

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА С ЕДИНЫМ МИРОВЫМ ВРЕМЕНЕМ

*П.Р. Андреев*

Институт вычислительной математики и математической геофизики  
Новосибирск, Россия  
тел. (3832) 34-37-43, E-mail: pa@opg.sccc.ru

В докладе рассматривается задача привязки программно-аппаратного комплекса к единому мировому времени – UTC (Universal Time Coordinated). Необходимость такой привязки вызвана тем, что две геофизические системы, находящиеся в разных местах довольно далеко друг от друга (десятки и сотни километров) и не имеющие между собой прямой связи, должны работать синхронно. Для задач вибросейсмического просвечивания Земли допустимая рассинхронизация между системами (источником сейсмического сигнала и его приемником) не должна превышать единиц микросекунд. Следствием же привязки является выдача сейсмоприемной аппаратуре команд, обеспечивающая точно известные моменты выборки (дискретизации) регистрируемого сигнала относительно источника.

В принципе, задача синхронизации источника и приемника не требует какой-либо абсолютной шкалы времени – достаточно лишь обеспечить синхронную совместную работу двух систем. Это можно сделать, теоретически, используя для связи радиоканал. Однако практически оказывается удобнее и методически правильнее использовать единую мировую шкалу времени UTC.

Получившие в последние годы широкое распространение приемники всемирной системы определения местонахождения (GPS, Global Positioning System) могут служить также в качестве источника точного времени. В частности, OEM-модели (предназначенные для встраивания в другую аппаратуру) имеют выход, на котором электрические импульсы следуют с частотой 1 Гц и синхронизированы с UTC с точностью 1 мкс или даже лучше. Некоторые неудобства доставляет тот факт, что GPS имеет свою собственную шкалу времени, на уровне целых секунд не совпадающую с UTC. Дело в том, что последняя содержит так называемые «високосные», или «прыгающие», секунды (leap seconds), вставляемые для компенсации расхождения атомных и астрономических часов из-за замедления вращения Земли (далее такие секунды будут называться выравнивающими, что отражает их суть). Время же GPS (синхронное в прошлом с UTC) течет равномерно, в результате чего между этими системами отсчета постепенно увеличивается расхождение, равное целому числу секунд:

Время GPS:	23:59:58	23:59:59	00:00:00	00:00:01	00:00:02
Время UTC:	23:59:58	23:59:59	<u>23:59:59</u>	00:00:00	00:00:01

Время UTC известно также как Гринвичское (GMT; Greenwich Mean Time), и выравнивающая секунда (подчеркнута) добавляется к нему приблизительно один раз за 1.5 года, обычно в конце квартала (т.е. 31 марта, 30 июня, 30 сентября или 31 декабря) перед полночью.

В связи с неравномерностью течения UTC возникает вопрос: не лучше ли использовать для синхронизации другую, равномерную, шкалу времени – GPS? Ответ следует дать отрицательный, как минимум, по двум причинам. Во-первых, другие системы спутниковой навигации (например, российская ГЛОНАСС) ведут отсчет в единицах UTC, а большинство выпускаемых в последнее время GPS-приемников способны также выдавать время в UTC (т.е. содержат встроенные средства преобразования). Таким образом, потенциально возможна несовместимость между системами, использующими для синхронизации приемники разного типа. Во-вторых, не существует однозначного соответствия между этими шкалами времени, поскольку выравнивающие секунды добавляются, вообще говоря, нерегулярно. Другими словами, если в будущем понадобится привязать записанные данные к «обычному» времени UTC, потребуется дополнительная информация, а именно таблица моментов вставки выравнивающих секунд. Такую таблицу, очевидно, придется регулярно пополнять – то есть, фактически, ценой небольшого упрощения системы сейсмовибратор-приемник получаем существенное усложнение на этапе обработки записанных данных.

Подводя итог вышесказанному, сформулируем два вывода.

1. Хотя для правильной работы системы сейсмический вибратор – приемник достаточно только внутренней синхронизации, разумно будет осуществлять также привязку часов к некоторой общей шкале времени, что может быть сравнительно легко достигнуто использованием приемника спутниковой системы навигации.
2. В качестве шкалы времени следует выбрать общепринятый мировой стандарт UTC, что создает минимум проблем при последующей обработке данных и повышает совместимость системы с продуктами других производителей. В первую очередь это сейсмоприемники, например, выпускаемые американской фирмой Refraction Technology, Inc. записывающие устройства REFTEK.

После выбора временной шкалы подлежит рассмотрению вопрос о способах привязки и их достоинствах и недостатках. Дело в том, что все хоть сколько-нибудь сложные системы строятся в настоящее время на базе вычислительной техники. Это может быть настольный компьютер, ноутбук, микроконтроллер или однокристалльная микро-ЭВМ. Общей принципиальной чертой всех перечисленных устройств является наличие микропроцессора и, следовательно, способность работать по программе. При этом функциональность системы, основанной на микропроцессоре, определяется в значительной мере ее программным обеспечением. То есть у разработчика появляется возможность распределить функциональность (под функциональностью здесь понимаются подробности внутреннего исполнения системы) между аппаратным и программным обеспечением.

Выбранный способ привязки к шкале времени (с точки зрения соотношения программных и аппаратных издержек на реализацию) должен, очевидно, быть как можно более простым и надежным. При этом упрощение аппаратной части приводит, как правило, к усложнению программной и наоборот. Рассмотрим достоинства и недостатки двух вариантов, в одном из которых приоритет отдается простоте алгоритма, в другом – простоте схемного блока, применительно к построению подсистемы синхронизации сейсмических регистрирующих комплексов [Андреев, 2000; Григорюк, 2000; Шорохов, 2000].

Первый подход – упрощение алгоритма.

Здесь идеальной оказалась бы чисто аппаратная синхронизация, когда все операции по привязке к шкале времени скрыты от микропроцессора (фактически, от программы, которую он выполняет). Все, что требуется от программы – передать в подключенное к компьютеру устройство время, когда следует начать сбор данных, а затем считывать их и сохранять, скажем, на жестком диске. Когда нужный объем данных накоплен, подается команда «стоп». Конечно, реально такой подход не имеет смысла, поскольку аппаратный блок вынужден был бы работать с «человеческими» единицами измерения – как минимум, часами, минутами и секундами. Кроме того, обмен подобной информацией с источником временных отметок (в нашем случае – приемником GPS по протоколу RS-232) нетривиален, то есть вряд ли может быть реализован на микросхемах малой и средней степени интеграции. Как результат – приходится заключить, что в блоке привязки нужен микропроцессор с соответствующей программой. То есть достигнутая простота алгоритма основной программы иллюзорна. Вывод: основной программе все-таки придется самостоятельно общаться с источником времени и иметь дело с часами, минутами и секундами, а заодно и с более крупными интервалами (день, месяц, год).

Разумной сложности аппаратуры можно достичь, используя достаточно длинный двоичный счетчик, который сбрасывается и начинает считать по приходу некоторого секундного импульса с приемника GPS. Скорость счета определяется частотой дискретизации записываемого сигнала (для задач геофизики вполне достаточно нескольких десятков или сотен Гц), а схема фазовой автоподстройки частоты обеспечивает синхронизацию счета с последующими импульсами приемника. В качестве генератора частоты дискретизации используется обычный кварцевый резонатор. При этом в функции алгоритма управления входит запустить счетчик в произвольный момент (но, естественно, по границе секунды, что достигается аппаратно), подать команды «старт» и «стоп» получения данных, а также установить соответствие содержимого счетчика значению абсолютного времени, что может быть сделано в произвольный момент его работы.

Проведя несложные расчеты, можно узнать требуемую длину счетчика. Для частоты дискретизации 50 Гц и времени порядка 0.5 часа получаем  $1800 * 50 = 90000$ , т.е. 17-18 разрядов. Таким образом, описанный метод обеспечивает знание программой в любой момент абсолютного времени с точностью до одного периода частоты дискретизации (это знание может понадобиться, в частности, для вывода на экран, запуска АЦП, начала и окончания записи данных на диск).

Второй подход – упрощение схемы.

При втором подходе идеальной является, соответственно, чисто программная синхронизация. Секундные импульсы приемника GPS вводятся непосредственно в компьютер, а на выходных линиях программа формирует частоту дискретизации сигнала, привязанную к единому времени (в [Андреев, 2001] показано, как можно достичь микросекундного разрешения программных часов). Эта частота, а также команды «пуск» и «стоп», поступают непосредственно на АЦП. Аппаратная часть в данном случае состоит только из схем электрического согласования компьютера и подключенного к нему оборудования. Серьезных же недостатков можно отметить два. Первый – достаточно интенсивное использование процессора (который, вообще говоря, можно занять более полезным делом, чем формировать частоту дискретизации). Второй – необходимость для исполняющейся программы удовлетворять требованию жесткого реального времени, поскольку задержанный импульс тактовой частоты АЦП приводит к нарушению синхронизации и необходимости перезапуска процесса оцифровки данных. Что в рассматриваемом случае, разумеется, недопустимо.

Как и в варианте с упрощением алгоритма, здесь приходится искать компромисс. Приемлемая по характеристикам схема состоит из достаточно точного и стабильного (чтобы исключить схему автоподстройки частоты) генератора тактовых импульсов АЦП, который запускается по секундному импульсу приемника GPS и в дальнейшем работает независимо от него. Импульсы генератора поступают также в компьютер по отдельному входу, где программа ведет их подсчет (скажем, по прерыванию) и, таким образом, знает относительное время с момента запуска. Абсолютное же время определяется прибавлением к относительному момента запуска генератора. Усложнение программы здесь выражается в том, что, во-первых, необходимо определить (прочитать из приемника GPS) абсолютное время не раньше и не позже, а именно в момент пуска генератора; во-вторых, необходимо считать импульсы постоянно – потери прерывания (пропуски импульсов) недопустимы, а его задержки на время более единиц микросекунд – крайне нежелательны. Что, таким образом, ограничивает возможные частоты дискретизации значениями в сотни герц.

Ключевым моментом в этой схеме является стабильность опорного генератора. Для сеансов регистрации длительностью 0.5 часа и допустимого ухода синхронизации в 10 мкс она составляет  $10^{-5} / 1800 = 5.5 \cdot 10^{-9}$ . То есть необходимо использование кварцевого генератора с термостабилизацией. Заметим, что использование обычного (отобранного по частоте) резонатора для рассматриваемого класса задач в принципе допустимо, но в этом случае данные с разных систем, с разных экземпляров одной и той же системы регистрации, а также данные, записанные в различных по времени сеансах, будут несопоставимы из-за накапливающейся рассинхронизации.

Какой же способ привязки можно считать оптимальным? Ответ на этот вопрос зависит, как мы видим, от того, чему отдается приоритет. Подход, основанный на упрощении алгоритма, приводит к заметному усложнению аппаратного блока, поскольку, кроме содержательной части – счетчика и схемы автоподстройки частоты – требуется также и схема его согласования с имеющимися входными линиями компьютера, которые не позволяют напрямую вводить 17- или 18-разрядные данные. Растут габариты блока синхронизации и увеличивается его энергопотребление. Во втором случае – с упрощением схемы, возникает ограничение на частоту дискретизации и накладываются жесткие требования на точность и стабильность опорного генератора (см. [Григорюк, 2000]).

Возможны и промежуточные варианты – исключив схему фазовой автоподстройки частоты, получим в результате упрощение аппаратной части и необходимость использования стабильного кварцевого генератора [Шорохов, 2000]. А добавив (в схему из второго подхода) 4-х или 8-разрядный счетчик, можно некоторым усложнением аппаратуры увеличить возможную частоту дискретизации сигнала.

Как показал опыт эксплуатации комплексов «Роса» и «ВИРС», наиболее оправданным является использование персонального компьютера (ПК) в качестве единого центра сбора и первичной обработки поступающей информации с возложением на него также функций контроллера. Такой подход позволяет максимально упростить аппаратную часть системы, уменьшить ее габариты и энергопотребление. Вычислительной мощности центрального процессора (типа Pentium и выше) современного ПК оказывается достаточно не только для управления оборудованием и взаимодействия с человеком-оператором в процессе сбора данных, что открывает возможность, при разработке соответствующего программного обеспечения, выполнять одновременно некоторую обработку получаемой информации.

Такой обработкой может являться, при регистрации взрывов и землетрясений, приблизительное определение направления на источник волны и расстояния до него, либо, при сейсмическом зондировании с использованием сейсмовибратора, вычисление спектра сигнала и задержки его распространения в среде.

#### Литература

1. *Андреев П.Р.* Программное обеспечение реального времени для мобильной системы сбора данных. // Сб. докл. междунар. научно-технич. конф. «Информационные системы и технологии». – Новосибирск, Изд. НГТУ, 2000. – Т. 4. – С. 19-22.
2. *Андреев П.Р.* Программная реализация часов высокого разрешения на IBM PC совместимых ПК. // Труды конференции молодых ученых ИВМиМГ. – Под ред. Г.А. Михайлова. – Новосибирск, 2001. – С. 3-14.
3. *Григорюк А.П.* Распределённая система сбора данных реального времени. // Сб. докл. междунар. научно-технич. конф. «Информационные системы и технологии». – Новосибирск, Изд. НГТУ, 2000. – Т. 3. – С. 456–460.
4. *Шорохов М.Н.* Вибросейсмическая измерительно-регистрационная станция. // Сб. докл. междунар. научно-технич. конф. «Информационные системы и технологии». – Новосибирск, Изд. НГТУ, 2000. – Т. 1. – С. 144-148.