

Глава 7

Измерения атомного времени

В предыдущих главах была описана научная и техническая работа, которая служит фундаментом для измерения атомного времени. В главе 4 показано, как такие измерения постепенно вытеснили астрономические измерения. В настоящей главе, после напоминания определения атомной секунды и определения основных шкал времени, основанных на атомной секунде, мы будем рассматривать пути, какими атомное время нашло всеобщее применение. Мы опишем все ступени, необходимые для установления и передачи мировых шкал времени, чтобы они могли использоваться и для синхронизации, и как способ воспроизведения единицы времени. Мы также обсудим шкалы времени, подходящие для динамических задач.

7.1. Определения

7.1.1. Определение секунды

Давайте припомним определение, принятое 13-й генеральной конференцией по мерам и весам (CGPM) в 1967 году:

Секунда – это длительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133.

Как объяснялось в главе 3, секунду следует рассматривать как единицу собственного времени вдоль мировой линии, относящейся к атому цезия. Так как атомы движутся по отношению к прибору, который наблюдает их частоту, т.е. по отношению к часам, то должны вводиться поправки, учитывающие это движение, чтобы можно было оценить собственное время часов. На современном уровне точности единственным релятивистским эффектом, который необходимо принимать во внимание, является эффект Доплера второго порядка – эффект специальной теории относительности. Однако скоро может прийти время, когда все часы необходимо будет трактовать в рамках ОТО, для того чтобы обеспечить соб-

ственное время в заранее оговоренной точке, в такой, например, как конкретный разъем.

Если часы находятся в непосредственной близости друг с другом и они неподвижны относительно наблюдателя, то ими можно пользоваться как и в классической физике при условии, что мы принимаем принцип эквивалентности Эйнштейна. Если они находятся на некотором расстоянии, например, на спутнике, и они передают данные с помощью радио, то тогда эти данные должны быть обработаны так, как указано в главе 5.

7.1.2. Международное атомное время и его связь с геоцентрическим и барицентрическим координатными временами

Как объяснялось в главе 3 (раздел 3.3.2e), международное атомное время TAI можно рассматривать как среднее время по показаниям часов. Часы в этом случае работают в соответствии с определением секунды. Предполагается, что они неподвижны относительно Земли и расположены на вращающемся геоиде. Эти определения устанавливают *единицу шкалы* TAI, но все же вся система градуировки должна как-то настраиваться совместно. На эту проблему ссылаются как на *установление начала*. Задача была завершена путем присвоения одной и той же даты в TAI и во всемирном времени (UT) некоторому фиктивному событию, происшедшему 1 января 1958 года в 0 часов UT. (Если более точно, то использовалась форма UT2 всемирного времени, определенная в разделе 8.1.3.). UT основано на вращении Земли и не может быть измерено с такой же точностью как TAI. Более того, в последующем признавалось, что были допущены систематические ошибки при определении UT в 1958 году, и что значения UT должны были корректироваться на несколько миллисекунд. Однако эти поправки не были применены к TAI. Поэтому мы можем сказать, что начало TAI просто фиксируется самим своим появлением с 1 января 1958 года и что она приблизительно совпадает с UT.

В главе 3 мы определили геоцентрическое координатное время. Единица шкалы для этого идеального времени получена теоретически из определения секунды. Однако и в этом случае надо установить начало. Как раз это и сделал IAU в 1991 г. в своей резолюции A4 путем определения частного геоцентрического координатного времени TCG, такого, что

$$TCG - TAI = 32,184 \text{ с, } 1 \text{ января } 1977 \text{ года в } 0 \text{ часов TAI.} \quad (7.1)$$

Появляющееся здесь число 32,184 должно по соглашению трактоваться как точное число на эту дату. Отметим, однако, что существует неопределенность около 1 мкс в показаниях TAI на данную эпоху, так что можно сказать, что TCG выдерживается в пределах этой величины. На практике это не имеет значения.

Мы также видели в главе 3, что другой вариант геоцентрического координатного времени был определен через единицу шкалы с длительностью, очень близкой к длительности (собственной) секунды на вращающемся геоиде. Этим вариантом является земное время (TT), связанное с TCG через выражение разности в секундах

$$TCG - TT = L_G \times 86\,400 \times \Delta D, \quad (7.2)$$

где ΔD – есть время, накопившееся в TAI сутках с 1 января 1977 года 0 часов TAI, и L_G – имеет согласованное значение¹

$$L_G = 6.969\,290\,134 \times 10^{-10}. \quad (7.3)$$

Таким образом, TAI с отстройкой 32,184 с, является реализацией TT. Поэтому мы можем написать

$$TT(TAI) = TAI + 32,184 \text{ с}, \quad (7.4)$$

применяя общепринятые обозначения, когда $U(x)$ представляет реализацию теоретической величины U , промаркированной символом x . Следовательно, TT(TAI) должно читаться как «реализация TT на основе TAI».

Читатель может поинтересоваться откуда берется разница в 32,184 между TT и TAI. В 1958 году было закреплено положение TAI по отношению к UT, а не к эфемеридному времени (ET), потому что последнее было определено довольно неточно. Однако позже астрономам захотелось заменить TT на ET. Все попытки или сдвинуть TAI, или изменить аргумент в астрономических эфемеридах оказались безуспешными. Число 32,184 представляет наилучшую оценку отклонения в секундах между ET и TAI на 1 января 1977 года.

Рассмотрим теперь барицентрическое координатное время, упомянутое в разделе 3.3.2b. Оно используется при изучении планетарного движения и траекторий космических зондов. Слово «барицентрический» означает «совмещенный с центром масс Солнечной Системы». Так же как и для TCG единица шкалы барицентрического координатного времени основана на (собственной) секунде. Начало одного из частных барицентрических координатных времен, обозначаемого TCB, выбрано так, что TCB имеет тоже показание, что и TCG на 1 января 1977 года в 0 часов TAI в центре масс Земли. Существенно уточнить «в центре масс Земли», потому что соотношение между этими двумя координатными временами является четырехмерным, с точностью до c^{-2} это соотношение дается следующим выражением².

¹ Соотношение (7.2) является приблизительным согласно решениям, принятым по TAI в 2000 году. ΔD должно отсчитываться в сутках TCG с 1 января 1977 года в 0 часов TAI. Разность составляет около 10^{-18} в относительной частоте. Во времени оно составляет 3 нс за столетие.

² Более точное выражение приводится в Рекомендации MAC B1-5 (2000).

$$TCB - TCG = \frac{1}{c^2} \left\{ \int_{t_0}^t \left[\frac{v_E^2}{2} + U_p(\mathbf{x}_E) \right] dt + \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_E) \right\}, \quad (7.5)$$

где \mathbf{x}_E и \mathbf{v}_E обозначают барицентрическое положение и скорость центра масс Земли, параметр \mathbf{x} является барицентрическим положением наблюдателя и U_p это ньютоновский гравитационный потенциал всех тел Солнечной Системы за исключением самой Земли. В интеграле $t = TCB$ и t_0 выбирается в соответствии с началом координат, установленном ранее. На поверхности Земли последний член достигает максимального значения 2,1 мкс.

Для земного наблюдателя интеграл в (7.5) приводит к приращению, пропорциональному времени со скоростью около 0,5 с за год, к которому надо также добавить периодические члены. Наибольший из них происходит от эллиптической формы орбиты Земли. Этот периодический член имеет годовой период, а его амплитуда равна 1,7 мс. Для того чтобы достичь точности в 100 нс необходимо учесть более сотни периодических членов в [7.1].

К 1970-м годам появилась необходимость применения релятивистской модели для вычисления эфемерид тел в Солнечной Системе. В 1976 году IAU (МАС) определил временной аргумент в эфемеридах путем проведения преобразования единицы шкалы в барицентрическом координатном времени так, чтобы остались только периодические члены в ее разности с ТТ. В 1979 году новая шкала времени получила название динамическое барицентрическое время TDB. В это время некоторые астрономы высказывали сомнения в справедливости ОТО, поэтому все основные положения этой теории и ее терминологии тщательно избегались. Соотношение между TDB и TCB выражается в секундах через

$$TCB - TDB = L_B \times 86\,400 \times \Delta D, \quad (7.6)$$

где ΔD имеет то же самое значение, что и в (7.2), а L_B – в настоящее время оценивается как

$$L_B = 1,550\,519\,768 \times 10^{-8} \pm 2 \times 10^{-17}. \quad (7.7)$$

Как и ТТ, носившее в период между 1979 и 1991 годами название TDT (земное динамическое время), так и TCB и TDB стали основываться на ТАИ с помощью соотношений (7.2), (7.5) и (7.6). Использование TDB вместо TCB приводит к теоретическим усложнениям. Однако был выполнен большой объем работы чтобы принять TDB за временной аргумент, особенно в конструкциях эфемерид JPL (JPL – лаборатория реактивного движения), которые используются для планетарных исследований. По этой причине трудно сделать желательный переход к TCB.



Рис. 7.1. Соотношения между координатными шкалами времени, начиная с собственного времени наблюдателя τ . Барицентрические и геоцентрические шкалы связаны четырехмерными преобразованиями, такими, что TAI может быть использована для реализации всех теоретических времен. Величины L_B , L_G и ΔD – определены в тексте.

На рис. 7.1 просуммированы соотношения между различными координатными шкалами времени.

7.2. Установление международного атомного времени

7.2.1. Алгоритмы шкалы времени

Если доступно несколько атомных часов, то их показания могут использоваться для установления единой шкалы времени. Она конечно более надежна, чем шкалы времени, основанные на вкладе каждого часов, взятых по отдельности, и можно надеяться, что она имеет лучшие характеристики, чем любая шкала отдельных часов.

Если часы достаточно локализованы в том смысле, что они не разбросаны очень широко, они могут быть использованы для того чтобы установить собственное время их лабораторий без необходимости учета любых релятивистских эффектов кроме эффекта Доплера второго порядка, вытекающего из специальной теории относительности. Если часы распределены по стране или по всему миру, то обычно конструируют реализацию земного времени ТТ.

Это обычно происходит, например, когда устанавливается ТАИ. В этом случае собственное время τ_C каждого часов C должно быть преобразовано в приближение t_C времени ТТ, прежде чем данные могут быть объединены надлежащим образом для установления локальной шкалы времени. Это преобразование вводит произвольные дополнительные константы, но мы увидим, что их присутствие не приводит к препятствиям. Для того чтобы упростить обозначения, t_C будет на протяжении этой главы писаться как t_C .

Прежде чем установить алгоритм для некоторой шкалы времени, которую мы намерены сконструировать, должен быть составлен, по крайней мере, следующий перечень вопросов:

- На каком периоде усреднения мы хотим оптимизировать стабильность частоты?
- Хотим ли мы иметь определенную точность частоты и если так, то что будет приемлемым компромиссом в случае, если это требование влияет на стабильность?
- Какой период должен быть между данными по сличению часов (период сбора данных)?
- Какой интервал длительности должен быть между данными, с которыми вычисляемые шкалы становятся доступными, и какой интервал до последней даты, для которой эта шкала была вычислена?
- Как часто должны обновляться вычисления?

Различные используемые промежутки времени показаны на рис. 7.2.

Ответы на эти вопросы взаимозависимы. Например, если мы добиваемся долговременной стабильности, мы можем принять большие интервалы между сличениями часов по сравнению с интервалами, необходимыми для кратковременной стабильности. Тем не менее в диапазоне различных случаев вопрос остается открытым. В некоторых применениях шкала должна быть получена почти в реальном масштабе времени, в то время как для ТАИ является приемлемым двухмесячный интервал (в настоящее время 30 суток). Для изучения пульсаров, у которых предполагается высочайшая возможная добротность, никто не будет жаловаться на необходимость ожидания в течение целого года. Поэтому невозможно описать типовой алгоритм. Кроме того алгоритмы подвержены техничес-

ким веяниям, таким как, например, изобретение новых часов или новые методы сличения времени. Тем не менее все алгоритмы проявляют некоторые общие свойства, хотя они до некоторой степени могут быть спрятаны с помощью математического формализма. Эти свойства могут быть проявлены путем испытания с помощью алгоритма, установленного МБВ в 1973 г. и все еще используемого, с некоторыми улучшениями приспособленным к современным техническим достижениям [7.2, 7.3], в МБМВ для установления TAI.

7.2.2. Алгоритм для международного атомного времени

(а) Общая организация

Международное атомное время в настоящее время основано на 200 атомных часах и стандартах частоты из примерно шестидесяти различных лабораторий, сличаемых через GPS и российский GLONASS, а также методом дуплексной спутниковой передачи времени и частоты (TWSTFT) (см. раздел 5.6.3).

Алгоритм установлен таким способом, чтобы обеспечить точность и долговременную стабильность частоты на временах от одного месяца или более. Благодаря долговременной стабильности становится возможным установить достаточно большое время для публикации TAI (от одного до двух месяцев). При этом действительно разность времени между локальными часами и TAI может быть экстраполирована так, чтобы получить соответствующее приближение к TAI в реальном масштабе времени.

TAI устанавливается в два приема. Алгоритм стабильности дает нам так называемую *свободную атомную шкалу* (EAL), т.е. свободную среднюю шкалу, стабильность которой оптимальна для соответствующих периодов выборки данных. Затем долговременная система автоподстройки, основанная на частоте первичных стандартов, создает TAI путем использования зависящих от времени поправок $[TAI - EAL](TAI)$ по отношению к EAL. Это так называемое *управление* стремится обеспечить точность частоты TAI.

График показан ниже (см. рис. 7.2).

- Период вычисления: один месяц. Дата t_0 находится посреди месяца m .
- Скорость сбора данных: — каждые 5 суток (в 0 часов UTC для данных, оканчивающихся на 4-й или 9-й день, если дни представлены в модифицированной юлианской дате (MJD)). Раньше, до 1995 года, данные собирались каждые 10 суток.
- Последние данные по публикациям: t_3 — в конце месяца $m-1$.
- Почти не привлекаются другие данные (т.е. $t_2 - t_3 = 0$).

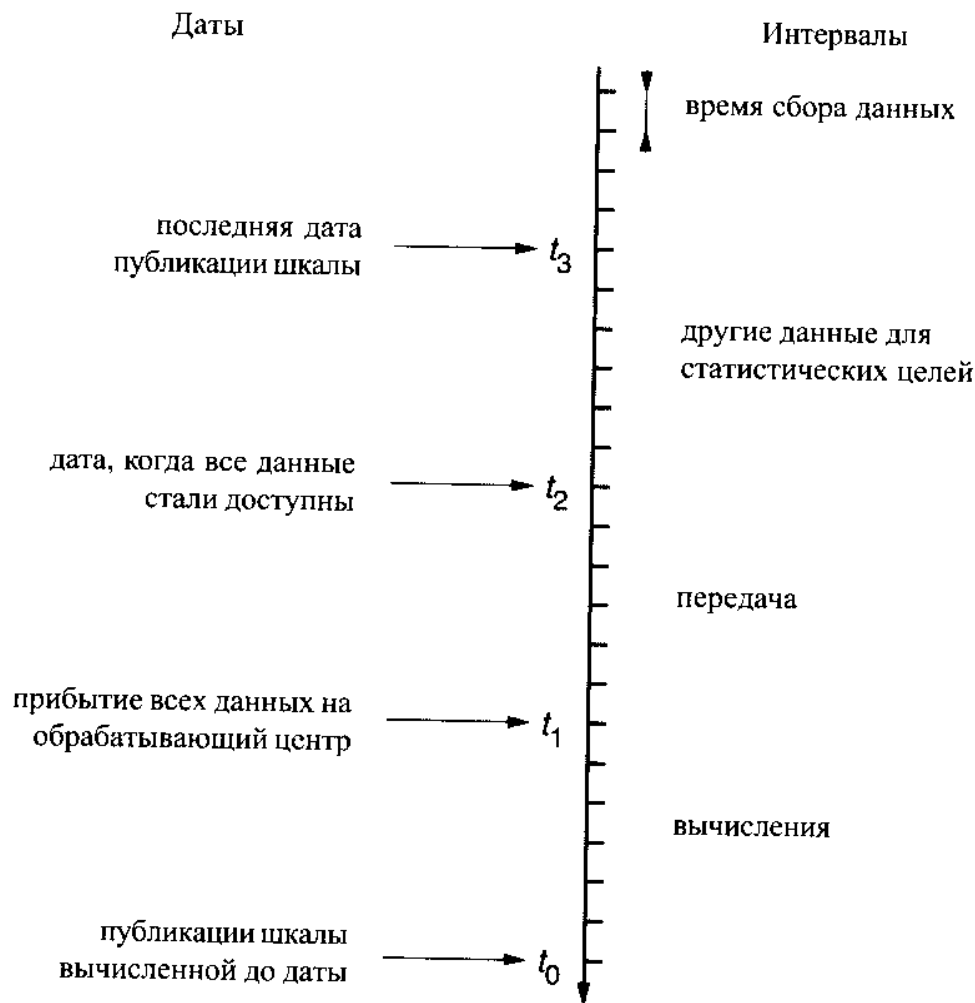


Рис. 7.2. График проведения алгоритмов шкалы времени. Данные подразумевают либо разность показаний часов, либо информацию, которую можно использовать для вычисления таких разностей, (например, данные приема сигналов GPS).

- Для передачи требуется несколько суток (включая подготовку данных в участвующих лабораториях). Это приводит к определенному уровню ограничений на часть различных лабораторий и на BIPM.

(b) Алгоритм стабильности

Начнем с рассмотрения воображаемой ситуации, когда все участвующие часы I ($I = J, K$ и т.д.) считываются одновременно согласно соглашению о координатной одновременности, на дату t в геоцентрическом координатном времени (TCG, TT или TAI). Показания часов $\tau_I(t)$ преобразуются в $t_I(t)$ путем введения произвольных констант интегрирования. Обозначив $\{ \}(t)$ взвешенное среднее по ансамблю часов на дату t , EAL можно определить через

$$[EAL](t) = \{t_I\}(t), \quad (7.8)$$

присваивая вес в соответствии с выбранными критериями стабильности.

Определение (7.8) может отвечать требуемым целям столько долго, сколько все часы могут работать, пока не изменятся их веса и не введутся новые часы. Этому можно подвести итог, заключающийся в том, что ансамбль часов должен оставаться неизменным. Если ансамбль каким-либо образом изменяется, то ясно, что это вызовет появление скачка времени, так как не все часы имеют одно и то же показание времени, и это приведет также к скачку частоты, так как не все часы имеют одну и ту же частоту. Для избежания такой ситуации определение (7.8) заменяется на

$$[EAL](t) = \{t_I\}(t) + A + B(t - t_0), \quad (7.9)$$

где t_0 какое-то произвольно выбранное начало, A и B константы, которые при изменении ансамбля часов изменяются так, чтобы поддержать непрерывность времени и частоты. Пусть t_m будет датой, когда были совершены некоторые изменения. Обозначим старые значения A и B через A_- и B_- и новые значения через A_+ и B_+ . Требования непрерывности времени выражаются через

$$A_+ = A_- + \{t_I\}_-(t_m) - \{t_I\}_+(t_m) - (B_+ - B_-)(t_m - t_0), \quad (7.10)$$

ансамбль усредняет $\{t_I\}_-(t_m)$ и $\{t_I\}_+(t_m)$, которые вычисляются в момент времени t_m для старого и нового ансамбля соответственно. Рассмотрим случай, когда одни часы остановились. Тогда t_m является последней датой, для которой часы все еще давали данные. Поэтому оно включается в $\{t_I\}_-(t_m)$, но не в $\{t_I\}_+(t_m)$. До тех пор, пока вопрос касается непрерывности частоты, это приводит к

$$B_+ = B_- + \left\{ \frac{dt_I}{dt} \right\}_- - \left\{ \frac{dt_I}{dt} \right\}_+, \quad (7.11)$$

где производные вычисляются во время t_m .

В то же время это есть прямой и строгий способ вычисления A_+ если мы нашли B_+ , но фактически из (7.11) невозможно получить B_+ по тем простым причинам, что мы не сможем оценить мгновенные значения частот. (Мы можем заменить начало, выбрав $t_0 = t_m$. Тогда B_s не нужно для вычисления A_+ .) Мы должны работать со средними значениями частот. До даты t_m должна быть выбрана длительность, на которой вычисляются эти средние частоты. После даты t_m данные недоступны, если мы хотим создать шкалу в реальном или близком к реальному времени. Следовательно, мы должны *предсказать* частоты каждого часа на основе их предыдущего поведения.

Тонкая проблема возникает при рассмотрении (7.11), потому что в рассмотрение включаются производные по отношению к неизвестному идеальному времени t . Однако нам необходима только разность между



двумя такими производными. Это означает, что t можно заменить на физически реализуемую шкалу, при условии, что ее частота достаточно стабильна и лежит достаточно близко к частоте t . На практике EAL сама может выполнять эту задачу. Следовательно, используя прошлые разности частот каждых часов по отношению к EAL, мы пытаемся предсказать будущее значение этих разностей.

Предсказания частоты и взвешивание формируют центральную часть алгоритмов шкалы времени. Сюда же должна быть добавлена другая важная задача, а именно обнаружение аномального поведения каких-либо часов, которое ведет к необходимости исключения этих часов из ансамбля. Это серьезная статистическая проблема. Тип решения, приведенный в действие, в конечном счете влияет на качество производимой шкалы.

Теперь мы преобразуем наши уравнения так, чтобы они были применимы к реальным измерениям. Этими измерениями являются разности собственных времен между часами, полученные методами, описанными в главе 5. Напомним, что эти разности в показаниях относятся к одной и той же дате t , но так, что они изменяются слабо со временем, и поэтому они могут быть датированы опорной шкалой θ , для которой остается большая свобода выбора. На практике используется UTC. Начнем с разности собственного времени двух часов J и K и вычислим разность координатных времен t_J и t_K , выбирая постоянные интегрирования произвольным образом. Это дает

$$[t_J - t_K](\theta) = \delta_{JK}(\theta), \quad (7.12)$$

где δ_{JK} — измеренное значение. Положив

$$x_J(\theta) = [EAL - t_J](\theta) \quad (7.13)$$

уравнения (7.9) и (7.12) переходят в

$$\{x_J\}(\theta) = A + B(\theta - \theta_0), \quad (7.14)$$

$$x_J(\theta) - x_K(\theta) = -\delta_{JK}(\theta), \quad (7.15)$$

где коэффициент $t - t_0$ заменяется на $\theta - \theta_0$, так как B исключительно мало (порядка 10^{-13}). Сеть сличения времени организована так, чтобы система формировалась по (7.14) и уравнения типа (7.15), написанные для пары часов, могли бы быть решены точно, потому что обработка избыточных связей приносит с собой больше проблем, чем преимуществ. Если ансамбль часов изменяется, то A и B переустанавливаются через

$$A_+ = A_- - \{x_J\}_-(\theta_m) + \{x_J\}_+(\theta_m) - (B_+ - B_-)(\theta_m - \theta_0) \quad (7.16)$$

и

$$B_+ = B_- - \left\{ \frac{dx_I}{dt} \right\}_- + \left\{ \frac{dx_I}{dt} \right\}_+, \quad (7.17)$$

где, как и прежде, t заменяется производной по EAL.

Полученное решение для x_I преобразуется к EAL — τ_I с помощью теоретических соотношений между τ_I и t_I при тех же значениях постоянных интегрирования, что и для обратного преобразования. Тогда EAL становится доступной в месте расположения участвующих часов через поправки к их показаниям.

При выполнении вычислений мы используем тот факт, что все часы, участвующие в конструировании EAL, установлены неподвижно на Земле. Для перехода от их собственного времени к координатному времени необходимо учитывать только постоянный сдвиг частоты. Этот сдвиг используется не совсем точно. Он содержится в поправочном члене B . Из чего следует, что алгоритм стабильности производит непосредственно EAL — τ_I . Однако если мы хотим объединить спутниковые часы, то необходимо их полное описание. Прежде упомянутое упрощение, в котором θ_0 сделано совпадающим с θ_m приводит к изменению θ_0 каждый раз, когда изменяется ансамбль.

(с) Управление частотой

Только что описанный алгоритм стабильности оптимизирует стабильность на периоде усреднения, который был установлен путем выбора способа предсказания частот. В своем применении к EAL мы увидим, что оптимальное значение находится где-то между 30-м и 60-м днями. Однако алгоритм не гарантирует нас от долговременных флуктуаций. Пошаговая настройка B_S может даже привести к неограниченному дрейфу частоты.

Первая проблема, которую надо решить, состоит в том, чтобы оценить частоту EAL используя данные первичных стандартов. В этом суждении все частоты приводятся к уровню вращающегося геоида.

Первичные стандарты обеспечивают оценку среднего значения частоты EAL между датами $\theta_i - \theta_f$. С течением времени, когда калибровка становится частью прошлого, EAL остается памятью этой калибровки благодаря стабильности своей частоты. Тем не менее эта память не идеальная, и поэтому должен быть добавлен вклад от нестабильности частоты EAL к внутренне присущим нестабильностям стандарта.

Для этого был разработан *фильтр*, дающий оптимальное значение для средней частоты EAL на данном интервале путем присвоения коэффициентов (с суммой 1) по всем возможным калибровкам независимо от того, когда они были, до того или после. Слово «фильтр» предпочтительнее, чем вес, потому что некоторые коэффициенты могут быть отрицательным. Фильтр учитывает следующие факторы:

- статистическую модель для частотного шума в EAL, выражающуюся в сумме белого фазового шума (вклад сличений времени), белого и фликкерного частотного шума, а также шума из-за случайного блуждания частоты (вклад часов);
- случайную и систематическую неопределенности в калибровке частоты;
- начальную и конечную даты калибровки и период оценки.

Теория по этим вопросам достаточно сложна и здесь обсуждаться не будет. Обсуждение можно найти в [7.4].

Управление шкалой состоит в нахождении функции $P(\theta)$, позволяющей нам вывести TAI из EAL через

$$TAI(\theta) = EAL(\theta) + P(\theta), \quad (7.18)$$

таким образом, что частота TAI остается близкой к частоте точного фильтра, и на ней не сказывается нестабильность фильтра по отношению к EAL. Например, если частота TAI изменяется сразу же как только происходит новая калибровка, то скачки частоты будут неприемлемы. Чтобы избежать такой ситуации нестабильность частоты $P(\theta)$ устанавливается так, чтобы она была меньше, чем оцениваемая нестабильность частоты EAL.

(d) Применение

Здесь представлено в высшей степени схематическое описание применения алгоритма, так как за это время был достигнут значительный прогресс и в разработке атомных часов и в сличениях времени, и поэтому алгоритм BIPM должен иметь определенный уровень гибкости в своем применении. Наше обсуждение относится к ситуации конца 2000 года. Однако начальная оценка роли, которую играет TAI, была выполнена в ВИН еще в 1973 году и регулярно подтверждалась международными организациями. По этой причине основные принципы алгоритма с тех пор не изменялись.

Когда проводятся вычисления, то целое число секунд опускается. Они вводятся опять после получения результатов. Таким образом, мы можем рассматривать следующие уравнения одинаково применимыми как к TAI так и к UTC.

Сеть сличения времени. Обозначим через k лабораторию, дающую вклад в TAI. Каждая лаборатория k имеет *ведущие часы*, которые обеспечивают приближение $UTC(k)$ к всемирному координированному времени UTC. Эти часы служат в качестве опоры для всех процедур сбора местных данных и их обработки. В частности измеряется разность времени $UTC(k) - \tau_c$ для всех часов C в лаборатории k . BIPM использует только значения, измеряемые каждые 5 суток в *стандартные даты*. Они определяются

модифицированной Юлианской датой, оканчивающейся на 4-е и 9-е сутки в 0 часов UTC.

Разнесенные сличения времени относятся к UTC(k). Почти непрерывно BIPM оценивает стандартные данные путем усреднения или фильтрации. Рис. 7.3 показывает сеть линий связи по передаче времени. Несколько лабораторий действуют как центры для линий связи до 1000 км путем применения GPS и GLONASS. Эти центры связаны вместе с помощью лучшей доступной техники, а именно TWSTFT и GPS с использованием в последнего случае точных эфемерид, вычисляемых ретроспективно, и измеренных значений ионосферных поправок. В некоторых странах существует определенная иерархия, в которой центральная лаборатория обеспечивает связь с рядом национальных лабораторий. Эта иерархия, например, долго сохранялась во Франции.

Алгоритм стабильности. Алгоритм стабильности, называемый Алгос, вычисляет значения $EAL-UTC(k)$ в стандартные даты за один пакет. (Продолжительность одного пакета обычно 30 суток, а иногда бывает 25 или 35 суток). Совершенно произвольно эти даты начала и окончания пакета были выбраны как ансамбль модифицированных дат, т.е. ранее определенных θ_m . Следовательно, вес часов удерживался неизменным на каждом месячном интервале. Вес часов равен нулю, если часы дают незавершенные данные, или они остановились или были введены в ансамбль после начала интервала.

В настоящее время (2000 г.), Алгос обрабатывает данные более чем 200 часов, главным образом промышленных цезиевых часов, имеющих отличную долговременную стабильность. Так как здесь уместна только стабильность, то вклад могут давать и другие часы. Сейчас в формировании TAI участвуют около сорока водородных мазеров и их число остается стабильным.

Ансамбль усредняется через взвешенные значения. Вес часов C пропорционален обратной величине вариации $\sigma_C^2(12, \tau)$ из 12 средних значений частоты, взятых за каждый месяц по отношению к EAL³. То, что была выбрана эта вариация, а не обычная двухвыборочная вариация $\sigma_{y,C}^2(\tau)$, сделано для того, чтобы уменьшить вес часов, имеющих дрейф частоты или, как это иногда отмечалось, годовые флуктуации частоты. В модели частотных фликкерных шумов, которые подходят для рассматриваемых значений τ

$$\sigma_C^2(12, \tau) = 2\sigma_{y,C}^2(\tau). \quad (7.19)$$

³ В долговременных вариациях τ представляет длительность, за которую вычисляется средняя частота, т.е. период усреднения, как это обсуждено в разделе 5.2.3.

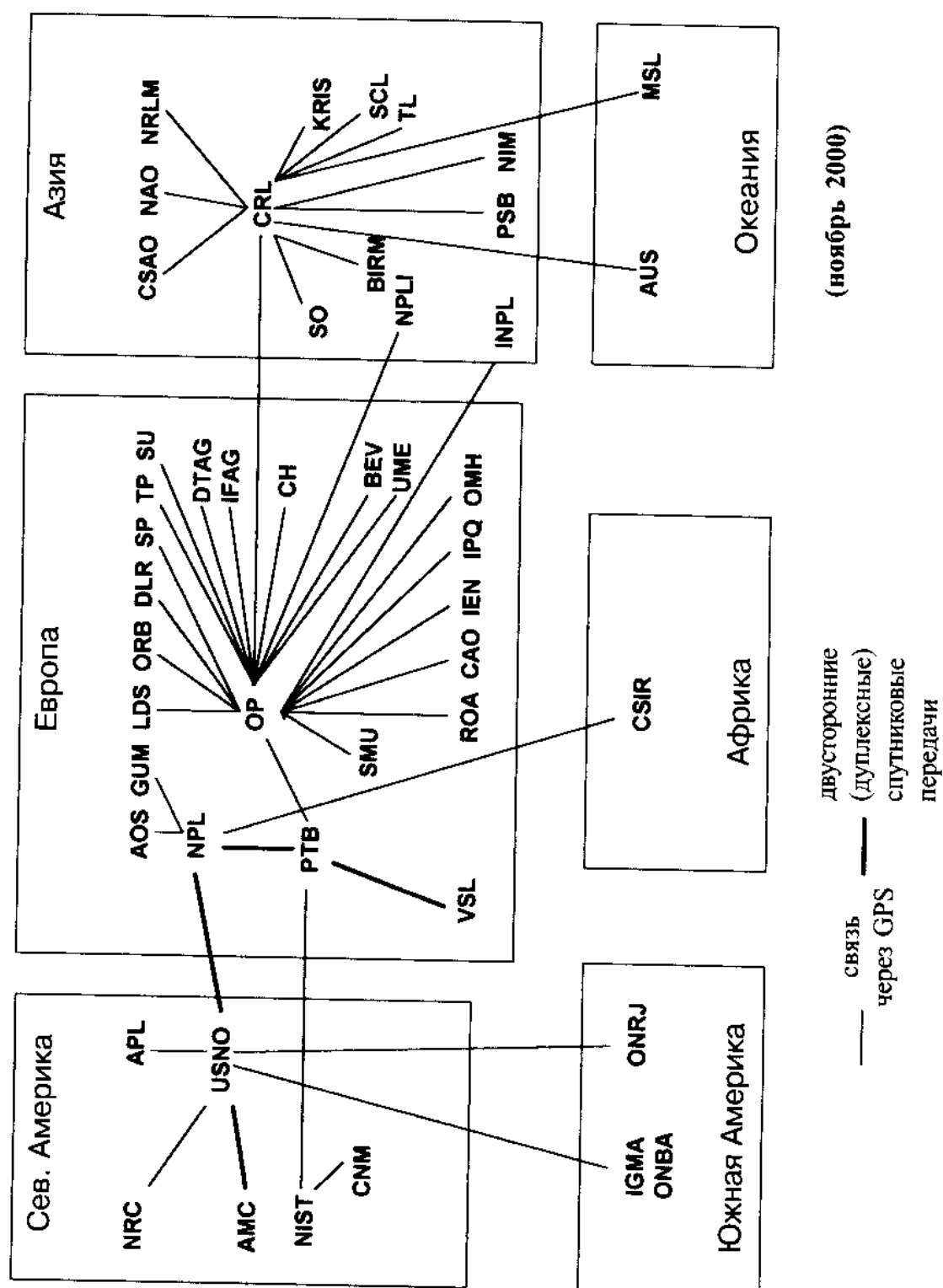


Рис. 7.3. Линии передачи времени для установления TAI (на ноябрь 2000 года). Акронимы даны в приложении 1.

Когда флуктуации частоты часов оцениваются по отношению к EAL, в которую они и дают вклад, то некоторые часы последовательно усиливают свой статистический вес и обычно доминируют в ансамбле. Эту проблему можно решить путем применения верхнего предела взвешивания. Этот предел изменяется несколько раз для того, чтобы соответствовать улучшенным часам. С января 1998 года правило таково, что никакие

часы не могут получить вес, превышающий 0,7% от общего веса. Однако, вместе с возрастающей ролью, которую играют новейшие промышленные часы, это правило становится неудовлетворительным, потому что оно не достаточно сильно осуществляет отбор среди этих часов. Относительный верхний предел L в виде L/N в настоящее время находится в стадии изучения (ноябрь 2000), где N – общее число часов и L может быть между 2 и 3. Были также предприняты теоретические исследования для определения оптимального верхнего предела.

Для того чтобы обнаружить аномальное поведение часов делаются сличения их средней частоты по отношению к EAL за последний месяц, т.е. за месяц, для которого вычисляется TAI, а также их среднее значение частоты по отношению к EAL за последние 11 месяцев. Если вариации отличаются больше чем в три раза по отношению к вариациям, ожидаемым от случайных флуктуаций, то вес этих часов устанавливается равным нулю. Все часы проходят этот тест. Вычисления повторяются каждый раз, когда исключаются какие-либо часы. Применяются четыре итерации.

Частоты предсказываются из простого продолжения наблюдения частоты по отношению к EAL за предыдущий месяц. Многие попытки исследования реальных данных для получения лучших предсказаний другим способом не привели к успеху.

Любые новые часы остаются под наблюдением по крайней мере четыре месяца прежде чем эффективно начинают участвовать в TAI. За этот период они включаются в расчеты с нулевым весом. Если число частотных выборок n меньше 12, то $\sigma_c^2(12, \tau)$ оценивается по $\sigma_c^2(n, \tau)$ в предположении фликерного частотного шума.

С алгоритмом Алгос возможно применение различного взвешивания и правил прогнозирования в соответствии с типом часов. Например, было бы резонно принять во внимание дрейф частоты в водородных мазерах. До сих пор эта возможность не была внедрена.

Как пример рассмотрим лаборатории и часы, принимающие участие в формировании шкалы за период с 28 августа по 28 сентября 2000 года. BIPM получил данные от 221 часов (179 цезиевых часов и 42 водородных мазеров) из 39 лабораторий и национальных организаций, которые могут включать в себя несколько лабораторий. 121 часам был приписан максимальный вес, включая 98 последних промышленных часов, 4 первичных цезиевых часов, построенных в исследовательских центрах и 17 водородных мазеров. Нулевые веса были приписаны 44 главным образом новым часам в их испытательные периоды. Наконец 56 остальных часов получили промежуточные веса, обычно очень небольшие.

Часы, которым были приписаны максимальные веса, дали 85% вклада и, как упоминалось ранее, это очень большая пропорция.

Управление частотой. В 1969 году ВИН, опираясь на навигационную систему Лоран-С, имело возможность применять не метод средних частот от каждых часов при вычислении TAI (известной тогда как TA(VIN)), а заменить его общим усреднением по времени. Однако при этом терялся доступ к индивидуальным часам. TAI было средним от атомных шкал времени, устанавливаемых небольшим числом развитых национальных центров времени. Она вычислялась по алгоритму, похожему на Алгос [7.5]. Первоначально поправки B в определяющем уравнении типа (7.9) были равны нулю для трех участвующих центров времени, а именно: военно-морской обсерватории (USNO) США, физико-технического института (PTB), Германия, и национальной комиссии по времени, Франция, в Парижской обсерватории. Не было попыток ни соединить частоты с предыдущими значениями TAI, ни настроить их с данными от первичных стандартов, так как эти данные были слишком разрозненные и слишком неопределенные.

В 1973 году, когда был организован прямой доступ к индивидуальным данным часов, ВИН внедрило алгоритм Алгос. Были приняты предосторожности, чтобы с помощью должным образом настроенного первоначального значения B исключить любые скачки частоты. TAI производилась непосредственно Алгосом, иначе говоря, она как раз равнялась EAL. Однако первичные стандарты совершенствовались благодаря большому техническому прогрессу и сразу же после начала генерации TAI было показано, что ее частота выше нормы на 10×10^{-13} .

Эта ошибка частоты была скорректирована 1 января 1977 года путем скачка частоты TAI равного в точности 10×10^{-13} , согласно резолюции, принятой МАС в 1976 году.

После этого стало возможным ввести управление поведением частоты, как это уже предлагалось в 1974 году консультативным комитетом по определению секунды (CCDS). Предложение было отложено потому, что частотная ошибка, которую было необходимо компенсировать, была слишком велика. Поэтому сначала функция $P(\theta)$ была последовательностью линейных функций со скачками частоты 2×10^{-14} , происходящими когда это было необходимо на интервалах более двух месяцев. Величина нарушения непрерывности была уменьшена в 1996 году до нескольких единиц, умноженных на 10^{-15} , а скачки могли быть выполнены на месячных интервалах. Рис. 7.4. показывает двухмесячные средние значения длительности единицы шкалы TAI в секундах на вращающемся геоиде. Отстройка около 2×10^{-14} перед 1996 годом произошла из-за отсутствия поправок на излучение черного тела (см. раздел 6.4.1e). Решение, внести эту поправку ко всем первичным стандартам частоты, было принято в мае 1996 года. Отстройка частоты постепенно уменьшалась путем управления частотой.

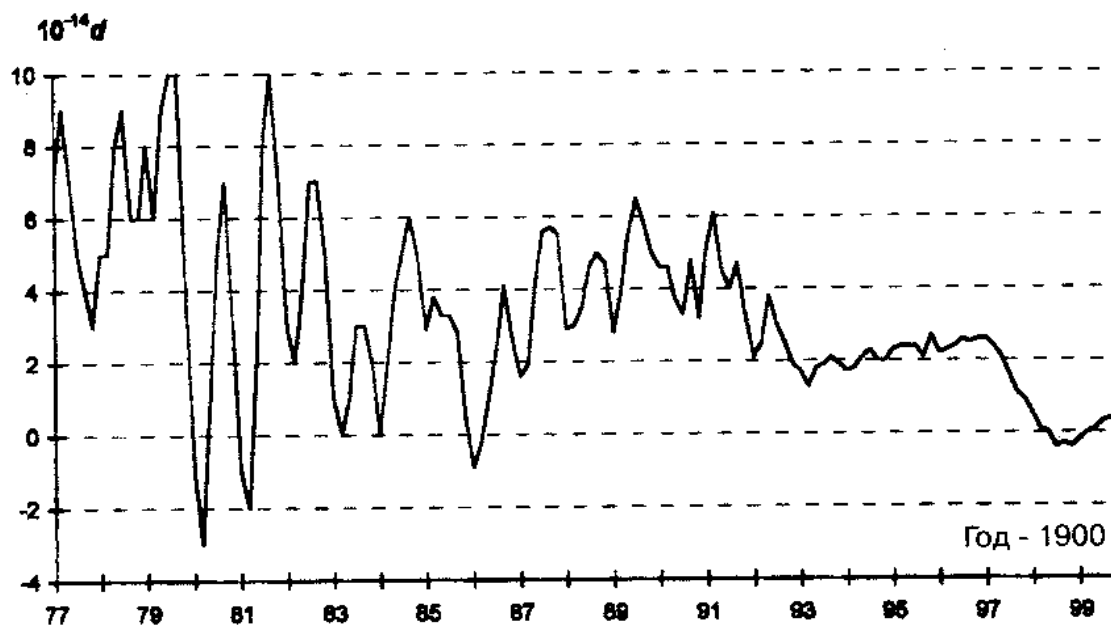


Рис. 7.4. Длительность $(1+d)$ секунд единицы шкалы TAI на вращающемся геоиде (двух-месячные значения)

В то время как Алгос оптимизирует стабильность за один или два месяца, управление поведением частоты гарантирует стабильность на много больших периодах. Оно может рассматриваться как способ нового взвешивания. Если возрастет период выборки для всех часов, дающих вклад в EAL, то каждые часы влияют на TAI все меньше и меньше, в то время как первичные стандарты становятся все более и более значимыми. Для стабильности на периодах более 5 лет все взвешивания выполняются первичными стандартами.

Форма результатов. После применения слежения за частотой TAI становится известной из значений $TAI - UTC(k)$ за стандартные даты. Фактически BIPM каждый месяц публикует значения $UTC - UTC(k)$ в циркуляре T, доступном с помощью электронной почты. В качестве примера представлен рис. 7.5. Кроме того, путем слежения за GPS и GLONASS спутниками для сличения времени, значения $UTC - GPS$ *Времени* и $UTC - GLONASS$ *Времени* обеспечиваются с неопределенностью, близкой к неопределенности $UTC - UTC(k)$. Центры времени k и GPS и GLONASS спутники образуют сеть точек первичного доступа к TAI и UTC.

Важно отметить, что TAI и UTC становятся определяемыми после публикации. Иногда допускаются небольшие поправки (достигающие нескольких наносекунд), но никогда не допускается общий пересмотр. Сейчас даже эти небольшие поправки стараются исключить. Отсюда следует, что если ошибки из какого бы то ни было источника не были обнаружены, то они навсегда включаются в TAI. Выявление и исключение этих ошибок является ключевой задачей Алгоса и программ пред-

варительной обработки, на которую выделяется только несколько секунд.

1 – Всемирное координированное время UTC. Вычисленные значения UTC – UTC(k). (с 1 января 1999 в 0 часов UTC, TAI – UTC = 32 с)

Дата 2000 0 часов UTC MJD	сентябрь 27 51814	октябрь 2 51819	октябрь 7 51824	октябрь 12 51829
Лаборатория k	UTC-UTC(k) (единица равна одной наносекунде)			
AOS (Borowiec)	-2757	-2793	-2736	-2659
APL (Laurel)	6676	6716	6740	6771
AUS (Sydney)	284	271	249	253
BEV (Wien)	-383	-372	-371	-371
BIRM (Beijing)	222	213	200	194
CAO (Cagliari)	-3306	-3284	-3292	-3290
CH (Bern)	-95	-115	-139	-142
CNM (Queretaro)	-157	-161	-163	-171
CRL (Tokyo)	-44	-50	-53	-50
CSAO (Lintong)	-23	-26	-8	2
CSIR (Pretoria)	-526	-591	-646	-704
DLR (Oberpfaffenhofen)	-13618	-13790	-13974	-14149
DTAG (Darmstadt)	-695	-701	-681	-681
GUM (Warszawa)	-759	-767	-770	-765
IEN (Torino)	59	55	58	55
IFAG (Wetzell)	-3186	-3213	-3236	-3247
IGMA (Buenos Aires)	119	112	108	104
INPL (Jerusalem) (1)	-81	-88	-97	-105
IPQ (Monte de Caparica)	4734	4787	4842	4891
JATC (Lintong)	-4130	-4171	-4211	-4257
KRIS (Taejon)	13	13	2	26
LDS (Leeds)	-	-	-	-
MSL (Lower Hutt)	10612	10694	10839	10949
NAO (Mizusawa)	-2316	-2292	-2269	-2229
NIM (Beijing)	-2709	-2717	-2722	-2721
NIST (Boulder)	-7	-8	-8	-13
NPL (Teddington)	1	2	4	3
NPLI (New-Delhi)	7953	7981	-	-
NRC (Ottawa)	17	20	24	25
NRLM (Tsukuba)	3514	3546	3563	3597
OMH (Budapest)	4993	5044	5054	5051
ONBA (Buenos Aires)	17	-47	-52	-55
ONRJ (Rio de Janeiro)	2904	2912	2922	2934
OP (Paris)	-39	-35	-39	-38
ORB (Bruxelles)	31	37	41	36
PSB (Singapore)	1999	2023	2028	2062
PTB (Braunschweig)	11	10	18	20
ROA (San Fernando)	-35	-38	-41	-43
SCL (Hong Kong)	-11	-3	-13	-3
SMU (Bratislava)	-3655	-3665	-3679	-3690
SO (Shanghai)	-	-	-	-
SP (Boras)	-442	-423	-412	-395
SU (Moskva)	84	88	89	90
TL (Chung-Li)	-4	-47	-57	-68
TP (Praha)	98	107	114	118
UME (Gebze-Kocaeli)	-600	-712	-203	-243
USNO (Washington DC) (MC)	-3	-3	-2	-5
VSL (Delft)	8	14	11	11

Рис. 7.5. Первая страница циркуляра Т Международного бюро мер и весов (BIPM).

7.3. Свойства TAI и UTC

7.3.1. Надежность

Надежность гарантируется международной основой TAI. Представим на момент, что бы случилось, если бы кто-то нашел способ (практически это только шутка) остановить все атомные часы хотя бы на короткое время. Это бы вызвало такой огромный беспорядок в мировых делах, что всем было бы не до TAI. Более того, если бы его пришлось устанавливать опять, то фаза TAI могла бы быть восстановлена в пределах нескольких десятых микросекунды из наблюдений быстро вращающихся пульсаров (см. главу 8).

7.3.2. Точность показаний

Неопределенность показаний TAI, использующих значения $UTC - UTC(k)$, является одной из неопределенностей первичных доступов лабораторий k и приблизительно равна неопределенности, вводимой этой лабораторией в сличения времени, используемые для формирования TAI. Она представляет наименьшую возможную неопределенность, если датировать события по TAI в рассматриваемой лаборатории. В лабораториях, оборудованных лучшими приборами, эта неопределенность оценивалась (в 2000 году) в десятках наносекунд с учетом неопределенностей задержек в приборах.

Доступ, разрешенный к TAI путем приема сигналов GPS и использования значений $UTC - GPS$ Времени, приводит к неопределенностям того же порядка в лабораториях, обладающих наилучшим оборудованием, и при усреднении большого массива данных сличений, по крайней мере за одни сутки. То же самое можно сказать и про GLONASS.

7.3.3. Стабильность частоты

Значения ординат на рис. 7.4 представляют после изменения знака разность нормализованных частот между TAI и группой первичных стандартов (на геоиде). Можно видеть годовые флуктуации. Их общая амплитуда была близка к 10^{-13} на период с 1977 по 1982 годы, а потом постепенно снизилась до 10^{-14} в 1993-1995 годах, прежде чем как-бы исчезнуть совсем. Из-за чего это происходит, из-за TAI или из-за первичных стандартов? Если амплитуда большая, то кажется, что флуктуации происходят, главным образом, из-за влияния окружающих условий на промышленные цезиевые часы с доминирующим фактором – влажностью. Это слабое место было постепенно исключено или улучшением часов или их лучшей защитой. Крошечное значение флуктуаций остававшихся в 1995 году могло все еще быть вызванным влиянием окружающей

среды во время выполнения сличений. Уже упоминалась температурная чувствительность некоторых GPS приемников. Здесь может так же сказываться неадекватное моделирование рефракции, в частности, тропосферной рефракции, которая никогда не измеряется. Похоже на то, что первичные стандарты исключаются из обнаруживаемых годовых вариаций.

Стабильность TAI может быть оценена из сличений с другими атомными шкалами, поддерживаемыми рядом метрологических центров времени. Нестабильности на рис. 7.6 была вычислена для времени выборки τ в диапазоне от 10 до 160 суток. Фактически это нестабильность EAL в 1999-2000 годах [7.6], но для этих значений τ она незначительно отличается от нестабильности TAI. Для больших времен τ нестабильность оценивается в предположении, что текущие свойства часов и первичных стандартов остаются теми же самыми бесконечно долго. Она выходит на уровень около 5×10^{-15} в результате управления поведением частоты. Точность частоты налагает верхний предел на сверхдолговременную стабильность.

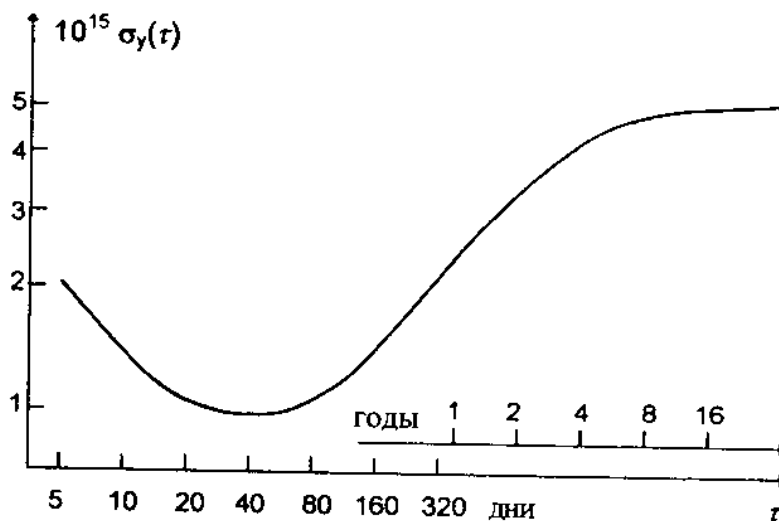


Рис. 7.6. Нестабильность частоты TAI. (см. текст для объяснения).

7.3.4. Точность частоты

Пусть d_{TAI} будет относительным отклонением единицы шкалы TAI от единицы шкалы ТТ (секунды СИ на вращающемся геоиде), т.е. относительная девиация частоты TAI с противоположным знаком ($d_{\text{TAI}} = -y_{\text{TAI}}$). Среднемесячное значение d_{TAI} обычно меньше $\pm 10^{-14}$. Его величину ВРМ рассчитывает ретроспективно вместе с его стандартной неопределенностью u . Последняя должна оцениваться с величайшей осторожностью, принимая во внимание неопределенности в первичных стандартах частоты и в их линиях связи с TAI. В конце 2000 года значение u лежало в диапазоне $(2-3) \times 10^{-15}$. Например, на интервале от 28 августа до 27 сентября 2000 года, $d_{\text{TAI}} = 7,3 \times 10^{-15}$ и $u = 2,2 \times 10^{-15}$.

7.4. Мировая организация измерений времени

Всемирная организация измерения времени постепенно совершенствовалась по мере прогресса в атомных часах, стандартах и шкалах времени. Однажды эта организация достигла определенной зрелости, и это было признано и установлено соответствующими международными организациями. Глава 4 дает обзор эволюционных фаз. В этой главе мы опишем настоящее положение организаций, которые должны бы появиться чтобы представлять будущее, по крайней мере, на следующие несколько лет или даже на десятилетие и более.

7.4.1. Всемирное координированное время

Как объяснялось в разделе 4.5, всемирное координированное время UTC в его настоящей форме есть ни что иное, как международное атомное время, скорректированное на целое число секунд для того, чтобы приблизительно соответствовать всемирному времени UT1, связанному с вращением Земли.

С 1 января 1972 года UTC реализовывалось согласно инструкциям в рекомендациях ITU-R TF 460-4 Международного союза электросвязи (ITU). Эти рекомендации имеют корни в рекомендации 460, принятой в 1970 году международным консультативным комитетом радио (CCIR), комитетом в ITU, который после этого исчез. Давайте теперь обрисуем ряд директив и объясним, как они внедрены в практику.

(a) Скачущие секунды

Скачек на целую секунду, ITU определяет как «введение одной положительной или отрицательной скачущей секунды», которая должна быть введена в конце UTC месяца, предпочтительнее в конце декабря или в конце июня, в ином случае в конце марта или в конце сентября. Оговорено, что положительная скачущая секунда должна начинаться в 23 часа 59 минут 60 секунд и оканчиваться в 0 часов 0 минут следующего дня. В таком случае нет неоднозначности, если события датируются таким образом. Однако двузначность появляется в других системах, например, когда используются доли дня. Если была введена положительная скачущая секунда, то дата N 000 005 79 может означать или сутки $(N - 1)$ в 23 часа 59 минут 60,5 секунд или сутки N в 0 часов, 0 минут 0,5 секунд. Эта неоднозначность не возникает в случае отрицательной скачущей секунды. Однако вероятность того, что появится необходимость в отрицательной скачущей секунде, практически равна нулю.

Даты для скачущей секунды устанавливаются международной службой вращения Земли IERS и объявляются, по крайней мере, за 8 недель до ее введения.

Система UTC работает хорошо. На 1 января 1972 года $TAI - UTC$ была равна 10 с. Положительные скачущие секунды всегда вводились в конце декабря или в конце июня со скоростью от 1 секунды в год и до 1 секунды за 2,5 года. С 1 января 1999 года и до даты, которая еще не определена, $TAI - UTC = 32$ с. Соотношение между TAI и UTC можно найти в ежегодном отчете IERS и секции времени BIPM.

(b) Сигналы времени. Коды для всемирного времени UT1

Излучения сигналов времени соответствуют как можно ближе к UTC. Рекомендации ITU устанавливают допуск в 1 мс. На практике расхождение много меньше чем 1 мс. Рекомендуется так же, чтобы несущая частота была настроена по частоте TAI с относительной отстройкой частоты меньше 10^{-10} и чтобы соотношения между сигналами времени и фазой несущей были известны (т.е. если несущая частота 10 МГц, то следующий импульс должен появляться через каждые 10^7 периодов).

Рекомендуется, чтобы сигналы времени несли звуковую кодовую информацию о разности $UTI - UTC$. Эта информация обозначается величиной $DUTI$ и представляется в форме целых кратных от 0,1 с, значение которых появляется путем маркирования определенного числа секундных импульсов либо их уширением, либо расщеплением, либо другим методом. На рис. 7.7 показано, как работает код. Значения $DUTI$ и даты их применения обеспечиваются IERS за месяц вперед до их применения и они одинаковы для всех излучений.

Некоторые сигналы времени несут также закодированную информацию $dUTI$, дающую значения $UTI - UTC$ до ближайшей 0,02 с, но это неофициально. Даже кодированная информация $DUTI$ используется очень редко и некоторые радиостанции ее больше не передают.



Рис. 7.7. Код для $DUTI = UT1 - UTC$, передаваемый вместе с сигналами времени. Секундный импульс подчеркивается уширением, расщеплением или другим способом. Для отрицательных значений $DUTI$ соответствующее число импульсов отмечается от 9-й секунды.

Ежегодный отчет секции времени ВІРМ предоставляет также список международных сигналов времени и их основные характеристики.

(с) Применение UTC

Всемирное координированное время используется как практическая опора по всему миру, его использование, как и применение акронима UTC, одинакового на всех языках, рекомендовано международными организациями, включая с 1971 года генеральную конференцию по мерам и весам (CGPM) и ITU.

В разных странах по всему миру местное время соединено с UTC через целые числа часов. Иногда эта связь устанавливается законом, как во Франции (декрет от 9 августа 1978 года). Официальные организации иногда предпочитают использовать национальное приближение к UTC, как это имеет место в Германии. Существуют страны, в которых UTC официально не признано, хотя оно используется фактически, так как отсутствуют другие доступные шкалы времени.

Давайте только напомним, что все еще широко распространенное использование акронима GMT некорректно, если мы намерены ссылаться на UTC, а также и в случае выражения времени для всеобщего применения. Эта практика часто критиковалась особенно международным астрономическим союзом IAU. Строго говоря GMT должно быть заменено на UTC. Однако для повседневного применения, где неточности достигают более 1 секунды и не имеют реального значения, UT может быть приемлемым названием.

7.4.2. Локальное представление UTC и независимые локальные атомные времена

Как упоминалось в разделе 7.2.2 приближение $UTC(k)$ к UTC поддерживается в центре времени k . Это обычно реализуется атомными часами, оборудованными приборами, которые добавляют линейные поправки, осуществляемые подстройкой только двух параметров. В других случаях эти физические приборы заменяются вычислениями, допускающими в принципе более сложные корректировки, например с учетом квадратичных членов. В обоих случаях все усилия обычно направляются на то, чтобы удержать $UTC(k)$ как можно ближе к UTC. В 1993 году консультативный комитет по определению секунды рекомендовал, чтобы лаборатории, хранящие время, представляли информацию, необходимую для облегчения синхронизации с UTC в реальном времени по возможности в

пределах 100 нс. Один из способов как этого достичь – это обеспечить $|UTC - UTC(k)| < 100$ нс.

Ежемесячный цикл ВРМ для выработки и распространения $UTC - UTC(k)$ требует от лабораторий одно или двухмесячной экстраполяции для того, чтобы подстроить $UTC(k)$ к UTC . Чтобы этого добиться лаборатория k может основывать свои вычисления на экстраполяции тех своих часов, которые имеют лучшую стабильность при времени выборки около одного месяца. Однако если лаборатория имеет несколько атомных часов, то лучше сконструировать на локальном уровне шкалу времени, известную как *независимое локальное атомное время*. Такая шкала времени, обозначенная как $TA(k)$, может быть установлена более быстро, чем TAI/UTC , потому что локальные сличения времени чрезвычайно точны. Это обеспечивает более серьезные основания для экстраполяции $UTC(k)$.

В 2000 году около пятнадцати лабораторий производили $TA(k)$ различными методами. Рассмотрим различные примеры. Так в военно-морской обсерватории США шкала $TA(USNO)$ основана на десятках промышленных часов и на водородных мазерах. В Германии $TA(PTB)$ непосредственно производится одним из первичных стандартов РТВ. Во Франции $TA(F)$ вычисляется в лаборатории первичного времени и частоты в парижской обсерватории, используя данные около двадцати промышленных часов, распространенных по стране. ВРМ публикует значения $TAI - TA(k)$ так же, как и значения $UTC - UTC(k)$ в своем циркуляре Т.

$TA(k)$ не независимо от TAI (или UTC), так как одни и те же часы участвуют в обоих предприятиях. Но они независимы одни от других и это делает возможным вывести их нестабильность из взаимной нестабильности каждой пары шкал времени (используя так называемый *метод треуголки*, упомянутый в разделе 5.2.8 или в действительности *метод n-уголки*).

В 1995 году только две лаборатории в Соединенных Штатах Америки поддерживали свои $UTC(k)$ в пределах 100 нс с UTC , а именно национальный институт стандартов и технологии (NIST) и уже упоминавшаяся ранее USNO. В 1996 году в список были добавлены национальная физическая лаборатория (NPL) в Великобритании и парижская обсерватория (OP). На 27 сентября 2000 года из 46 $UTC - UTC(k)$ 20 лабораторий были опубликованы ВРМ с абсолютными значениями $UTC - UTC(k)$ меньше, чем 100 нс. В таблице 7.1 с января по сентябрь 2000 года показано качество синхронизации для четырех цитированных выше лабораторий, и для GPS.

Таблица 7.1. Синхронизация между UTC и $UTC(k)$ для четырех лабораторий времени и для GPS за период с января по сентябрь 2000 года

Лаборатория или система	Предельные значе- ния $UTC - UTC(k)$ (нс)	Среднее значения $UTC - UTC(k)$ (нс)	Среднее значения $UTC - UTC(k)$ (нс)
GPS	-39	-7	13
NIST	28	15	17
NPL	80	20	29
OP	-49	-31	31
USNO	-20	2	9

7.4.3. Другие формы атомного времени

TAI является международной опорой по соглашению. Однако ничто не мешает другим шкалам времени быть установленными так, чтобы использовать данные со всего мира, если в этом есть преимущества для каких-либо специальных проектов. Можно подумать что могли бы быть реализованы более стабильные и более точные шкалы времени, чем TAI, если бы были возможны более длительные публикации и устанавливались бы по соглашению поправки на основе самой последней полученной информации. Например эффект излучения черного тела на частоту первичных стандартов был принят в расчете в однородной форме для TAI только в сентябре 1995 года, и не было сделано никаких ретроспективных поправок для улучшения прошлых значений TAI.

В главе 8 мы увидим, что некоторые недостатки TAI очень критичны при изучении пульсаров, в котором используется измерение времен миллисекундных пульсаров. В осознании необходимости в улучшенной шкале времени для такого изучения BIPM установило датированную шкалу времени, называемую TT(BIPMxx), где xx представляет две последних цифры года, в котором она была произведена. Хотя эта шкала основана на EAL, данные от первичных стандартов используются в ней не таким же способом как для TAI. Ежегодные флуктуации, упомянутые раньше, исключаются [7.7]. Последовательные версии TT(BIPMxx) не являются прямым продолжением, так как они могут отличаться по всей длине шкалы времени от их начальных дат на 1 января 1977 года, которое одно и то же для всех шкал. TT(BIPMxx) представляется в форме разности с TAI на стандартные даты (каждые десять суток, каждые пять суток) по обращению к BIPM. Равное нулю на 1 января 1977 года расхождение между TT(BIPM96) и TAI + 32,184 секунд, может достигать 25 мкс.

7.5. Распространение времени и частоты

7.5.1. Частота

(a) Излучение эталонных частот

Несущие частоты излучений специализированных сигналов времени и стандартных частот основываются на частоте TAI со много большей точностью, чем это было предложено в рекомендациях ITU. Наибольшие объявленные неопределенности около 10^{-11} , хотя в некоторых случаях они снижаются до 10^{-12} . BIPM предоставляет список этих излучений в ежегодном отчете секции времени.

Некоторые другие радиосигналы, используемые для различных целей, имеют очень точные значения частот. Лоран-С излучает на частоте 100 кГц в пределах $\pm 10^{-12}$. Некоторые передающие станции также излучают очень точные частоты, среди них Allouis во Франции на частоте 162 кГц с неопределенностью в пределах $\pm 2 \times 10^{-12}$.

Эти сигналы удовлетворяют большинству требований к опорным частотам. Они легко доступны с использованием самых обычных приемников.

(b) Доступ к первичным стандартам частоты

Для фундаментальной метрологии, предмета этой книги, часто полезно иметь доступ к частоте удаленного первичного стандарта частоты E. Когда необходима максимально возможная точность, используются сличения времени, как это объясняется в разделе 5.6.4a. Если A – локальный генератор, $y_E - y_A$ получается через (5.67) и (5.68).

Если время не торопит, $y_E - y_A$ может быть получено без какого бы то ни было запроса у первичной лаборатории, находящейся в E, просто путем консультаций с публикациями BIPM. Они дают местный доступ к TAI (т.е. через прием сигналов GPS). Они так же обеспечивают через обозначение d относительную разность между длительностью единицы шкалы TAI и собственной секундой, реализуемой стандартом E на геоиде. Мы используем здесь обозначения d_{TAI} для этой величины, которая является средней на интервале (TAI_1, TAI_2) . Следовательно

$$[\langle y_E \rangle - \langle y_{TAI} \rangle] |_{\text{geoid}} = d_{TAI,E}, \quad (7.20)$$

где $\langle \rangle$ представляет усреднение за соответствующий интервал. Для часов пользователя A с собственным временем τ_A мы измеряем

$$N_A = \frac{[\tau_A - TAI](TAI_2) - [\tau_A - TAI](TAI_1)}{TAI_2 - TAI_1}, \quad (7.21)$$

затем из (5.73)

$$\langle y_A \rangle - \langle y_{TAI} \rangle = N_A + \langle h(TAI) \rangle. \quad (7.22)$$

Функция h дается выражением (3.30) или (3.32) и ее среднее значение берется вдоль мировой линии A между TAI_1 и TAI_2 . Следовательно

$$\langle y_A - y_E \rangle = N_A - d_{TAI,E} + \langle h(TAI) \rangle. \quad (7.23)$$

Для фиксированных часов на Земле мы находим

$$\langle y_A - y_E \rangle = N_A - d_{TAI,E} - 1,091 \times 10^{-13} h_A / km, \quad (7.24)$$

где h_A – высота пользователя над геоидом в километрах.

Либо путем прямых сличений времени, либо через публикации BIPM неопределенности, вносимые в оценку первичных стандартов частоты, могут быть понижены меньше чем до 10^{-14} . Однако такие неопределенности слишком велики для новейших стандартов, в которых неопределенность частоты достигает 10^{-15} . Проблема увеличения удаленного доступа к частотам этих стандартов все еще не решена, за исключением лабораторий, оборудованных системами дуплексной спутниковой передачи времени и частоты TWSTFT (см. раздел 5.6.3(3)).

7.5.2. Время

GPS Время связано с TAI через

$$[TAI - GPS Time] = 19c + C_0, \quad (7.25)$$

где расхождение в синхронизации C_0 обычно поддерживается в пределах ± 100 нс. С марта 1995 года до настоящего времени (май 2002 года) оно оставалось внутри этих границ и систематически уменьшалось. В настоящее время оно часто лежит в пределах меньше 10 нс. Значения C_0 публикуются на каждые сутки в 0 часов UTC в циркуляре BIPM T. Неопределенность составляет несколько наносекунд. Следовательно, доступ к TAI и UTC, хотя и отличается одним или двумя месяцами в реальном времени, возможен везде в пределах ± 10 нс при использовании промышленных приемников времени. Для того чтобы достичь такой точности дневное усреднение должно быть выполнено на большом количестве наблюдений спутников. В дополнение координаты антенны должны быть известны в пределах одного – двух метров в системах WGS84 или ITRF. GPS приемники времени могут дать эти координаты, но с недостаточной точностью.

Другой очень точный способ доступа к UTC или TAI, опять отсроченный одним или двумя месяцами, заключается в том, чтобы установить связь с лабораторией k , часы которой принимают участие в формировании TAI и для которой публикуется $UTC - UTC(k)$. Неопределенности

могут быть несколько ниже 10 нс. Этот метод порождает проблему линий передачи времени на короткие расстояния. Может использоваться GPS (некоторые ошибки уменьшаются с расстоянием), в других случаях дальнейшие возможности представляются кабельной связью или прямым телевидением.

В настоящее время (2002 год) доступ через GLONASS имеет незначительно уступающее качество по сравнению с доступом через GPS из-за меньшего количества спутников. Положив

$$[UTC - GLONASS Time] = C_1, \quad (7.26)$$

где значения C_1 лежат в пределах нескольких сотен наносекунд. Они публикуются BIPM на каждые сутки с неопределенностью около 10 нс.

В реальном времени мы можем использовать либо значения UTC, передаваемые GPS (± 100 нс), либо связь с лабораторией, где $UTC - UTC(k)$ могут быть экстраполированы с возможностью достижения неопределенности, достигающей величины около ± 100 нс.

Если не требуется большая точность, то существует множество доступов к шкале UTC или к официальному времени, такому, как говорящие часы или радиопередачи типа шести точек. Некоторые кодированные излучения могут быть использованы для показа времени. Конечно не определено, что радиосигналы времени, направленные главным образом для навигаторов, будут способны устоять против возможностей, предлагаемых другими развивающимися средствами распространения времени и определения положения, а именно GPS, GLONASS или их гражданскими партнерами.

7.6. Итоги и перспективы

Текущая мировая организация хранения атомного времени была установлена в начале 1970 годов. Со временем выбор определился тремя главными подходами.

- Существует много цезиевых атомных часов, выполненных промышленным способом и обладающих отличной долговременной стабильностью, но не имеющих точности и кратковременной стабильности. Систематические сдвиги разности частот преследуют их на протяжении всей их жизни.
- Первичные стандарты частоты работают только на случайной основе и остаются сомнения относительно их заявленной точности.
- Чтобы уменьшить неопределенность сличений частоты через сличения времени необходимо производить усреднения на одном-двух месяцах.

В начале 1980 годов был поднят вопрос об организации способов измерения атомного времени. Первичный стандарт NRC Cs V в Канадском национальном исследовательском совете работал непрерывно (как *первичные часы*) с 1976 года. В 1978 году к нему присоединились немецкие первичные часы PTB Cs1 и затем в 1980 году еще трое других первичных часов NRC, а именно NRC Cs VI A, B и C. Между этими стандартами было хорошее совпадение частоты, а непревзойденная точность PTB Cs1 ($\pm 3 \times 10^{-14}$) была подтверждена в 1986 году часами PTB Cs2, которые оказались даже более точными ($\pm 1,5 \times 10^{-14}$). Эти разработки сделали резонной постановку вопроса, должна ли TAI основываться непосредственно на таких часах и только на таких часах. Вычисления TAI из показаний часов многих лабораторий тем не менее продолжались, так как это гарантировало надежность результатов. Однако были другие причины, а именно желание, чтобы TAI оставалось коллективным предприятием, включающим значительное число лабораторий и больших и маленьких. Число стран, присоединившихся к этому клубу, к 2000 году выросло до тридцати. Этот дух сотрудничества в области измерения времени ни разу не провалился. Именно через это сотрудничество стала возможной тесная синхронизация с UTC, включая синхронизацию GPS, которая не нужна системе для работы, но которая служит просто нуждам мирового сообщества. Этот же дух сделал возможным установление сети сличений времени, которая сформировала фундамент для всего сооружения.

Текущие исследования вероятно приведут даже к более точным и стабильным первичным стандартам с неопределенностями, уменьшенными по крайней мере в 10 раз. Но с 1994 года большинство национальных лабораторий времени сами были оборудованы новыми промышленными цезиевыми часами, у которых долговременная нестабильность также была уменьшена примерно в 10 раз по сравнению с предыдущими часами. Таким образом, эти приборы также прогрессируют с той же скоростью. Точность сличений через GPS сделала возможным уменьшение времени выборки, по которому вычисляется TAI, с двух месяцев до одного.

Несмотря на эти измерения и на давление прогресса первоначальная организация TAI 1970 года продолжает работать. Она часто переоценивается консультативным комитетом по времени и частоте, но до сих пор заключения комитета всегда оставляли все как есть.



В заключение давайте напомним, что время в TAI и UTC доступно везде в пределах сотни наносекунд в реальном времени и в пределах около 10 наносекунд за один или два месяца. Взятая как сущность секунда, т.е. длительность одной (единственной) секунды, может быть реализована с относительной ошибкой около $\pm 5 \times 10^{-14}$ через стандарты на холодных атомах цезия благодаря их кратковременной нестабильности. В то же время эти стандарты могут выразить через секунды длительность нескольких часов в пределах 10^{-15} (относительное значение). Через доступ к TAI секунда может быть получена везде в пределах нескольких единиц от $\pm 10^{-15}$ на усреднении в несколько суток.