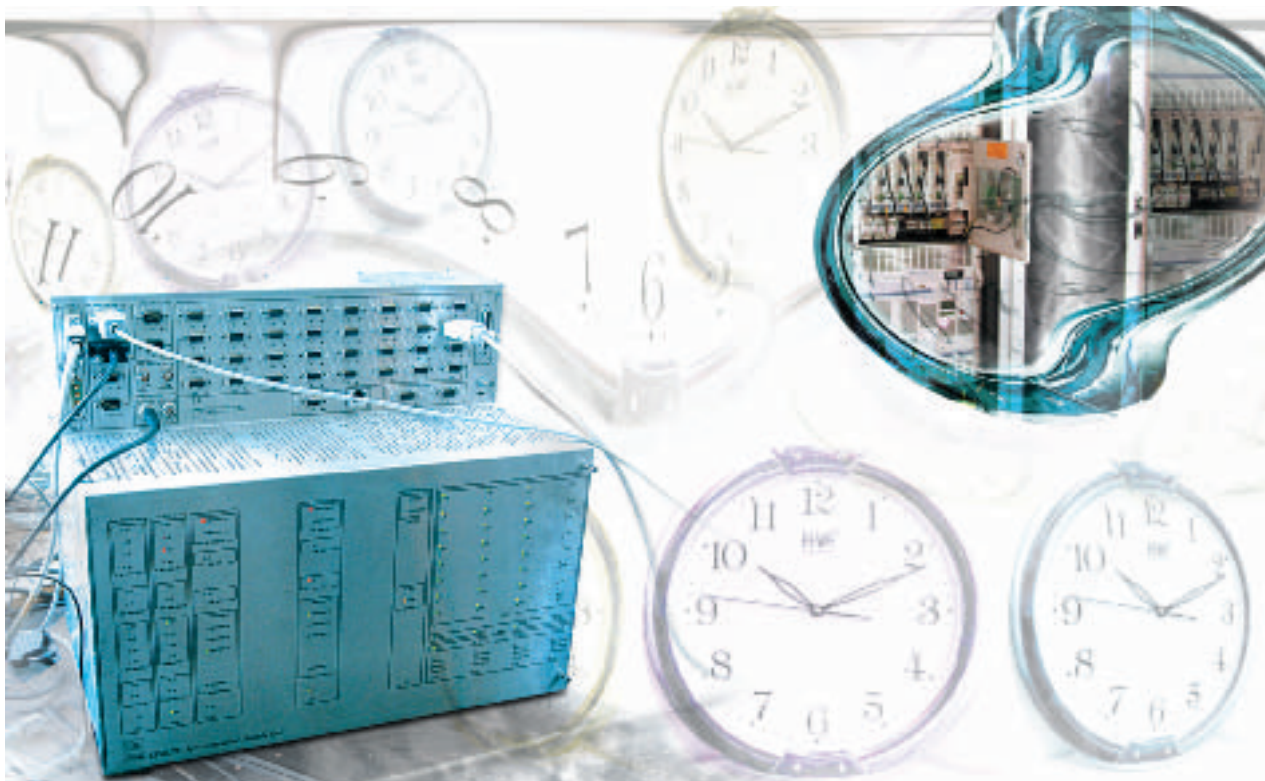


ТЕХНОЛОГИИ И БИЗНЕС

сети синхронизации



Вначале было... время

Термин «сети синхронизации» — довольно новый в лексиконе связистов. Даже подготовленным инженерам иногда совсем не просто согласовать свои представления о синхронной связи с исходными понятиями времени и частоты

Хотелось бы предварить этот материал цитатой из статьи В. Чикула «За кулисами простого»: «Пока объяснения касаются сложного, все идет нормально... Что же происходит с людьми, когда они берутся объяснять простое?.. Все объяснения сводятся к замене незнакомых понятий знакомыми, а сложных — совокупностью простых. Двигаясь по этому пути, мы непременно выйдем на простейшие понятия, которые уже не поддаются объяснению.

Но, шествуя вдоль шеренги «почему?», мы рано или поздно окажемся на том звене-понятии, которое уже принимало участие в цепочке ответов на эти «почему?». Круг замкнется. Из этого кольца нет способа выбраться» («Знание — сила», 1973).

Сеть синхронизации — сравнительно новое понятие, которое появилось в нормативной лексике в результате широкого распространения синхронной цифровой иерархии (SDH).

Четверть века назад научные исследования по синхронизации проводились по направлениям, приведенным в таблице на с. 47.

Синхронизацию несущего колебания применяют в когерентных демодуляторах с целью эффективного использования энергии сигнала. Принцип когерентной связи заключается в том, что на приеме используют априорные сведения о фазе принятого сигнала. При когерентном приеме детектор выделяет сигнал и синфазную составляющую помехи, квадратурная составляющая при этом полностью исключается. Грубо говоря, отношение сигнал/шум увеличивается в два раза по сравнению с некогерентным приемом.

Тактовая синхронизация необходима для определения границ цифровых символов, чтобы сделать отсчет принятого сигнала в наименее искаженной его части — для

повышения помехоустойчивости распознавания переданного символа из конечного алфавита. По существу, тактовая синхронизация является основой ключевой операции цифровой связи — преобразования аналогового сигнала в цифровую форму.

Цикловое (блоковое) фазирование на канальном (физическом) уровне служит для разделения цифровых каналов в системах передачи с временным уплотнением — определения границ кодовых слов при кодировании источника, помехоустойчивом кодировании и шифровании.

Во всех трех случаях система синхронизации предназначена для выделения (фильтрации) соответствующих интервалов времени: в первом случае — это период колебания несущей частоты, во втором — тактовый интервал, в третьем — цикл группового сигнала (границы кодового слова). Все эти три направления тесно связаны между собой. Во-первых, потому, что в совокупности являются краеугольным камнем синхронной цифровой связи. Во-вторых, они составляют единый технологический процесс: тактовая синхронизация начинает работать только после того, как установлен синхронизм по несущей частоте, а цикловое фазирование как чисто цифровой процесс не имеет смысла, пока с помощью тактовой синхронизации не решена «пограничная» задача преобразования аналогового сигнала в цифровой. В-третьих, основным средством решения всех трех задач синхронизации служит система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Слово «синхронизация» — едва ли не самое распространенное в лексиконе связистов, в учебных курсах институтов связи все три перечисленных направления изучаются достаточно подробно. Иное дело — понятие «сети синхронизации». Как показывает опыт, даже подготовленным инженерам иногда совсем не просто согласовать свои представления о синхронной связи с исходными понятиями времени и частоты (ITU Handbook. *Selection and use of precise frequency and Time Systems. Radiocommunication Bureau*, 1997).

Для хорошего понимания проблем синхронизации сетей необходимо не столько разбираться в погрешностях и отклонениях временных интервалов, в работе систем фазовой автоподстройки частоты, сколько освоить современные представления о сетях синхронизации как о факторе, объединяющем всемирную службу точного времени и мировую сеть связи.

Синхронизация или синтонизация?

Аналогия между системами счета времени и синхронизацией носит фундаментальный характер (см. таблицу на с. 48). Так, первая проблема — распознавание интервалов времени, и если для календаря они определяются процессами естественной среды, то для сети синхронизации — процессами среды искусственной. В обоих случаях трудности решения второй проблемы вызваны тем, что и в астрономии, и в технике связи интервалы времени оказались несоизмеримыми между собой.

Синхронизацию (поддержание единого времени) обычно определяют как проблему согласования шкал времени (С. Брени. *Синхронизация цифровых сетей связи*, 2003). Однако для сетей синхронизации понятие шкалы времени не нормировано, то есть его нет, а следовательно, нет и третьей проблемы. В этом смысле можно было бы смело говорить о синтонизации (поддержание единой частоты), поскольку временные (фазовые) соотношения между тактовыми сигналами в различных узлах сети значения не имеют — достаточно обеспечить в них одну и ту же частоту этих сигналов. Так может быть есть смысл термин «сеть синхронизации» заменить на «сеть синтонизации»? Прежде чем заниматься терминологией, стоит обратиться к опыту профессионалов, утверждающих, что «... соотношения

между показаниями часов и их частотой часто приводят к умственной гимнастике потенциально опасной природы, даже если эти соотношения выполняются специалистами!» (см. книгу К. Одуана и Б. Гино). Поэтому начнем с привычных и вроде бы простых понятий.

На первый взгляд кажется очевидным, что о решении первой проблемы создания календаря природа позаботилась сама. Например, истинные солнечные сутки определяют как интервал времени между двумя солнечными полуднями, или точнее — как интервал времени между двумя последовательными прохождениями земного меридиана через точку на небосводе, которая соответствует центру солнечного диска в полдень. Сутки, определяемые вращением Земли, служат основной единицей измерения коротких отрезков времени. Поскольку повседневная деятельность человека тесно привязана не только к смене дня и ночи, но и к смене сезонов года, то продолжительность года, определяемая орбитальным вращением Земли вокруг Солнца, также является важной единицей времени. Но стоит приступить к точным измерениям, как сразу же возникают трудности. Например, пришлось столкнуться с проблемой выбора способа измерения этих естественных интервалов времени — см. таблицу на с. 50 (внизу).

После появления в XVII веке механических часов выяснилось, что истинные солнечные сутки имеют неодинаковую продолжительность в течение года из-за неравномерного движения Земли по эллиптичес-

Традиционная классификация приложений синхронизации

Канальный уровень	Цикловое (блоковое) фазирование <i>Frame alignment</i>	Физический уровень
Синхронизация сети <i>Network synchronization</i>		
Тактовая синхронизация <i>Clock synchronization</i>		
Синхронизация несущего колебания <i>Carrier synchronization</i>		
Источники: F.M. Gardner, W.C. Lindsey. <i>Guest Editorial — Special Issue on Synchronization</i> . IEEE Transactions COM-28, 1980		



Длительность истинных и средних суток за год совпадает четыре раза

кой орбите и наклона оси ее суточного вращения к плоскости орбиты. Поэтому протяженность года измеряют числом средних солнечных суток — а это уже расчетный интервал времени, которого в природе не существует. Для него ввели понятие «среднего солнца» — некоторой фиктивной точки, равномерно движущейся по небесному экватору в том же направлении, что и центр реального Солнца, в течение солнечного года.

«Средние сутки» — это интервал времени между двумя последовательными прохождениями земного меридиана через точку на небосводе, которая соответствует кульминации «среднего солнца» (расчетному или среднему полудню). Для определения среднего солнечного времени астрономы используют наблюдения не вирту-

ального «среднего солнца», а звезд. Ежегодно 20–21 марта Солнце оказывается в точке весеннего равноденствия, которая неподвижна по отношению к звездам и к земному наблюдателю, находящемуся на определенном меридиане, и ежедневно описывает на небосводе замкнутую траекторию. Интервал времени между двумя последовательными пересечениями этого меридиана называется звездными сутками. В полночь по местному времени 22 сентября звездное время равно 0 часов, а в полночь 20 марта — 12 часов и может быть рассчитано на любую дату. Разность между истинным и средним солнечным временем называют «уравнением времени», хотя по сути это график изменения разности в течение года, представленный на рисунке вверху. За год длительность истинных суток четыре раза совпадает с длительностью средних — 11 февраля, 15 апреля,

14 июня и 24 декабря. Наибольшую длину истинные сутки имеют 23 декабря, наименьшую — 16 сентября, и разница в эти дни составляет 51 секунду.

Согласование интервалов времени

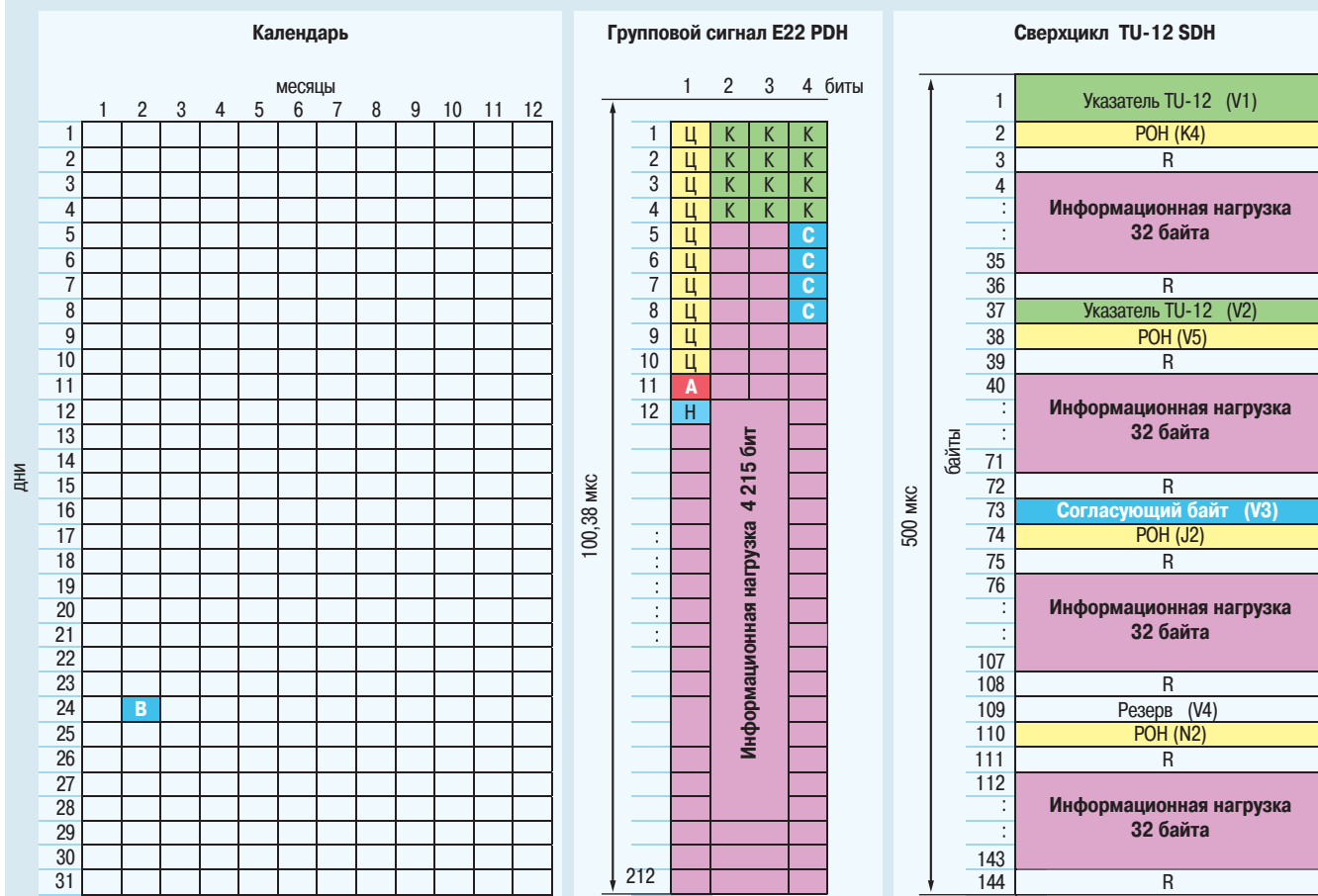
Желание определить интервалы времени на основе классической небесной механики стимулировало совершенствование способов измерений и повышение их точности. Точность механических часов оказалась достаточной для того, чтобы понять, что наблюдаемые истинные солнечные сутки не равномерны. Введение расчетного среднего солнечного времени позволило перейти к равномерным средним суткам с весьма высокой точностью их определения косвенным способом — через звездное время. Обнаруженные отклонения при этом не превышают 0,001 градуса или 0,24 секунды. Но, как видно из таблицы на с. 50 (внизу), во-первых, протяженность года в астрономическом времени может быть определена различными способами, и, во-вторых, его длительность зависит от способа определения. По утверждению Пуанкаре, «...нет наиболее правильного способа измерения времени по сравнению со всеми другими способами. То, что общепринято, просто наиболее удобно» (см. книгу К. Одуана и Б. Гино). Удобнее отсчитывать границы года точкой весеннего равноденствия, поэтому в основе современного календаря — солнечный год. Но число суток в календарном году может быть только целым, а солнечный год содержит дробные части суток. Между этими мерами времени нет простых кратных соотношений. Ясно, что

Аналогия между календарем и синхронизацией

Проблемы создания календаря	Проблемы синхронизации сетей
На основании многолетних астрономических наблюдений необходимо как можно точнее установить продолжительность периодического процесса (суток, месяца, года)	Разработать форматы цифровых сигналов (первичных цифровых сигналов, пакетов, циклов групповых сигналов)
Подобрать календарные единицы счета целых суток, месяцев, лет различной продолжительности таким образом, чтобы за достаточно большие промежутки времени средняя продолжительность календарного года была близкой к солнечному году (система високосов)	Обеспечить совместимость форматов цифровых сигналов для передачи их в транспортной среде (система согласования скоростей)
Создать шкалу времени, то есть указать начало счета и установить определенный порядок чередования дней (солнечных суток)	—

Источник: П. Карташов. *Высокоточное воспроизведение единиц времени и частоты*. ТИИЭР, 1972; К. Одуан, Б. Гино. *Измерение времени. Основы GPS*, 2002

Согласование интервалов времени в календаре и цифровых системах передачи



А – аварийная сигнализация, В – дополнительный день високосного года, К – команда согласования, Н – национальная сигнализация, С – согласующий бит, Ц – цикловая синхрокомбинация, R – фиксированная вставка (балласт), POH – заголовок VC-12

погрешность календарной единицы по отношению к ее астрономическому прообразу с течением времени накапливается, и наступит момент, когда календарные даты уже не будут соответствовать временам года. Чтобы этого не произошло, была разработана система високосов для юлианского календаря.

Система високосов заключается во введении календарных годов с неодинаковым числом суток и чередовании их таким образом, чтобы согласовать среднюю продолжительность календарного года с продолжительностью солнечного года. Для этого в високосном году добавляют 366-й день.

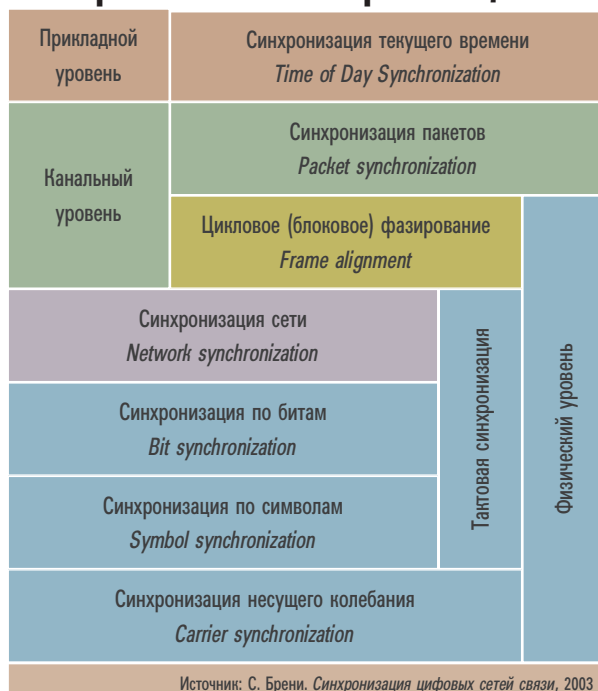
На рисунке вверху страницы приведены примеры решения второй проблемы для календаря — для группового сигнала E22 плезиохронной цифровой иерархии (PDH) и для сверхцикла субблока TU-12 синхронной цифровой

иерархии. Из таблицы на с. 50 (внизу) видно, что солнечный год приблизительно на четверть суток длиннее интервала времени, равного 365 суткам. Для такого календарного года «набег фазы» через четыре года составит одни сутки, а через 120 лет праздновать Новый год придется весной. Чтобы этого избежать, в юлианском календаре принято последовательное чередование трех простых лет (365 суток) и одного с «согласующим» днем (366 суток). «Согласующий» день упрятали между 24 и 25 февраля и потому назвали bis sextum («повторно шестой до мартовских календ»). Дополненный год позже был назван annus bissextus, откуда и пошло слово «високосный». Благодаря этому средняя продолжительность года составляет 365,25 суток и «набег» в одни сутки накапливается за 128 лет. Для того чтобы улучшить согласование, в

Аналогом системы високосов в форматах групповых сигналов является система согласования скоростей

григорианском календаре, по которому мы живем, систему високосов усложнили: вековой год считается високосным только в том случае, если номер года не кончается на два нуля. 2000 год по обоим календарям был високосным (20 делится нацело на 4), а вот 2100 год по юлианскому календарю будет високосным, а по григорианскому — нет (21 не делится нацело на четыре). Таким образом, средняя продолжительность года в григорианском календаре равна 365,2425 средних суток, а некомпенсированный «набег» в одни сутки накапливается только за 3333 года. Блуждания «фазы» григорианского календарного года относительно солнечного года, измеряемые долями суток, показаны на рисунке А (с. 51).

Современная классификация приложений синхронизации



Аналогом системы високосов в форматах групповых сигналов является система согласования скоростей. Структура цикла вторичного группового сигнала E22 PDH со скоростью передачи 8448 Кбит/с изображена на рисунке на с. 49. Цикл состоит из 848 бит, причем 28 из них — служебные, а 860 бит составляют информационную нагрузку в виде временного уплотнения четырех потоков E1 с чередованием бит, так что на каждый поток в одном цикле приходится 215 бит. Согласование скоростей заключается в том, что к любому потоку E1 может быть добавлен 216 бит в пустом тактовом интер-

вале первичного E1 и вторичного E22 сигналов равны номинальным значениям — 2048 и 8448 Кбит/с соответственно. В этом случае легко различить две составляющие: пилообразный джиттер согласования с периодом, кратным длине цикла 100,38 мкс (то есть с максимальной частотой около 10 кГц), и джиттер времени ожидания, с частотой приблизительно 1 кГц.

Система согласования скоростей в сверхцикле TU-12 SDH предназначена для компенсации разности тактовых частот в элементах сети с помощью сдвига информационной нагрузки на 1 байт. Если синхронизация элементов сети

нарушена, то при постоянной разности тактовых частот согласование скоростей указателем TU-12 будет иметь вид, показанный на рисунке В (с. 51), который представляет собой результат измерений погрешности временного интервала на транспортном стыке 2048 Кбит/с первичной цифровой сети. На интервале 800 с активность указателя TU-12 наблюдается 47 раз, что соответствует частоте согласования около 60 мГц. Это означает, что при номинальной скорости передачи VC-12, равной 2240 Кбит/с, относительная расстройка тактовых частот в тракте SDH равна $60 \cdot 10^{-3} / 2,24 \cdot 10^6 = 26 \cdot 10^{-9}$. Рисунки на с. 51 наглядно свидетельствуют об аналогии между календарем и синхронизацией сетей, особенно впечатляет сравнение этих рисунков.

О шкалах времени

Шкалой времени называют недвусмысленное, точно выраженное и однородное упорядочение событий во времени с абсолютным отсчетом от начальной эпохи (эры). Например, шкалу времени образует любая календарная система, в которой события чередуются через единичные интервалы времени — секунды, минуты, часы, сутки, годы, столетия... За начало отсчета можно принять любое реальное или мифическое событие.

Почтительно сравнить две такие шкалы: одну на основе нашего привычного григорианского календаря и вторую — на основе календаря индейцев майя, в которой отсутствует система високосов. Хотя древние майя знали, что действительная про-

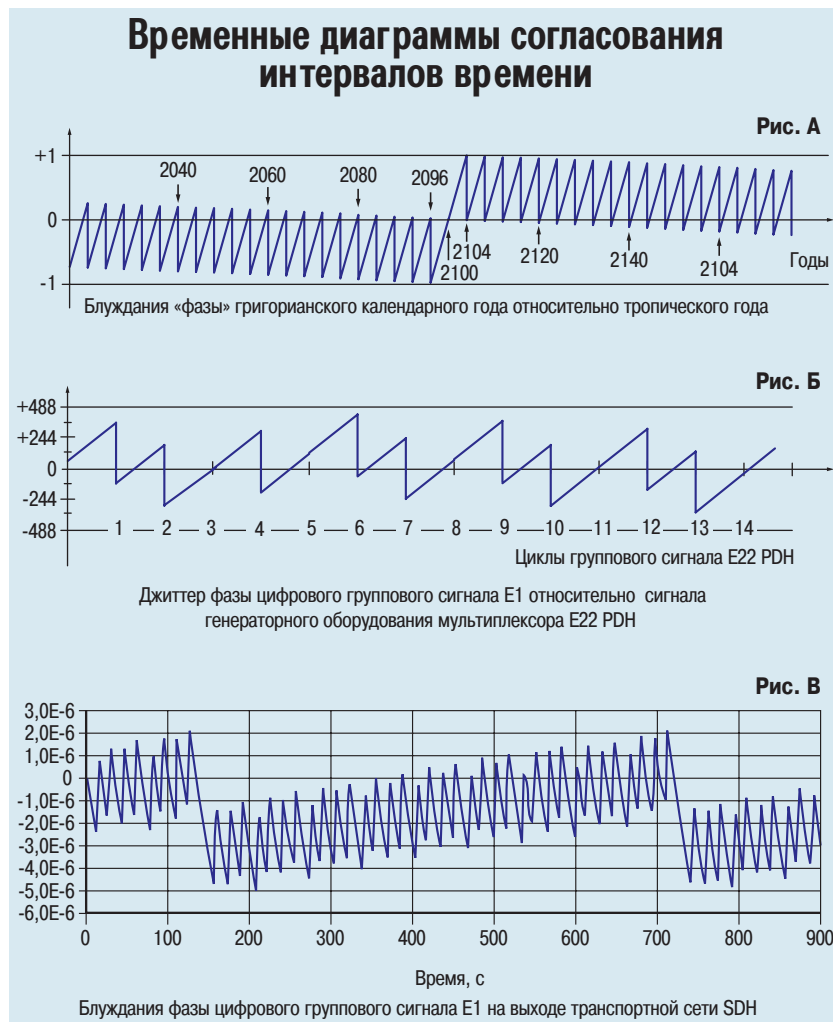
Определение астрономического года

Год	Измерение года	Протяженность, сут.
Истинный солнечный, или тропический (от греч. <i>tropikos</i> — круг поворота)	Интервал времени между двумя последовательными прохождениями центра диска Солнца через точку весеннего равноденствия	365,2421988
Первоначальное (до 1976 года) определение Бесселева года	Время изменения прямого восхождения среднего Солнца на 360 градусов, измеренного относительно неподвижной эклиптики	365,2551897
Звездный, или сидерический (от лат. <i>siderius</i> — звезда)	Период обращения Земли относительно прямой, проведенной из центра Солнца к неподвижному внегалактическому объекту	365,2563656
Аномалистический (от греч. <i>anomalía</i> — неправильность, в данном случае круговой орбиты)	Интервал времени между двумя последовательными прохождениями Землей ближайшей к Солнцу точки своей орбиты — перигелия	365,2596413
Затменный, или драконический	Период орбитального движения Земли относительно лунных узлов — точек пересечения лунной орбиты с плоскостью эклиптики	346,6200310

Источник: К.У. Аллен. Астрофизические величины, 1977

должительность солнечного года больше приблизительно на четверть суток, однако у них согласующие дни не предусматривались. Без поправок 365-дневный год должен опережать солнечный год и постоянно смещаться по сезонам — по такому календарю через 365 лет 1 мая пришлось бы на самое холодное время года. По дате мая точно известно, сколько прошло дней, но невозможно определить, сколько на самом деле прошло солнечных лет! Следуя нашей аналогии, подчеркнем, что без согласования скоростей в цифровых системах передачи цикловое фазирование «рассыпается» — нарушается целостность информации из-за того, что проскальзывания (slips) становятся регулярными.

Иллюстрацией логики счета времени может служить рисунок на с. 52, где показано, что сначала для создания шкалы времени сопоставили солнечный день с солнечным годом. Но после того, как в XVII веке точность измерения времени улучшили благодаря изобретению механических часов, пришлось ввести «средние солнечные сутки», которые, как оказалось, удобнее вычислять косвенно — в «звездном» времени. До 1960 года секунда в качестве единицы времени по умолчанию была определена повсеместно как $1/86\,400$ часть средних солнечных суток и служила основной единицей шкалы всемирного времени (Universal Time, UT), введенного по рекомендации Международного астрономического союза в 1928 году. Так как секунда среднего солнечного времени оказалась величиной переменной, то на 10-й Генеральной ассамблее по мерам и весам в 1960 году ратифицировали определение секунды по фиктивному году как « $1/31\,556\,925,9747$ долю солнечного года на 1 января 1900 года в 12 часов эфемеридного времени». Для тех, кто не знаком с астрономией, разгадывать этот ребус нет смысла, тем более что эфемеридная секунда имела официальный статус недолго. После изобретения кварцевого генератора в 1923 году точность измерения времени стала еще выше, и оказалось, что для шкалы UT необходимо вводить поправки из-за того, что ось вращения Земли описывает конус в $23,5^\circ$ (явление прецессии). Шкалу време-

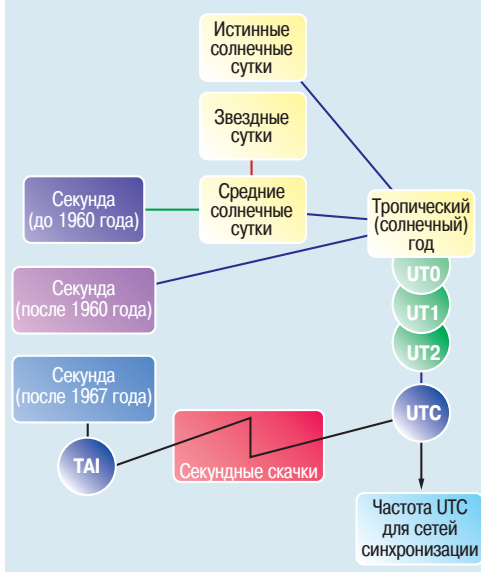


ни с такими поправками назвали UT1. Похоже, что повышать точность измерений — себе дороже: когда научились различать сезонные отклонения, влияющие на земное ядро, мантию, атмосферы, то со всеми соответствующими поправками получили шкалу UT2 и на ее основе 10-я Пленарная ассамблея Международного консультативного комитета по радиосвязи одобрила подробные рекомендации по введению системы Всемирного скоординированного времени (Universal Time Coordinated, UTC) в 1963 году. Правда, сейчас шкала UT2 в семействе UT2, представляет исторический интерес, потому что наступила эпоха «атомного времени». В 1958 году в результате совместной работы национальной физической лаборатории и военно-морской обсерватории США значение частоты, выраженное через секунду эфемеридного времени, было установлено равным $9\,192\,631\,770 \pm 20$ Гц, и уже на 13-й Генеральной конференции по мерам и весам в 1967 году реши-

Рисунки наглядно свидетельствуют об аналогии между календарем и синхронизацией сетей

ли, что «секунда есть промежуток времени, состоящий из $9\,192\,631\,770$ периодов изучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133», а эфемеридную секунду тут же аннулировали. Атомная секунда легла в основу Международного атомного времени (Time Atomic International, TAI) с начальной эпохой на 1 января 1958 года. По рекомендации Пленарной ассамблеи Международного консультативного комитета по радиосвязи (1970 год) после того, как 1 января 1972 года разность между UTC и TAI оказалась равной 10 с, для интервалов времени шкалы UTC атомная секунда стала основной единицей. Но тут выяснилось, что вращение Земли в 10 тыс. раз менее равномерно, чем атомное время. Более того, обнаружилось вековое замедление ее вращения,

Эволюция шкал времени



Пока невозможно сказать, каким будет всемирное скоординированное время в обозримом будущем

равное $1,4 \cdot 10^{-3}$ с/сут. за столетие, причем длительность суток была точно равна 86 400 атомных секунд в 1820 году (сейчас она составляет 86 400,002 с). Пока по UTC сверяют сигналы точного времени во всем мире.

Однако в течение года накапливается разность между UTC и TAI равная примерно 1 с, которую с 1 января 1972 года компенсируют положительными согласующими секундными скачками. UTC становится комбинацией двух шкал TAI и UT1, она обладает высокой точностью и согласована с вращением Земли, которое продолжает управлять делами в мире. Но шкала UTC подвергается нарастающей критике из-за того, что приходится вводить секундные скачки с интервалом

один-два года в зависимости от причуд вращения нашей планеты. Все еще невозможно сказать, каким будет UTC в обозримом будущем.

Принятая терминология

Синхронизация сети (network synchronization) — это обобщенное понятие способа распределения по всем узлам сети единой тактовой частоты или одинаковых интервалов времени (см. статью П. Карташова). В данном случае целью синхронизации является обеспечение двух необходимых условий обмена информацией между двумя потребителями в реальном времени:

непрерывность — скорость передачи и приема информации должны быть одинаковыми;

целостность — элементы информации (биты, байты или блоки) должны быть получены пользователем в такой же последовательности, в которой они были пересланы отправителем.

Сеть синхронизации (synchronization network) — это «сеть поддержки», которая состоит из узлов синхронизации и каналов синхронизации, предназначенных для доставки опорных сигналов к цифровому оборудованию (Рек. ITU-T G.810).

Наше исследование аналогии между созданием календаря и синхронизацией цифровой сети показывает, что нет оснований вводить термин «синхронизация сетей связи». Не стоит менять терминологию по четырем причинам. Во-первых, в пространственно разнесенных объектах равенство частот с точностью до фазы проще всего обеспечить с помощью ФАПЧ. Во-вторых, единую частоту в разнесенных узлах цифровой сети можно получить с помощью прямого доступа к UTC через приемники спутниковых радионави-

гационных систем. В-третьих, частота UTC служит репером для оценки точности и измерения стабильности опорных сигналов сетей синхронизации. В-четвертых, имеется глубокая аналогия между синхронизацией календарей и фазированием форматов цифровых сигналов. Система согласования скоростей служит для сохранения целостности передаваемой информации, а система високосов и секундные скачки необходимы для «фазирования» календарного и солнечного годов, то есть для сохранения целостности нашего восприятия времени. Рисунки на с. 51 свидетельствуют о том, что в обоих случаях непрерывность времени требует согласования с ним как естественных, так и искусственных дискретных интервалов времени. Джиттер и блуждания фазы сигналов синхронизации — это такое же неизбежное явление, как и неравномерность солнечных суток. Более того, в реальных цифровых каналах кроме «систематических» блужданий фазы, присущих системам согласования скоростей, содержится составляющая в виде случайного шума.

Международный союз электросвязи рекомендует в нормативных документах по синхронизации сетей вместо «UTC» использовать термин «частота UTC» (Рек. ITU-T G.810), лишней раз напоминая о том, что понятие шкалы времени все же не имеет отношения к сетям синхронизации,

В фундаментальной монографии С. Брени, посвященной синхронизации сетей связи, дана более современная классификация приложений синхронизации (см. таблицу на с. 50).

Здесь на прикладном уровне появляется «синхронизация текущего времени», которая необходима уже для «поддержки сети поддержки», то есть для поддержки сети управления, в которой для обеспечения требуемого качества обслуживания необходимо строго фиксировать аварийные события и действия по тарификации услуг. В таком случае сеть управления должна работать в единой шкале времени для всей территории обслуживания. Обычно это и есть шкала UTC. Но это уже другая сеть и другая синхронизация. ●

Александр Савчук

Базовые материалы

- ✓ F.M. Gardner, W.C. Lindsey. Guest Editorial — *Special Issue on Synchronization*. IEEE Transactions COM-28, No. 8, 1980, p. 1105,1106.
- ✓ ITU Handbook. *Selection and use of precise frequency and Time Systems*. Radiocommunication Bureau, 1997.
- ✓ П. Карташов. *Высокоточное воспроизведение единиц времени и частоты*. ТИИЭР, 60, № 5, 1972, с. 27—37.
- ✓ К. Одуан, Б. Гино. *Измерение времени. Основы GPS*. М., Техносфера, 2002.
- ✓ С. Брени. *Синхронизация цифровых сетей связи*. М., Мир, 2003.
- ✓ К.У. Аллен. *Астрофизические величины*. М., Мир, 1977.
- ✓ ITU-T Recommendation G.810 (08/96). *Definitions and terminology for synchronization networks*.