соотношения. Так как значения UT1 публикуются в виде поправок к TAI и являются функциями даты TAI (или UTC) даты, то иногда бывает удобно написать (8.2) в виде:

$$[UT1 - TAI](t) = [UT1 - TAI](t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\Delta\omega(t)}{\omega_0} dt, \quad (8.3)$$

где $\Delta\omega = \omega - \omega_0$.

Величина $\omega(t)$ может быть выведена из публикуемых значений $UT1 - TAI$ через

$$\omega(t) = \left[1 + \frac{d(UT1 - TAI)}{d(TAI)} \right] \omega_0. \quad (8.4)$$

Вместо ω_0 обычно используют величину $D(t)$, называемую *длительностью суток*, которая означает длительность в секундах TAI, соответствующую возрастанию на 24 часа в UT1. Тогда

$$D(t) = \frac{\omega_0}{\omega(t)} \times 86400 \text{ с}. \quad (8.5)$$

8.1.2. Практическое определение UT1

Теперь мы остановимся на деликатном вопросе определения направлений, между которыми угол $A(t)$ измеряется двумя способами.

(a) Использование невращающегося начала

Недавно была найдена такая форма $A_s(t)$ представления $A(t)$, иногда называемая *звездным углом (stellar angle)*, в соответствии с которой этот угол линейно связан с UT1 [8.1, 8.2].

Следуя этому методу, обычно используемому астрономами, мы представим направления прямыми линиями, исходящими из некоторой произвольно выбранной точки O . Эти линии пересекают сферу единичного радиуса (*небесная сфера*) в точках, которые могут быть использованы для того чтобы представить эти направления. Экватор является большим кругом на этой сфере и $A_s(t)$ представляется дугой на экваторе на дату t .

Начнем с определения начала $A_s(t)$ в (Т). Для упрощения предположим что ось X^3 соответствует положению P_0 полюса на дату t_0 . Пусть Ω_0 будет началом счета долгот в (Т), т.е. точкой, представляющей X^1 . На дату t полюс передвинется к P вдоль траектории C (см. рис.8.1). Экватор, соответствующий полюсу P , пересечет траекторию экватора, связанного с P_0 в точке N (*восходящий узел*). Для того чтобы установить положение *мгновенного начала счета долгот* Ω закладывается следующее условие: прямоугольная триада, связанная с OP и $O\Omega$, не имеет мгновенной компоненты вращения вокруг OP при движении P . Если P выражается через

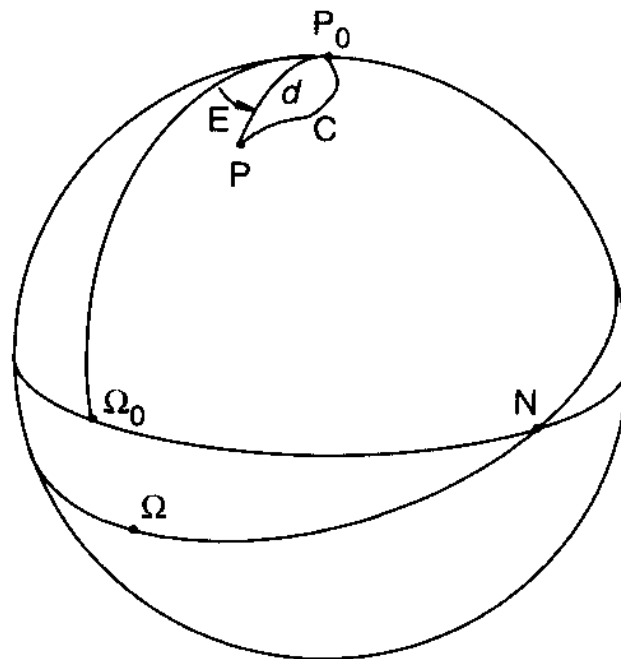


Рис. 8.1. Определение начала Ω мгновенной долготы на движущемся экваторе.

полярные координаты, как показано на рис.8.1, то легко показать, что величина $s = \Omega N - \Omega_0 N$ определяется из

$$s = \int_C (\cos d - 1) dE. \quad (8.6)$$

Положение Ω зависит, таким образом, от истории вращения Земли – это вызывает некоторое беспокойство, но является неизбежным выводом. При этом s мало, потому что d никогда не превышает $1''$. Это удачное обстоятельство, и на практике s всегда принимается равным нулю. Ситуация совершенно отличается в системе (С).

При истолковании в системе (С) та же проблема приводит нас к определению начала на движущемся экваторе, которое называется *невращающимся началом* σ . Однако движение Р в (С) включает в себя вековой член (прецессия) с величиной около $20''$ в год и периодические члены (нута́ция) с общей амплитудой около $20''$, так что s может иметь значительную величину. Например, для прецессии мы находим

$$s_p = 36,28''(t - t_0)^3 - 0,04''(t - t_0)^4 + \dots, \quad (8.7)$$

где $t - t_0$ измеряется в тысячелетиях. Полное выражение для s , включающее прецессию и нута́цию и справедливое вплоть до 2100 года до нескольких единиц $10^{-6}''$, дано в работе [8.3].

Установив начало Ω и σ , мы можем определить $A_s(t)$ по модулю 2π как дугу $\Omega\sigma$. Так как по определению неврещающего начала каждая компонента вращения вокруг полярной оси равна нулю, то $A_s(t)$ представляет непосредственно интеграл в выражении (8.2). Значения UT1 пропорциональны A_s . Полезно вывести соотношения между UT1 и A_s из выражения A_s на 0 часов UT1 каждых суток. Пусть d_u' будет числом UT1 суток, прошедших с 1 января 2000 года от 12 часов UT1 (d_u' положительное или отрицательное целое число плюс или минус 0,5). Тогда, устанавливая $T_u' = d_u' / 36\,525$ (выражаемое в юлианских столетиях по 36 525 суток) и принимая в качестве угловой единицы одну секунду времени, т.е. $15''$ (обычная практика для астрономов), мы имеем:

Для A_s в 0 часов

$$UT1 = 24110,54841 + 8639877,31738 T_u'. \quad (8.8)$$

Это уравнение устанавливается путем применения значения ω_0

$$\omega_0 = 7,292115146706 \times 10^{-15} \text{ радс}^{-1}. \quad (8.9)$$

Чтобы получить A_s в какой-то момент времени, d_u' должно вычисляться таким же способом как и d_u' , но в сутках UT1 и долях суток для этого момента вместе с соответствующим T_u' путем добавления 86400×36525 секунд к коэффициенту при T_u' . Например, для A_s в оборотах

$$A_s = 0,779057273264 + 1,002737811911354d_u. \quad (8.10)$$

На своей генеральной ассамблее в 2000 году IAU рекомендовал использовать связанное с небесным переходным полюсом (CIP) невращающееся начало, которое называется небесным эфемеридным началом в (С) и земным эфемеридным началом в (Т). Внедрение этой рекомендации должно начаться в 2003 году.

(b) Использование равноденствия

Хотя звездный угол A_s и начинает применяться на практике, давайте вернемся к разработкам, основанным на традиционном начале в (С). Этим традиционным началом является *весеннее равноденствие* Υ , пересечение экватора и эклиптики. Величина $\Omega\Upsilon$ является *гринвичским звездным временем* GST. Оно связано с UT1 много более сложным образом, чем звездный угол. Оно включает периодические члены, которые следует вычесть, чтобы определить *гринвичское среднее звездное время* GMST. Затем, согласно решению IAU [8.4, 8.5] и предыдущему определению T_u' в секундах времени, мы находим

$$GMST \text{ на } 0h \text{ UT1} = 24110,54841 + 8640184,812866T_u' + 0,093104T_u'^2 - 6,2 \times 10^{-6}T_u'^3 \quad (8.11)$$

Соотношение в произвольное время выводится таким же образом, как и для A_s .

8.1.3. Другие виды всемирного времени

Иногда требуется оценить всемирное время в таких случаях, когда не известно мгновенное положение полюсов Земли. Для этого на время оценки принимается, что $x = 0 = y$, и это приводит нас к виду времени UT0. Разность $UT1 - UT0$ дается через

$$UT1 - UT0 = -(x \sin L + y \cos L) \operatorname{tg} \phi, \quad (8.12)$$

где ϕ и L – широта и долгота (положительная в направлении на восток) наблюдателя, а x и y координаты полюса. На средних широтах эта разность меньше нескольких сотых секунды.

Существует приближенно-равномерный вид всемирного времени, обозначаемый как UT2, в котором введены поправки на сезонные неравномерности. Разность между $UT2 - UT1$ колеблется в пределах ± 30 мс. UT2 представляет вращение Земли не больше, чем это делает UT0. Только UT1 имеет физическое значение.

Также определен вид UT1R, в котором в UT1 введены поправки на зональные приливные эффекты, воздействующие на полярный момент инерции и имеющие периоды меньше 35 суток. Поправки составляют по

величине менее 2 мс. Наконец UT1R' имеет поправки на эффекты всех приливов, основной член имеет амплитуду 0,16 с и период 18,6 лет.

8.1.4. Техника измерений

Примерно до 1970 года наши знания о вращении Земли основывались целиком на оптических наблюдениях видимого движения звезд по отношению к земным опорным направлениям. После примерно десятилетнего переходного периода оптические методы были заменены методами, используемыми в технике космической геодезии и интерферометрии.

Ряд этих методов сосуществует. Они обеспечивают дополнительные данные для установления небесных и земных опорных координатных систем и мониторинга пяти параметров, точно устанавливающих вращение Земли. Они также являются конкурирующими в некоторых областях, где они приводят к результатам, имеющим сравнимое качество. В следующем кратком обзоре мы увидим, что все эти методы основываются на время-частотной технике.

(а) Радиointерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ)

РСДБ сначала были разработаны для изучения структуры небесных радиоисточников. С начала 1980-х годов они были использованы для измерения направления этих источников по отношению к земным базисам.

Метод измерения включает в себя прием радиоизлучения квазаров в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн с использованием двух антенн, разнесенных на несколько сотен или несколько тысяч километров. Эти антенны определяют базис. Характеристики излучения записываются на магнитную ленту в виде функции времени, которое определяется часами, расположенными у каждой антенны. Давайте предположим, что часы синхронизированы. Тогда можно сравнивать магнитные записи и искать корреляцию между сигналами, принятыми двумя антеннами. Таким образом может быть определена временная задержка между этими сигналами и, если расстояние между антеннами известно, то также может быть определен и угол между базисной линией и направлением на источник (рис.8.2).

Когда внедрялся этот метод, часы еще не могли быть синхронизированы достаточно точно внешними методами, такими как описаны в главе 5. Поэтому часы оставались независимыми и на протяжении измерений, объединявшихся в единый пакет (часто 24 часовой), сличения времени должны были моделироваться, например, полиномом второго порядка по времени. Параметры модели, такие как коэффициенты этого полинома, оставались неизвестными и должны были выводиться из самих РСДБ наблюдений. Поэтому было существенно важным использование часов,

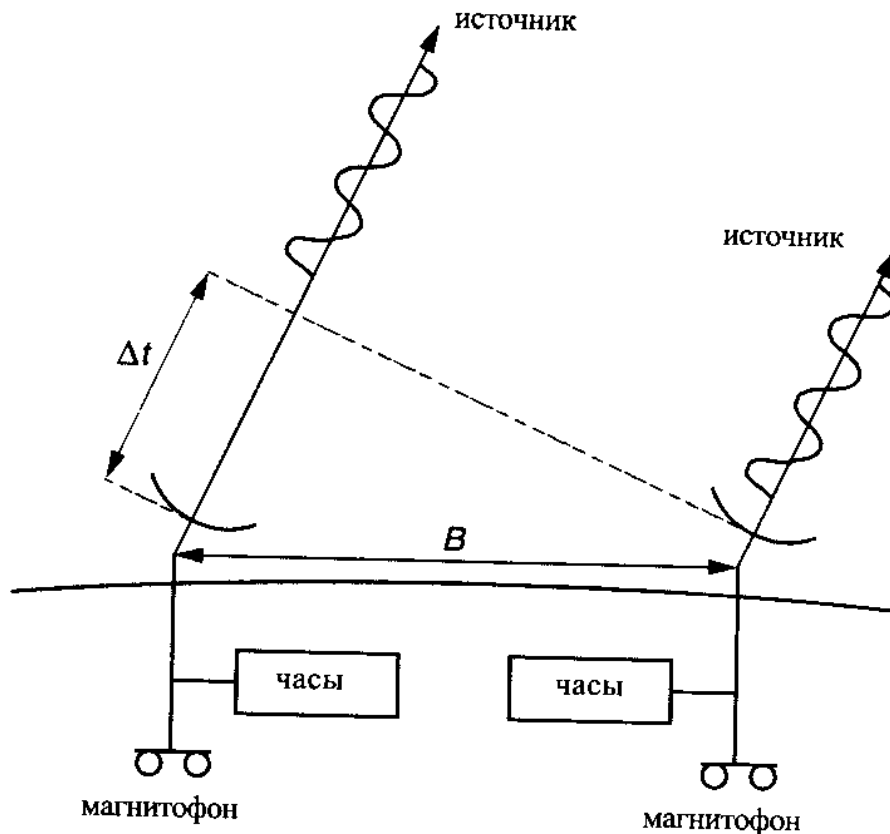


Рис. 8.2. Астрометрическое применение РСДБ. Путем измерения временной задержки Δt , образованной из-за геометрии, мы можем найти ориентацию базисного вектора B по отношению к направлению на источник.

максимально стабильных по частоте за периоды выборки, длящиеся до периодов соответствующих пакетов наблюдений, так чтобы модель их временной разности содержала минимум параметров. Отсюда становится ясным, почему применяются водородные мазеры и это действительно одно из их основных применений.

Ни координаты антенн, ни положение источника также неизвестны априори, или известны с недостаточной точностью. Если анализируются наблюдения нескольких источников в глобальном масштабе с использованием нескольких базовых линий, то можно отыскать различные неизвестные параметры. РСДБ может обеспечить все пять параметров вращения Земли для конструирования и небесных и земных координатных опорных систем. Но земная опорная система может быть получена только с точностью до параллельного переноса. Положение в центре масс Земли не может быть определено.

Применение РСДБ к астрометрии и геодезии координируется международной службой РСДБ (IVS). Мы уже упоминали в разделе 5.6.3с, что как побочный результат мы могли бы иметь сличения часов, если бы была измерима инструментальная задержка РСДБ.

(b) Динамические методы

В РСДБ природа непосредственно приводит нас к невращающейся небесной системе координат. Таким образом расчищается путь для геометрии. Для методов, которые здесь рассматриваются, наблюдения относятся к объектам, находящимся на орбитах вокруг Земли, а именно к искусственным спутникам и Луне. Невращающаяся опорная система координат реализуется через динамическое изучение движения таких объектов. Для обнаружения существенных особенностей этих так называемых динамических методов давайте примем в высшей степени схематический подход. Представим, что Земля сферическая, однородная и изолированная в пространстве, и что спутник вращается по круговой орбите. Плоскость орбиты имеет фиксированную ориентацию в пространстве. Далее, орбитальный период спутника является постоянным и может быть измерен с большой точностью путем выполнения наблюдений в различных точках земной поверхности настолько долго, насколько это необходимо. Затем мы можем установить геоцентрические оси в орбитальной плоскости и, таким образом будет установлена невращающаяся система.

На практике динамические методы очень сложны из-за необходимости учета значительных возмущений. Эти возмущения включают в себя эффекты соседних небесных тел, неравномерности в форме и во вращении геоида, остаточные эффекты трения, давление солнечного излучения и рефракция в земной атмосфере. Все соответствующие проблемы решены, и динамические методы теперь достигают точности, сравнимой с РСДБ везде, где применимы оба метода.

Динамические методы могут определить движение полюсов Земли, обеспечить данные относительно прецессии-нутаии и реализовать земную опорную систему координат, связанную с центром масс Земли (последнее РСДБ сделать не может). Однако остаточные члены, не включенные в поправки для вышеуказанных возмущений, приводят к дрейфу значения UT1. Этот дрейф становится более выраженным при увеличении возмущений, действующих на спутники. Для Луны он очень мал, но не пренебрежим. По этой причине такие методы очень хороши для изучения кратковременных вариаций UT1. Они могут быть распределены по категориям в соответствии с наблюдаемым объектом и способом его наблюдения.

Координаты полюсов впервые были получены в 1967 году путем слежения с использованием доплеровского эффекта за спутниками спутниковой системы Navsat. Улучшенной модификацией этой техники является система DORIS, разработанная французским национальным центром по изучению космоса (CNES) и предназначенная для слежения за спутниками Spot, а также за франко-американскими океанографическими спутниками TOPEX-POSEIDON.

Для исключительно точных применений был запущен ряд сферических спутников во Франции (Starlette, 1975 г.) в США (Lageos, 1976 г.), затем в Японии и в России. Эти спутники покрыты уголковыми отражателями и сделаны очень плотными для того, чтобы уменьшить эффекты возмущения негравитационного происхождения. Расстояние до них измеряется лазерными дальномерами и неопределенности в измерении расстояния исчисляются величиной порядка одного сантиметра. Кроме непосредственного вклада этих спутников в измерение вращения Земли и создание земной системы координат они играют важнейшую роль в отображении геоида. Это в свою очередь является главным вкладом в геофизику и во всю ту технику и технологию, которая базируется на точной орбитографии искусственных спутников Земли. Жаль, что лазерная телеметрия обходится так дорого и так чувствительна к условиям облачности, потому что это очень точный метод, который может быть использован также и для калибровок. Международная служба лазерной дальнометрии (ILRS) обеспечивает координацию этой деятельности.

Динамический метод, включающий в себя наблюдение за двадцатью четырьмя GPS спутниками, кажется наиболее эффективным. Координация и анализ наблюдений являются задачей международной службы GPS (IGS). Эта служба обеспечивает важные результаты по движению земных полюсов и геодезических координат.

Три отражающие панели были установлены на Луне в 1969 астронавтами Аполло и еще две (сделанные французами), советскими беспилотными Луноходами. Одна панель никогда больше не обнаруживалась, но остальные четыре используются для лазерной дальнометрии. Лунная лазерная дальнометрия также достигла сантиметровой точности на этой исключительной технике, разработанной только во Франции и в США, где и получают регулярно данные наблюдений. По этой причине метод лазерной локации Луны привел не к глобальной оценке вращения Земли, а только к некоторым полезным величинам в UT1. Он также дал больший вклад в изучение системы Земля-Луна.

(с) Координация и результаты

Результаты, полученные каждым из технических центров (IVS, DORIS, ILRS и IGS) передаются в IERS, где они обрабатываются. IERS среди других результатов публикует также окончательные значения пяти параметров вращения Земли, настоящие, ежемесячные и за год [8.6, 8.7]. В 2000 году неопределенность в ориентации (I) при усреднении за 5 суток была около 0,00005" по отношению к (T), т.е. $\pm 1,5$ мм для положения полюса вращения на поверхности Земли и 0,0002" по отношению к (C). Неопределенности в $UT1 - TAI$, усредненные также за пять суток, составляют около 10 мкс.

8.1.5. Неравномерности вращения Земли

Если Землю рассматривать как твердое тело, то параметры ее вращения становятся предсказуемыми как только путем измерений установлено небольшое число начальных условий. Согласно этому земные полюса должны бы выполнять круговые движения с периодом 305 дней, а их амплитуду и фазу достаточно было бы измерить только однажды. UT1 изменялось бы линейно со временем. Лунно-солнечная прецессия-нута́ция из-за влияния Луны и Солнца на земное экваториальное вздутие конечно является трудной проблемой теоретической астрономии, но она решена с неопределенностями значительно меньшими, чем остаточные неопределенности в наблюдениях. Необходимо было бы наблюдать только за одним параметром, а именно за динамически сплюснутой формой Земли.

Расхождения между наблюдениями и теорией вращения твердой Земли происходят из-за перемещений жидких компонент на планете, т.е. атмосферы, океанов и ядра по отношению к литосфере, а также из-за упругих и вязких деформаций так называемых твердых компонент. Эти перемещения и деформации могут привести, как мы увидим, к потере вращательной энергии. Даже если основной механизм выяснен, все равно невозможно сделать количественное прогнозирование их влияния на вращение Земли. Мы ограничимся обсуждением UT1. Читатель, заинтересовавшийся вышеперечисленными геофизическими явлениями, может обратиться к [8.8, 8.9].

(а) Вековое замедление вращения Земли

Оценки наиболее древних доступных длительностей суток D относятся ко времени примерно 400 миллионов лет назад. Суточные, лунные и годовые циклы записаны различными природными явлениями. Среди таких явлений укажем прежде всего рост кораллов и двустворчатых моллюсков и их укладку в отложениях. Продолжительность года оставалась практически неизменной, в то время как изменения лунного месяца, выраженные в равномерном времени, довольно хорошо известны. Путем счета суток в году и в лунном месяце можно определить, что длительность суток возрастает в среднем на 2 мс за сто лет.

Это значение согласуется с данными, которые можно получить из наблюдений затмений с древних времен. Появление затмения происходит под действие орбитальных движений и поэтому зависит от равномерного эфемеридного времени (см. раздел 8.2). Однако место, в котором будет наблюдаться затмение, зависит от вращения Земли. Так как размер этого географического сдвига иногда вызывает изумление, то мы обрисуем способ как его вычислить.

Например, предположим, что D возрастает на 2 мс за сто лет. Из (8.5).

$$\frac{d\omega}{dt} = -5,35 \times 10^{-22} \text{ рад с}^{-2}. \quad (8.13)$$

Интегрирование в (8.2) выполняется на интервале времени, продолжающемся последние 2000 лет, т.е. от $t = -2000$ лет, до $t_0 = 0$ (настоящее время) в два приема. Для первого из этих параметров, мы положим $\omega = \omega_0$, а для второго:

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\omega}{dt} t.$$

Получив разность, обнаружим, что с начала христианской эры накопилось отставание во времени на 4,1 часа, что соответствует сдвигу по долготе на 61° . Однако сдвиг узкой полосы, в которой солнечное затмение в эту эпоху было бы полным, смещается на восток только на 14° по отношению к тому смещению, которое было получено из расчета, в котором скорость UT1 имела бы современное значение. Причина уменьшения сдвига заключается в том, что вращение Земли оказывает возмущение на орбитальное движение Луны. Общий сдвиг тем не менее оказывается достаточно большим чтобы извлечь информацию о вращении Земли путем изучения архивных документов.

Вековое замедление вращения Земли приписывается главным образом океанским приливам. Вращательная энергия теряется в мелководных морях. Существует также перенос энергии на орбитальное движение Луны, которая в результате отдаляется от Земли на 4 см в год. Недавние исследования обнаружили значительные потери энергии в глубине океанов [8.10].

(b) Десятилетние флуктуации

Примерно на последних трех столетиях разность между UT1 и эфемеридным временем может быть восстановлена. На рис.8.3 показаны соответствующие значения длительности суток D . Флуктуации достаточно велики чтобы спрятать вековые изменения. Детали этих флуктуаций становятся все более и более ясно различимыми. В качестве много лучшей опоры с 1955 года стала доступной TAI, однако этот период еще слишком мал для изучения вариаций с типичными периодами в несколько десятков лет (вкладка на рис.8.3). Происхождение этих флуктуаций все еще недостаточно понято, но почти не осталось сомнений в том, что они должны происходить из-за взаимодействия между жидким ядром Земли и ее твердой мантией. Могут давать свой вклад и океаны. Они остаются совершенно непредсказуемыми. Наблюдалось, что иногда они приводили к относительным флуктуациям D и следовательно к флуктуациям длительности секунды UT1 с величиной, достигающей около 10^{-7} .

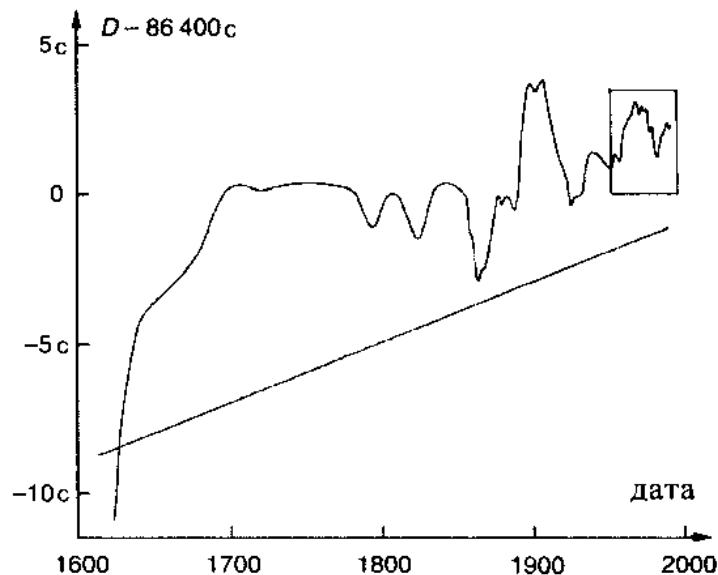


Рис. 8.3. Флуктуации длительности суток D , измеренного сначала в секундах эфемеридного времени до 1955 года (из [8.11]), а потом в секундах атомного времени (вставка). Наклонная прямая линия представляет вековое замедление вращения Земли.

(с) Кратковременные флуктуации

На рис. 8.4 и 8.5 показаны флуктуации в $UT2$ и D с наилучшим достижимым разрешением во времени. Эти флуктуации в существенной мере обязаны движениям атмосферы и закону сохранения углового момента. При движении атмосферы происходит и обмен ее углового момента с моментом твердой Земли. На рис. 8.5 видна годовая компонента флуктуаций. На рис. 8.4 основная часть этой компоненты исключена.

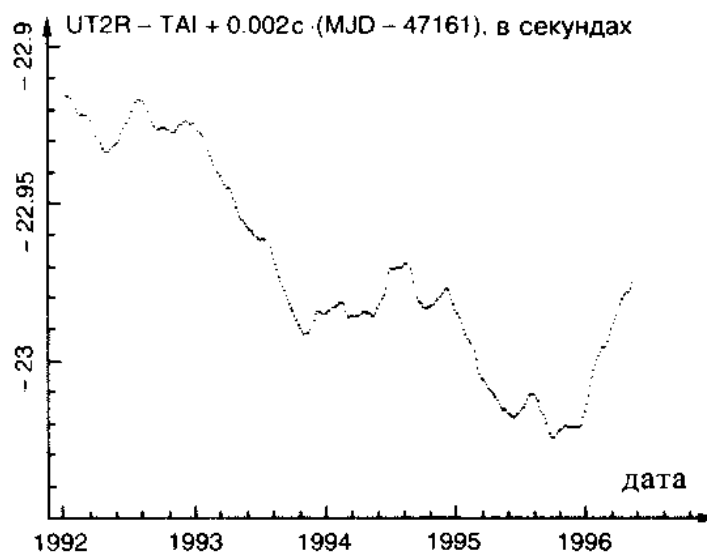


Рис. 8.4. Наблюдаемые значения всемирного времени как линейной функции времени после вычитания годовых вариаций, а также периодических членов из-за приливов. Детали рисунка являются реальными флуктуациями, а не ошибками наблюдений. (Рисунок любезно представлен IERS).

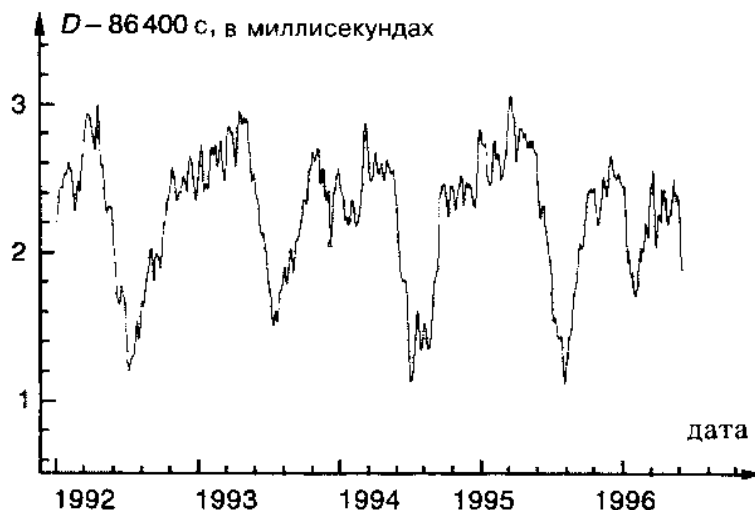


Рис. 8.5. Флуктуации длительности суток D в (атомных) миллисекундах после введения поправок на эффекты кратковременных зональных приливов. (Рисунок любезно представлен IERS).

(d) Частотные характеристики неравномерности всемирного времени

Нестабильность частоты всемирного времени показана приблизительно на рис. 8.7 в конце этой главы. На очень больших интервалах времени в ней доминирует вековое замедление вращения Земли.

8.1.6. Применение всемирного времени

UT1 используется для подстройки всемирного координированного времени, которому требуется не очень большая точность. Если необходима предельно высокая точность, то для ее достижения используется всемирное время, которое обеспечивает связь между небесной и земной системами координат, как функцию от TAI (см. раздел 3.3.2b). Всемирное время используется в комбинации с другими четырьмя параметрами вращения Земли. Эти параметры имеют также важное значение для геофизики. Хотя вычленять факторы, дающие вклад в описание вращения Земли, не очень хорошо, мы все-таки добавим краткие комментарии к каждому фактору.

Невращающаяся небесная система координат служит для установления динамических моделей движения тел в Солнечной Системе путем их наблюдения относительно этой системы координат, будь они естественного или искусственного происхождения. Модели обеспечивают *эфемериды* для данных объектов, позволяющие предсказать положение этих объектов. Конечно, практически существование системы координат опирающейся в радиодиапазоне на РСДБ не всегда помогает. Но она была расширена и на видимый диапазон путем установления углов и угловых

скоростей системы координат, образованной 100 000-ми звезд в программе астрометрического спутника HIPPARCOS [8.12, 8.13, 8.14, 8.15]. Это достигалось путем наблюдения звезд, которые излучают и в радио и в видимом диапазоне спектра. Эфемериды планет и их спутников, а также орбитография космических зондов имеют решающее значение для исследования солнечной системы. К тому же астрофизики нашли, что очень полезно знать собственные (угловые) движения звезд по отношению к невращающейся системе координат.

Очень точная равномерная земная система координат была установлена только недавно. В 1984 году международное бюро времени начало публиковать координаты, которые оно приняло для станций, участвующих в наблюдении вращения Земли, и таким образом создавать первые очертания того, что стало затем ITRF. Национальные и региональные геодезические сети, которые могли отличаться друг от друга до более чем 100 м, стали участвовать в подстройке с целью приближения к ITRF. Эта унификация оказалась тем более полезной в том плане, что GPS основана на системе, очень близкой к ITRF (с разницей в дециметры) и, следовательно, GPS обеспечивает координаты в этой системе. Сантиметровая точность ITRF обеспечивает опору для изучения тектонических деформаций там, где они связаны с крупномасштабным движением тектонических плит или локальным движением в критических районах.

Что касается параметров вращения Земли, то их важность в геофизике становится ясной из их непредсказуемости. Их изменения не всегда ведут к однозначности геофизической модели. Наоборот, они создают основу для отказа от моделей, предсказания которых слишком неточны. Эти параметры имеют также геометрическую важность при преобразованиях координат между небесными и земными системами. Например наблюдение космического зонда с помощью РСДБ дает его направление по отношению к Земле. Для того чтобы обеспечить встречу зонда с другой планетой необходимо вводить поправки в его траекторию, а это требует знания его положения в небесной системе. В этом примере параметры вращения Земли должны быть известны в реальном времени, что возможно только на основе их прогнозов. Этот пример показывает, почему хорошие значения для этих параметров необходимы немедленно, если неопределенности прогнозов должны быть минимизированы. IERS имеет срочную службу (в США), отвечающую за прогнозирование параметров вращения Земли.

8.2. Эфемеридное время

8.2.1. Определение

Концептуальное определение эфемеридного времени ЕТ было дано в главе 4. Это вид классического динамического времени. Единица и начало ЕТ определяются по соглашению путем принятия числового выражения для *геометрической средней долготы* Солнца, установленной Ньюкомбом, а именно:

$$L = 279^{\circ}41'48,04'' + 129602768,13''T + 1,089''T^2, \quad (8.14)$$

где T считается в юлианских столетиях, состоящих из 36 525 *эфемеридных суток*. Начало T находится в начале 1900 года в момент, когда геометрическая средняя долгота Солнца приняла значение $279^{\circ}41'48,04''$. Этот момент времени датировался как 0 января 1900 года ровно в 12 часов ЕТ (решение IAU от 1958 года).

Для тех читателей, которые не знакомы с астрономической терминологией, сделаем краткий обзор. Долгота Солнца измеряется вдоль эклиптики от точки весеннего равноденствия. Последняя является пересечением эклиптики и экватора и она двигается в пространстве из-за движения этих двух плоскостей. Ее движение в эклиптике традиционно описывается двумя типами членов, именно: теми, которые представлены в виде полиномиальной функции от времени (*вековые члены*), и теми, которые представляются точно периодическими функциями. Прилагательное «среднее» относится к тому факту, что периодические члены исключены. Более того, движение Солнца в эклиптике, в том виде как оно видно с Земли, включает в себя периодические компоненты из-за эксцентриситета земной орбиты вместе с возмущениями от других планет и Луны и (очень маленьких) вековых компонент. В средней долготе остаются только вековые члены.

Что касается прилагательного «геометрический», то оно относится к проблеме *абerrации*. Мы видим Солнце в положении, которое оно занимало 8 минут назад, время, необходимое свету чтобы достичь Земли. Это *кажущееся положение* Солнца. В геометрическое положение вносится поправка на эту задержку.

Выражение (8.14) содержит определение секунды эфемеридного времени, которая фактически основана на скорости в долготе $T = 0$. Официальное определение, данное в разделе 4.3.3, было принято так, чтобы показать секунду как часть длительности, но оно обращается к самому эфемеридному времени, а оно не определено. Значение этой части длительности находится путем вычисления длительности тропического года в секундах из (8.14) при увеличении L на 360° , если подставить $T = 0$ в член, содержащий T^2 .

8.2.2. Установление эфемеридного времени

Эфемеридное время было сконструировано и использовалось прежде, чем появилось атомное время, или, по крайней мере, прежде, чем оно начало широко применяться среди астрономов. Поэтому в данном контексте мы должны поставить себя в это положение.

Выражение (8.14) можно рассматривать как начальное определение ET. Соответствующее установление времени состоит в измерении долготы Солнца в момент времени, который наблюдатель датирует датой τ_c по своим часам C. Из измерений долготы ET выводится через (8.14) и мы таким образом получаем $ET - \tau_c$. Так как неточность определений UT1 много меньше чем ET, то результат был дан в универсальном виде путем принятия

$$\Delta T = ET - UT1 \text{ на дату наблюдения.} \quad (8.15)$$

Медленность изменений и отсутствие точности в ΔT допускают большую свободу в выборе опорной шкалы для датирования этих измерений.

Для того чтобы измерить долготу Солнца, оно должно быть расположено относительно звезд на небосводе. Ясно, что это не может быть сделано непосредственно. Что, однако, было возможно, так это датировать прохождение Солнца и звезд через меридиан в UT1 и использовать угловую скорость Земли для выведения разности между их прямыми восхождениями. Измерение зенитных расстояний во время этих прохождений дает разность в наклонениях, необходимую для того, чтобы оценить долготу Солнца. Необходимо множество поправок. Одна из них — абберрация, как мы уже видели, но есть еще поправка на параллакс, так как долгота в (8.14) является геоцентрической, а также поправки на другие астрономические явления. Фактически это начальное определение ET очень трудное и также очень неточное. Если мы предположим что вероятная неопределенность в L равна $0,5''$, то соответствующая неопределенность в ET из наблюдений Солнца равна 10 с. Если мы надеемся измерить интервал времени в ET путем двух наблюдений Солнца с относительной неопределенностью 10^{-8} , то эти наблюдения должны проводиться в течение более 50 лет.

Поэтому должны были быть исследованы другие методы. Астрономы, установившие геоцентрические эфемериды, дающие угловое положение и расстояние до тел в солнечной системе, выбрали единицу и начало их временных параметров так, чтобы они удовлетворяли условиям, выраженным в (8.14). Если это однажды сделано, то тогда все эфемериды имеют ET в своих аргументах. В принципе наблюдение любого из этих тел дает доступ к ET с возможным увеличением точности. Однако, тем не менее остается тот факт, что этот способ нахождения ET зависит от способа калибровки с помощью солнечных наблюдений.

Чем быстрее орбитальное движение наблюдаемого тела, тем точнее определяется ЕТ. В этом отношении Луна является наиболее подходящим объектом. К сожалению, движение Луны возмущается Земным вращением (см. раздел 8.1.5а). Ее средняя геоцентрическая угловая скорость (или *среднее движение*) постепенно уменьшается так, что это можно установить только путем наблюдений. Изменения в среднем движении Луны можно получить только в том случае, если сначала ЕТ была бы определена через наблюдения Солнца и планет. После выполнения этих тщательных калибровок, требующих десятилетий скучной работы, Луна могла бы использоваться для практического получения ЕТ. Луна является чем-то вроде вторичных часов, которые дают возможность получения отсчетов с большей точностью, но при этом возникает риск появления систематических ошибок, происходящих от каких либо ошибок калибровки, возрастающих со временем.

Чтобы гарантировать единую реализацию ЕТ IAU рекомендовал применение специальных лунных эфемерид в обозначении ET_j , где индекс j указывает, что выбрано. (С 1960 по 1984 годы использовались эфемеридные версии с $j = 0, 1, 2$).

Движение Луны относительно звездного фона было измерено через покрытия звезд Луной, или путем наблюдений, или с помощью фотографических методов. Широкомасштабная кампания наблюдений была организована в конце 1950 годов. Несмотря на значительные приложенные усилия, эта техника все же привела к неопределенностям в несколько сотых секунды на годовом усреднении $\Delta T_j = ET_j - UT1$. Когда была установлена TAI, определения ЕТ стали не нужны и было проще принять, что

$$ET - TAI = 32,184\text{с}, \quad (8.16)$$

в котором договоренное значение константы основано на наблюдениях.

8.2.3. Трудности и текущие решения

Кроме неопределенностей, упомянутых в разделе 8.2.2, в ЕТ могут быть большие систематические ошибки. Оно очень чувствительно к способу каким была реализована небесная координатная система, а также к значениям, принятым для различных астрономических констант. Например, каталоги, в которых приводятся положения и собственные движения звезд и реализация невращающейся геоцентрической координатной системы (ранее формировалась из системы (С), обсуждаемой в разделе 8.1.1) должны были пересматриваться несколько раз из-за улучшающихся измерений, а также потому, что неопределенности в собственном движении со временем теряют точность. Каждый пересмотр приводит к скачкам в ЕТ. Чтобы проиллюстрировать роль астрономических констант, мы можем, например, рассмотреть влияние абберационных констант, связанных со

средней долготой в (8.14), на наблюдаемую видимую долготу. Изменение в рекомендованном значении, принятом IAU в 1968 году, привело к скачку в ЕТ на 0,6 с.

Чтобы преодолеть трудности, присущие определению ЕТ через солнечную долготу, IAU в 1994 году просто рекомендовал, чтобы реализация земного времени ТТ, определенная в разделе 7.1.2, была распространена назад во времени на период до 1955 года через динамику солнечной системы. И действительно, единица длительности шкалы ТТ равна длительности атомной секунды на вращающемся геоиде и она была определена таким образом, чтобы в наилучшей степени быть согласованной с определением эфемеридной секунды. Более того начало ТТ было выбрано так, чтобы получить неразрывность с ЕТ. Следовательно замена ЕТ на ТТ не приводит к какой-либо большой разрывности в конструировании эфемерид.

В этом современном применении концепции эфемеридного времени, допустимом для релятивистской динамики, единица шкалы установлена современным атомным определением секунды и начало связано с международной атомной шкалой. Каждая эфемерида k тем не менее ведет к различным приближения ТТ(k) к ТТ, и это должно быть четко сформулировано (Резолюция С7, IAU, 1994 год).

В разделе 4.3.4 мы упомянули историческую роль, сыгранную ЕТ. На рис. 8.7 даны некоторые идеи по ее частотной стабильности.

8.3. Пульсарное время

Пульсары наблюдались впервые в 1967 году [8.16]. Эти объекты посылают радиоимпульсы с регулярными интервалами. Предполагается, что они являются звездами, состоящими главным образом из нейтронов в состоянии предельного сжатия, излучающими радиопучок в фиксированном направлении по отношению к материи звезд. Импульсы излучения, получаемые здесь на Земле, свидетельствуют о вращении пульсаров.

Все пульсары, открытые между 1967 и 1982 годами имеют период вращения порядка одной секунды. На частоту, с которой их импульсы достигают Земли, действует изменение в расстоянии между пульсаром и наблюдателем, в частности, действует орбитальное движение Земли. После введения поправок и при использовании в качестве опоры атомной шкалы времени, было получено, что относительная нестабильность частоты этих импульсов лежит в диапазоне от 10^{-10} до 10^{-11} . Однако в 1982 году астрономы добавили в свою коллекцию небесных объектов другую категорию пульсаров. Это были *миллисекундные пульсары* с периодом в несколько миллисекунд. Диаметры этих объектов оцениваются величиной около 20 км и их массы составляют около 1,4 массы Солнца. Первый

пульсар был открыт Д.С. Бейкером и его группой с применением исключительно большой фиксированной радиоантенны трехсотметрового диаметра в Аресибо (Пуэрто Рико) [8.17]. Этот пульсар PSR1937+21 имеет период 1,6 мс. Форма его импульсов показана на рис.8.6. Вскоре было осознано, что прибытие импульса от PSR1937+21 может быть датировано относительно ТАИ с неопределенностью в несколько десятых микросекунды. Более того, если сразу же учесть его постепенное замедление вращения, то пульсар демонстрирует долговременную стабильность частоты по крайней мере такую же хорошую, как у лучших атомных часов этого времени (нестабильность порядка 10^{-14} или меньше за один год). Было последовательно открыто несколько десятков других миллисекундных пульсаров, причем некоторые из них являются компонентами сложных звездных систем. Была разработана международная программа по установлению времени прибытия импульсов пульсаров. Наблюдения выполнялись на частотах порядка 1 ГГц с применением больших радиоантенн. Собираемая мощность очень мала и составляет порядка 10^{-16} Ватт с наибольших антенн.² Для этой программы не требовалось непрерывных наблюдений. Стабильность частоты и пульсаров и ТАИ такова, что наблюдения могут прерываться на периоды от несколько недель до нескольких месяцев без риска потерять хотя бы один период.

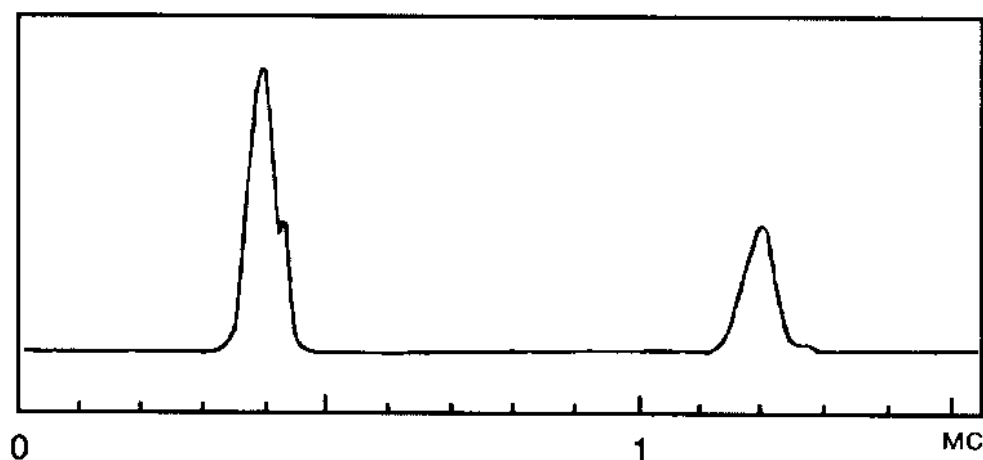


Рис. 8.6. Средняя форма импульсов от пульсара PSR1937+21. Из наличия промежуточного импульса предполагается, что магнитная ось пульсара перпендикулярна к оси вращения.

Появились предположения, что миллисекундные пульсары вернут измерения времени назад, в область астрономии. Однако при этом забыли эффект замедления вращения, который довольно сильно ограничивает

² В этой области используется единица потока Янски, где $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Вт Гц}^{-1} \text{ м}^{-2}$. На типичных наблюдаемых частотах получены значения от 10 до 100 мJy.

полезность измерения времени через вращение пульсаров. Например в случае с PSR1937+21 период P возрастает на $10,5 \times 10^{-20}$ с за секунду, или в относительном значении

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = 7 \times 10^{-17} \text{ с}^{-1}. \quad (8.17)$$

Относительное замедление вращения оказывается в десять раз большим чем замедление вращения Земли. Хотя предполагают, что dP/dt является константой, ее значение не может быть известно априори с достаточной точностью чтобы конкурировать со стабильностью частоты атомных часов. Существуют и другие проблемы. Фаза вращения пульсара должна передаваться на Землю, и в связи с этим появляются неопределенности из-за относительного движения наблюдателя и источника. Например, из-за орбитального движения Земли наблюдения зависят от положения пульсара, и его положение не может быть определено достаточно точно. К тому же пульсары имеют свое собственное движение, если они находятся в двойной системе. Могут быть также флуктуации времени распространения, если сигнал проходит через ионизованную среду в пространстве. По этим причинам вращение пульсара не может ни служить основой для определения единицы времени ни использоваться в качестве часов для реализации шкалы времени, например, используемой в теории TCG.

Как следствие, из-за замедления вращения и нестабильности, появляющейся при оценке изменений во времени распространения, мы должны пересмотреть что означает нестабильность частоты пульсара. В дальнейшем *внутренняя нестабильность* будет означать гипотетическую нестабильность после введения идеальных поправок к константе dP/dt , если бы она наблюдалась в системе координат, движущихся вместе с пульсаром. Именно эта внутренняя нестабильность рассматривается как меньшая, чем нестабильность атомных часов.

Мы можем далее представить возможность калибровки пульсарных часов с помощью атомных часов путем определения дрейфа их частоты на интервале времени длительностью I . Мы могли бы использовать пульсары для улучшения стабильности частоты TAI в ретроспективе на периодах выборки короче чем I путем формирования смешанной шкалы времени [8.18]. К сожалению, случайные неопределенности времени прибытия импульса требуют использования очень длительных интервалов I . Например, если атомная шкала имеет нестабильность 10^{-14} за один год, то с помощью пульсара, излучающего наиболее подходящие импульсы, датируемые в пределах 0,3 мкс, мы можем надеяться на улучшенную стабильность смешанной шкалы, если время выборки лежит между одним годом и I . Недавний прогресс в атом-

ных часах означал бы необходимость расширения I до нескольких десятилетий, что кажется концом этой притягательной идеи. *Пульсарное время* тем не менее рассматривается. Можно было бы сконструировать алгоритмы для наблюдений группы пульсаров и сличения их с атомными часами на больших интервалах времени, что могло бы привести к новым открытиям [8.18].

Изучался также и совершенно другой вклад миллисекундных пульсаров в измерения времени. Путем измерения эффекта Доплера измерение времени этих пульсаров дает положение Земли на ее орбите и, следовательно, ведет к новой мере эфемеридного времени. Здесь можно получить много большую точность отсчетов времени по сравнению с наблюдениями, основанными на определении (8.14) эфемеридного времени через долготу Солнца. Нестабильность частоты также улучшается на периодах выборки меньше шести месяцев. Но в плане долговременной нестабильности ничто не улучшается по сравнению с традиционными методами [8.18].

Третий метод измерения времени с помощью пульсаров заключается в мониторинге орбитального движения двойных пульсаров путем наблюдения эффекта Доплера. Теория такого движения исключительно сложна, так как гравитационное поле очень сильное и гравитационные волны производят значительные эффекты. Однако теория может быть развита. Остается вопрос, – может ли такая динамическая шкала, основанная на этом движении, конкурировать с атомным временем. В исследованиях [8.18] авторы приходят к следующему заключению. Открытие, наблюдение и интерпретация двойных пульсаров могли бы произойти раньше появления атомных часов (так как было бы достаточно иметь кварцевые часы для этих целей) и в этом случае время двойных пульсаров могло бы быть хорошим кандидатом для замены эфемеридного времени. Однако эта мера времени не могла бы занять место атомного времени, имеющего лучшую точность и стабильность.

Таким образом, кажется вероятным, что миллисекундные пульсары не дадут нам ни единицу времени, ни время, которое мы отсчитываем с наших часов. Тем не менее до недавнего времени нестабильность международного атомного времени в какой-то мере ограничивала качество научных результатов, которые могли бы получены путем измерения пульсарного времени. Действительно это было подтверждено ретроспективными вычислениями более точных и более стабильных шкал, чем шкала TAI, как это обсуждалось в разделе 7.4.3. Новые стандарты частоты могут компенсировать неидеальности атомной шкалы до ничтожности, но только время скажет об этом.

Измерение времени пульсаров является наиболее востребованным в применении их в атомных шкалах времени при рассмотрении точности и

долговременной стабильности (на интервалах шесть месяцев или более). Оно приводит к новым результатам в астрометрии, динамике солнечной системы и в самой теории гравитации. Измерение времени двойных пульсаров косвенно подтверждает существование гравитационных волн, предсказываемых теорией относительности, и таким образом усиливает доверие к этой теории [8.19, 8.20]. За эти исследования в 1993 году была присуждена нобелевская премия по физике Р.А.Хулсу и Дж.Х.Тейлору.

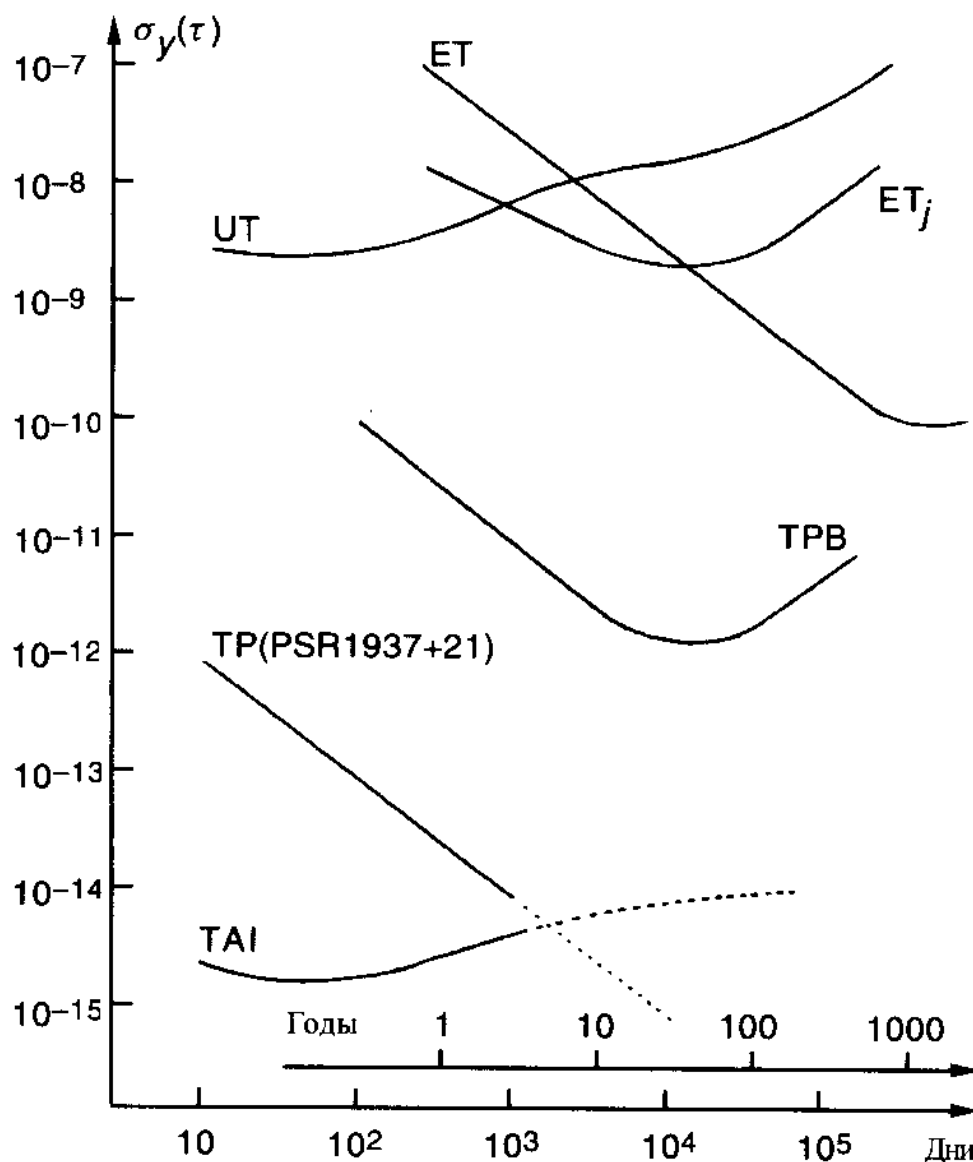


Рис. 8.7. Нестабильности астрономических шкал и TAI: ET и ET_j — эфемеридные шкалы времени установленные наблюдениями Солнца и Луны соответственно; UT — всемирное время; TP(PSR1937+21) — время, основанное на вращении поименованного пульсара; TPB — время, основанное на орбитальном движении двойных пульсаров (оптимальный случай). Что касается TAI, то ее свойства спроектированы с 1998 года в будущее. Этот рисунок основан на деталях из [8.18] и [8.21].

Нестабильность частоты во времени, связанная с пульсарами, показана на рис. 8.7. Этот рисунок дает довольно качественный обзор проблемы. Для астрономических времен он повышается только на порядок величины. Для атомного времени он предполагает, что характеристики стандартов остаются на неизменном уровне.