

ПОСТРОЕНИЕ ШКАЛЫ АТОМНОГО ВРЕМЕНИ

С. Ю. Мовенко^a

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

Аннотация

В данной работе рассмотрена актуальная задача повышения точности шкалы атомного времени и алгоритм создания атомной шкалы времени. На основе алгоритмов создания шкалы атомного времени реализована программа, которая, используя результаты измерений эталонов, строит шкалу атомного времени. Затем атомное время корректируется на 1 секунду и в результате получаем UTC (всемирное координированное время).

Ключові слова: метрология, эталон времени, атомное время, шкала атомного времени

Введение

Мы живем в четырехмерном пространстве. Издавна появилась необходимость измерять длину и время с целью ориентации в пространстве. Измерить – это значит сравнить с величиной того же рода – единицей измерения. Эта единица должна быть четко определена и быть неизменной – эталоном. Созданием эталонов занимается наука, именуемая метрологией. Эталон времени – секунда, эталон длины – метр. Но как их определить? Секунда – это промежуток времени, в течении которого ... что?

Эталоны для измерения времени должны быть основаны на периодических процессах. Причем их период должен быть постоянен с достаточно большой точностью. Первоначально процессом такого рода было вращение Земли вокруг своей оси, и единица времени – секунда, определялась как $1/86400$ часть периода этого вращения, то есть суток. Длительность же суток определялась, основываясь на движении какого-нибудь небесного светила. Так как солнечные сутки не постоянны в течение года, то в повседневной жизни за основную единицу времени принимают средние солнечные сутки, рассчитанные в предположении равномерного движения Земли по орбите (рис. 1). Время в таких сутках называют средним временем. Понятно, что его значение меняется с изменением географической долготы места, то есть возникает понятие местного времени. Местное среднее время на Гринвичском меридиане называют всемирным временем и обозначают UT (Universal Time). Это всемирное время положено в основу создания нескольких астрономических шкал времени. Всемирное время UT имеет множество модификаций, таких как: UT0, UT1, UT2, UT1R, в которых учитываются различные поправки, такие как сезонные вариации угловой скорости вращения Земли и учёт действия приливных явлений. Любое время измеряют при помощи часов. Вскоре после того, как появились маятниковые часы, с помощью них удалось обнаружить систематическое замедление суточного

вращения Земли, вызванное океаническими приливами. После изобретения кварцевых часов, в которых роль колебаний маятника играют упругие колебания кварцевых пластинок под действием электрического напряжения (пьезоэффект), было установлено, что при учёте регулярного замедления длительность суток всё же непостоянна – она может изменяться в обе стороны на тысячные и даже сотые доли секунды.

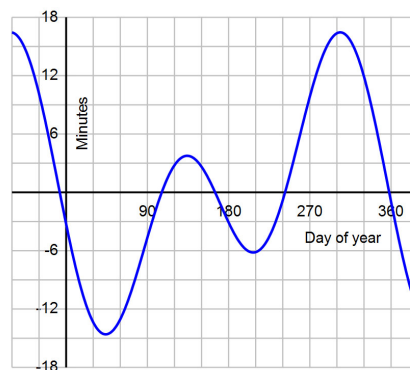


Рис. 1. Нестабильность астрономического времени

1. Атомное время

К середине XX века стало ясно, что точность лучших часов превзошла точность нашего природного эталона времени – суток. Возможности астрономических методов измерения времени оказались исчерпанными.

Принципиально новые и более точные методы измерения времени пришли из радиоспектроскопии и квантовой электроники.

Каждый атом или молекула избирательно поглощает или излучает не только свет, но и радиоволны определённой длины волны или частоты, которые характеризуются непревзойдённым постоянством. Это позволило создать квантовые стандарты частоты, а следовательно, и времени (вспомним, что частота – величина, обратная периоду, то есть времени одного колебания) и построить шкалу атомного времени ТА,

^ag1lmer2712@gmail.com

Таблица 1. Типы генераторов

Тип генератора	Нестабильность частоты	Соответствующий уход часов
Рубидиевый	$5 \cdot 10^{-12}$	0,15 с за 1000 лет
Цезиевый	$3 \cdot 10^{-13}$	0,01 с за 1000 лет
Водородный	$1 \cdot 10^{-14}$	0,2 с за миллион лет

задаваемую конкретным атомным или молекулярным эталоном.

Шкала ТА практически совершенно равномерна. В ней единицей измерения служит атомная секунда – промежуток времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 (^{133}Cs).

Эталоны атомного времени создаются на основе различных генераторов (рис. 1). Эти эталоны будут отличаться по уровню точности.

Так как шкалы ТА и УТ не согласуются между собой, введена промежуточная шкала, называемая всемирным координированным временем UTC (Universal Time Coordinated). Это атомное время, которое корректируется на 1 с, когда его расхождение с УТ1 превышает 0,5 с.

2. Алгоритм создания атомной временной шкалы

2.1. База алгоритма

Если есть некоторое множество N атомных часов, то шкала атомного времени $\text{TA}(t)$ может быть определена как:

$$\text{TA}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(t), \quad (1)$$

где h_i – это показание часов i в момент времени t .

2.2. Метод динамического взвешивания

Важно заметить, что каждые часы, входящие в уравнение (1), имеют некоторый вес. Если все часы имеют различный вес, то уравнение перейдет в:

$$\text{TA}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i h_i(t),$$

где w_i – это вес часов i .

Условие нормализации веса [1]:

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1.$$

Можно определить w_i как постоянную во времени. Однако лучше будет, если вес определить методом динамического взвешивания, где увеличение или уменьшение веса рассматриваемых часов определяется в соответствии со стабильностью частоты. Вес рассматриваемых часов определяется как обратно-пропорциональный отклонению Аллана [2].

В этом случае шкала атомного времени определяется в соответствии с методом динамического взвешивания [3] как:

$$\text{TA}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i h_i}{\sum_{i=1}^N w_i}. \quad (2)$$

2.3. Отклонение Аллана

Отклонение Аллана является измерением стабильности показаний часов и генераторов. Его квадрат есть дисперсия Аллана, которая определяется как:

$$\sigma^2 = \left\langle \frac{(y_{n+1} - y_n)^2}{2} \right\rangle,$$

где под $\langle \dots \rangle$ понимается усреднение в бесконечных пределах,

y_n – n -ное измерение, полученное усреднением выборки длительностью $t_{k+1} - t_k$:

$$y_n = \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} y(t) dt.$$

2.4. Корректировка метода динамического взвешивания

К сожалению, уравнение (2) не может быть реализовано экспериментально как написано, потому что показания часов i не наблюдаемы.

Экспериментально можно узнать только разницу во времени между парой часов. Перепишем уравнение в терминах разницы во времени:

$$\text{TA}(t) - h_k(t) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i [h_i(t) - h_k(t)]}{\sum_{i=1}^N w_i}.$$

Если мы определим $x_k(t)$ как временную разность между часами k и атомной шкалой ТА в момент времени t , и определим x_{ki} как временную разность между часами k и часами i , то получим следующее:

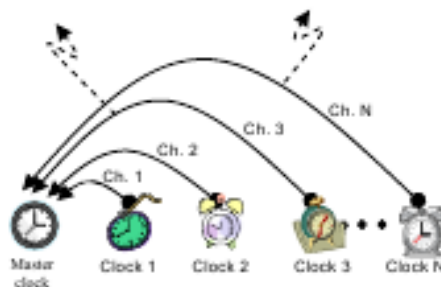
$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_{ki}(t).$$

Последнее уравнение определяет временную шкалу в терминах временной разницы между отдельными часами. После того как посчитано $x_{ki}(t)$, можно посчитать атомную временную шкалу ТА используя последнее уравнение.

3. Результаты

Временная шкала считается каждый час по описанному алгоритму динамического взвешивания [1]. Система измерения временной разницы часов также

$$x_{30}(t) = h_0(t) - h_3(t) \quad x_{N0}(t) = h_0(t) - h_N(t)$$



$$x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t) = [h_0(t) - h_i(t)] - [h_0(t) - h_j(t)]$$

Рис. 2. Принцип фазового компаратора



Рис. 3. Блок-схема алгоритма

называется фазовым компаратором. Фазовый компаратор имеет 32 входных канала, которые позволяют сравнить некоторое количество часов. Выполняется одно измерение временной разности в секунду для каждого из тридцати двух используемых каналов. Одни часы называют мастер-часы и остальные сравнивают с ними. На рис. 2 представлен принцип работы фазового компаратора.

Представленный алгоритм реализован в программе, работающей с четырьмя эталонами. На вход поступают данные, показания эталонов, и в процессе вычислений этого алгоритма на выходе программа имеет шкалу атомного времени (рис. 3).

Выводы

Хоть атомная шкала времени и самая точная, вопрос по поводу увеличения её точности актуален и по сей день. В дальнейшем будут проведены исследования по сглаживанию спонтанных скачков, которые периодически наблюдаются у эталонов. Это позволит реализовать фильтр, который позволит учитывать подобные скачки.

Перечень использованных источников

1. P. Tavella, C. Thomas. *Comparative study of Time Scale Algorithms*. Metrologia 1991, 28, pp. 57-63.
2. M. Weiss and T. Weisser. *AT2, A New Time Scale Algorithm: AT1 plus Frequency variance*, Metrologia 1991, 28, pp. 65-74.
3. B. Guinot. *Some properties of algorithms for atomic time scales*, Metrologia, 1987, 24, pp. 195-198.