

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ВРЕМЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ СИГНАЛОВ

А.В. Носов¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: a_y_nos@mail.ru
Статья поступила в редакцию 14.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Приведен алгоритм расчета точного времени событий, зафиксированных регистратором, использующим термокомпенсированный кварц. Представлены материалы, подтверждающие точность измерения времени 10^{-9} .

Ключевые слова: Контроллер, термокомпенсированный кварц, автономный регистратор

Как было показано в предыдущих работах, регистраторы автономных донных станций, обеспечивающие высокоточную временную привязку данных к единой шкале времени без доступа к спутниковой навигации в ходе измерений и при соблюдении требований к минимальному энергопотреблению используют метод термокомпенсации (Носов и др., 2017; Левченко и др., 2004; Левченко и др., 2007). Однако опыт этих публикаций показал, что до сих пор возникают сомнения в том, что данный метод обеспечивает заявленную точность. Данная работа посвящена более детальному изложению алгоритма временной привязки и обсуждению полученных результатов.

Основой для временной привязки автономного регистратора данных являлась сборка из двух кварцев. Один из них тактировал контроллер регистратора, его резонансная частота мало зависела от температуры. Частота этого кварца f , использовавшегося в регистраторах, была близка к 7000000 Гц. Другой кварц – термозависимый, его частота F была близка к 32000 Гц. Конструктивно оба кварца были склеены между собой и располагались в миниатюрном металлическом корпусе типа микросхемы, который обеспечивал равенство их температур. Неотъемлемой частью этой конструкции являлась калибровочная таблица, содержащая данные о соответствии частот кварцев при разных температурах в диапазоне рабочих условий регистратора (от 0 до 50 град. Цельсия). Пример выборки из такой таблицы приведен в табл. 1.

Для временной привязки измерений использовались два счетчика контроллера регистратора. Главный счетчик – аппаратно-программный, состоял как из собственно счетчика, так и нескольких дополнительных байтов. Главный счетчик предназначен для подсчета всех тактов быстрого кварца в течение всего процесса регистрации, количество дополнительных байтов определялось необходимой емкостью счетчика (максимальной необходимой длительностью сеанса работы регистратора). Другой счетчик, медленный, подсчитывал количество тактов термозависимого кварца и предназначался для формирования временных интервалов (около

10 с.), использовавшихся для учета температурного ухода частоты главного кварца. Медленный счетчик подсчитывал фиксированное количество периодов термозависимого кварца (320000), по совпадению вырабатывал прерывание и перезапускался. Таким образом, формировалась последовательность импульсов с периодом следования около 10 с.

Таблица 1

Номер пары	F, Гц	f, Гц
1	32695	6999937.374
2	32696	6999937.791
3	32697	6999938.218
–	–	–
50	32744	6999960.853
51	32745	6999961.204
52	32746	6999961.543
–	–	–
102	32796	6999951.410
103	32797	6999950.458
104	32798	6999949.468

Для каждого условно 10-секундного интервала подсчитывалось количество попавших в него тактов главного кварца. Подсчет проводился методом захвата (без остановки подсчета) значений регистров главного счетчика. Эти данные, термические, использовались следующим образом. Предварительно, на основании данных табл. 1 составлялась таблица ожидаемого количества тактов главного кварца N , которые попадут в условно 10-секундный интервал при данной частоте термозависимого кварца. Пример выборки из такой таблицы представлен в табл. 2.

Таблица 2

Номер пары	N	F, Гц
1	68511139	6999937.374
2	68509300	6999937.791
3	68507209	6999938.218
–	–	–
50	68409097	6999960.853
51	68407011	6999961.204
52	68404926	6999961.543
–	–	–
102	68300538	6999951.410
103	68298446	6999950.458
104	68296354	6999949.468

Далее методом кусочно-линейной интерполяции для любого числа N вычислялась реальная физическая частота главного кварца. Зная частоту главного кварца и количество его периодов, попавших в текущий термический интервал, определялась его истинная длительность.

Примечательно то обстоятельство, что на диапазон изменчивости частоты главного кварца около 10 Гц приходится диапазон измеряемого параметра около 200000 единиц. Если бы калибровочные таблицы кварцев содержали информацию о температурах при измерении частот, можно было бы на их основе изготовить термометр с точностью выше 0.001 град.

Помимо счетчиков, в процессе временной привязки существенно использовался внешний эталон единой шкалы времени. В нашем случае им служил приемник GPS, имеющий в качестве выходных сигналов PPS и COM-порт. PPS служил для точной аппаратной привязки контроллера к единой шкале времени, а COM-порт – для считывания информации о моменте времени, соответствующем фронту сигнала PPS.

При включении питания регистратора счетчики начинали подсчитывать соответствующие импульсы. Перед переводом регистратора в режим автономной работы производилась его временная калибровка. Суть калибровки состояла в захвате состояния главного счетчика по фронту ближайшего пришедшего импульса PPS и фиксации соответствующего ему значения времени. В ходе регистрации в каждый момент возникновения прерывания от медленного счетчика (температурно зависимого) проводился захват состояния главного счетчика. Важным для обеспечения точности являлось то обстоятельство, что считывание состояния главного счетчика проводится именно путем захвата, тем самым учитывался каждый такт главного кварца, и если он не попал в предыдущий температурный интервал – он был учтен в последующем. После вывода регистратора из автономного режима также производилась его временная калибровка.

Для привязки измерений к единой шкале времени после завершения регистрации проводятся следующие действия. Для каждого 10-секундного интервала между прерываниями от температурно зависимого кварца на основании табл. 2 вычислялась его точная длительность согласно единой шкале времени. Вычисления производятся с максимальной доступной точностью (в Дельфи – 20 десятичных разрядов). Для крайних неполных временных интервалов (момент калибровки не синхронизировался с регистрацией температурных данных) оценка частоты главного кварца бралась из ближайших полных температурных интервалов. Длительности всех температурных временных интервалов суммировались, и результат сравнивался с временем финальной временной калибровки. Разность равномерно растягивалась по всему времени регистрации.

Таким образом, каждый момент прерывания от температурного кварца оказывается привязан к единой шкале времени. Для привязки ко времени какого-либо события достаточно было зафиксировать в момент его появления состояние главного счетчика. Используя привязку ко времени предшествующего температурного прерывания и точную частоту главного кварца на текущем температурном интервале, можно было оценить точное время возникновения события.

Следует отметить, что данный метод временной привязки записей не требует высокой точности предварительной калибровки и автоматически компенсирует эф-

факт старения кварца, если при старении температурная зависимость его частоты не меняется. В то же время важно учитывать, что после перекачки зарегистрированных данных из регистратора в компьютер индекс получаемого массива нельзя рассматривать как меру времени, скорее он является лишь порядковым номером элемента массива двухкомпонентных векторов, одна из компонент которых является целочисленной – результат оцифровки входного сигнала, а вторая – действительной, как результат расчета времени на базе данных калибровки.

Для проверки точности описанного способа термокомпенсации был поставлен эксперимент, в ходе которого с помощью сейсморегистратора принимались и записывались короткие импульсы, синхронизированные с источником точного времени (GPS приемник), следовавшие с интервалом примерно 50 секунд. Моменты генерации фронтов этих импульсов совпадали с фронтами сигналов PPS спутникового приемника, соответствующие аннотации сохранялись в специальном электронном журнале. Первая запись была сделана в течение примерно 15 суток, вторая – в течение нескольких часов. Первая запись была начата в лаборатории при комнатной температуре, затем регистратор был перемещен в провизионную кладовую, температура воздуха в которой была близка к 2°C. Затем регистратор на несколько суток был возвращен в лабораторию и соединен с источником импульсов подрыва пневмопушки. По окончании регистрации сигналов регистратор вновь был перемещен к кладовую и окончательно вернулся в лабораторию в конце сеанса регистрации для финальной временной калибровки. На рис. 1 представлены зафиксированные регистратором данные о температуре. По горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной – количество импульсов тактового кварца (7000000 Гц), попавших в 10-секундный временной интервал. Не следует сопоставлять рис. 1 с данными табл. 2, поскольку они получены для разных кварцев.

На рис. 2 представлена аналогичная зависимость, полученная в ходе второй записи. Относительно высокочастотные колебания на графике второго рисунка связаны с периодическим включением лабораторного кондиционера.

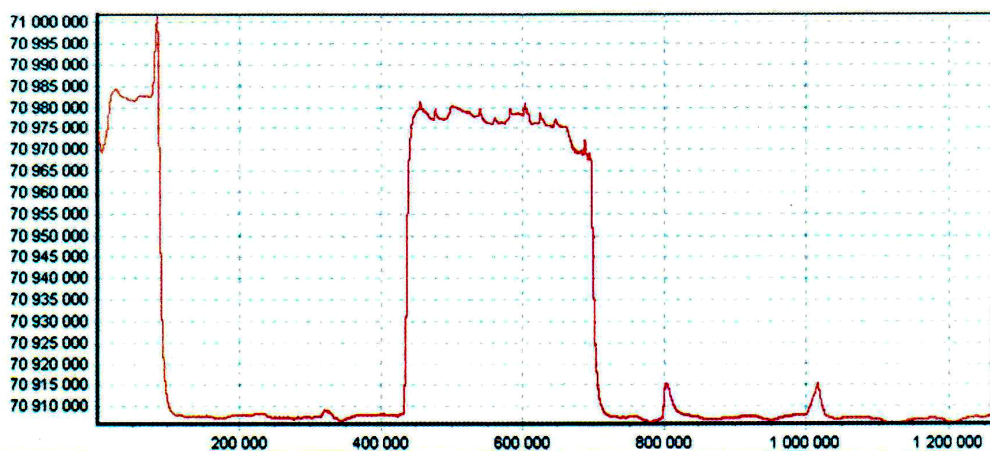


Рис. 1. Зависимость частоты главного кварца от времени в течение первой записи.

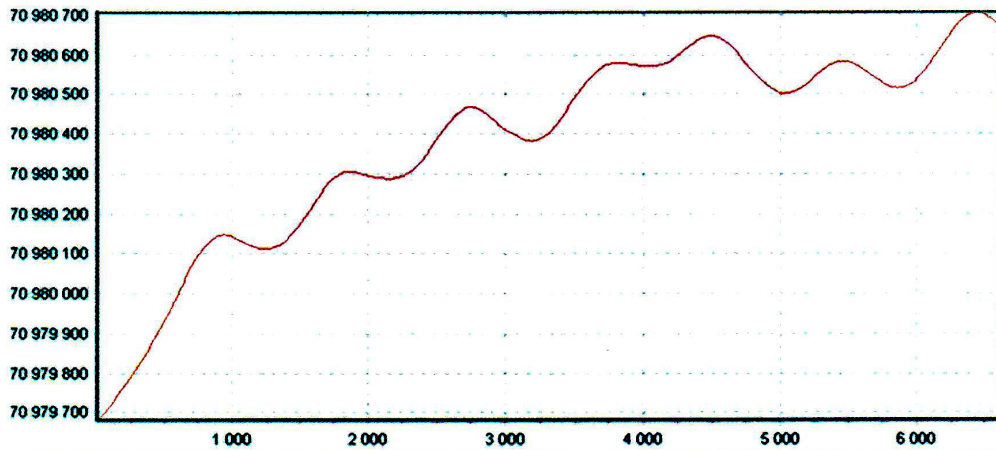


Рис. 2. Зависимость частоты главного кварца от времени в течение второй записи.

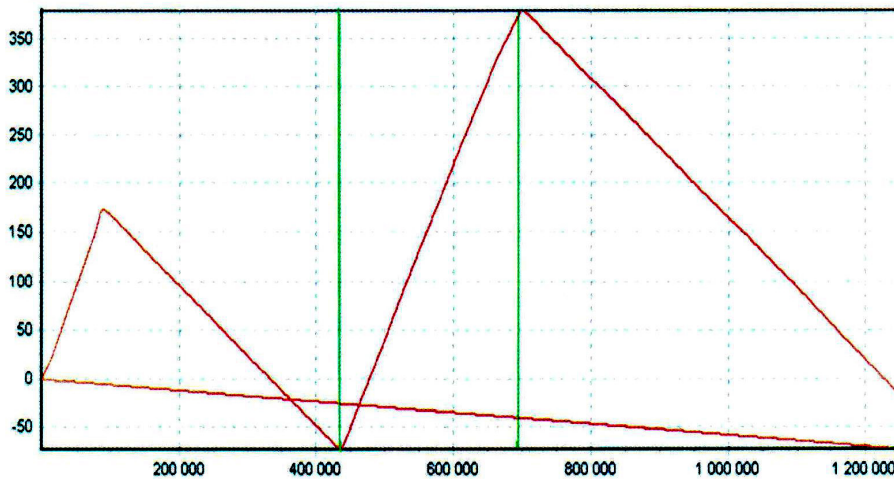


Рис. 3. Временные поправки для первой записи, миллисекунды.

На рис. 3 приведен результат расчета временных поправок, полученный с помощью данного метода термокомпенсации. По горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной – поправки в миллисекундах. Прямая наклонная линия – уход внутренних часов регистратора. Рис. 3 демонстрирует тот факт, что при отсутствии компенсации зарегистрированное регистратором время отличалось бы от времени по единой шкале на величину порядка 400 мс. На рис. 4 представлены аналогичные данные второй записи. Поскольку вторая запись была короткая и проводилась в относительно стабильных условиях, вводимые временные поправки не превышают 0.04 мс.

На рис. 5 представлены графики сигналов для двух экспериментов. Графики (трассы) составлялись на основе выборки из общей непрерывной записи того участка сигнала, который начинался в момент генерации импульса, зарегистрированный в журнале. На рис. 5 начало выборки соответствует нижней границе рисунка. Длительность выборки составляла 100 мс.

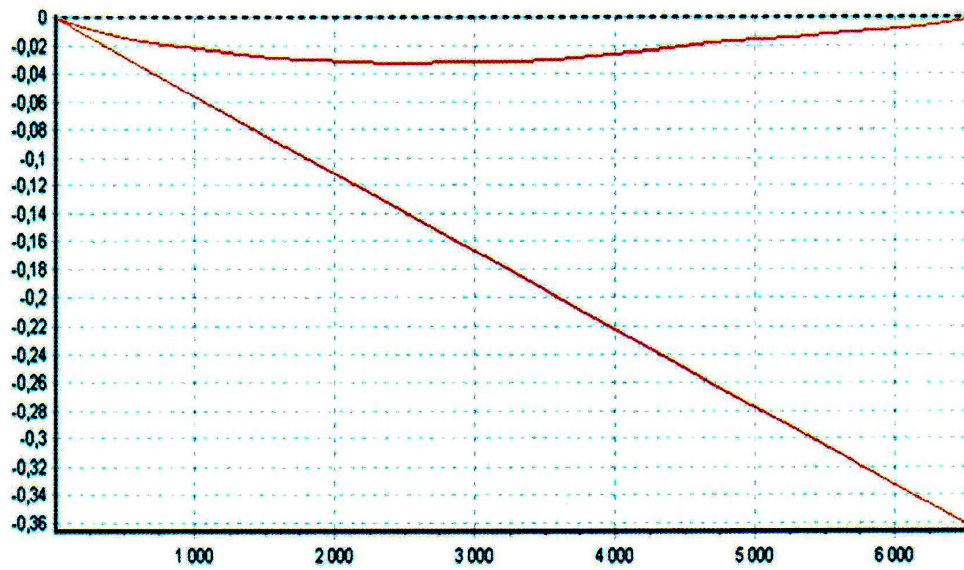


Рис. 4. Временные поправки для второй записи, миллисекунды.

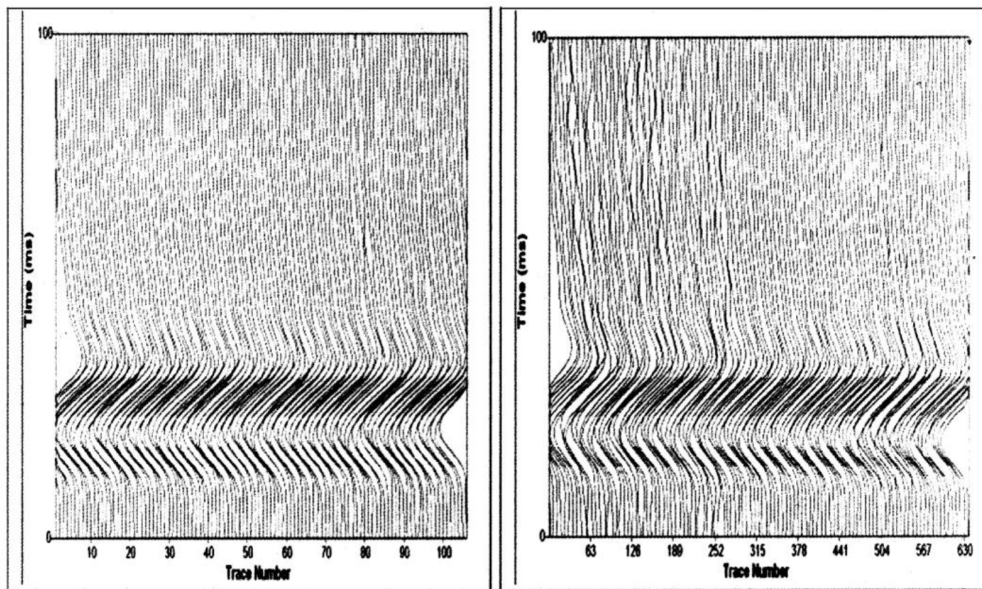


Рис. 5. Сравнение двух записей. Графики сигналов подрыва пушки.

Слева – полученные для сравнения без перемещения из лаборатории как опорные. Справа – результат 15-суточного эксперимента. Следует отметить дополнительно, что для обеих записей информация о точном времени от спутникового приемника подавалась к контроллеру регистратора только в начале и конце записи, в остальное время регистратор использовал сигналы спутникового приемника только через аналоговые входы. Правая картинка составлена с использованием скорректированного по времени сигнала; в противном случае, как следует из рис. 3, передний фронт совокупности графиков импульсов растянулся бы по вертикали на 400 мс.

Сигналы сглаженные, поскольку подверглись фильтрации. Полоса пропускания фильтра – от 5 до 125 Гц. По горизонтальной оси отложены номера трасс, по вертикальной – время в мс. Каждая трасса извлечена из общей записи с учетом временных поправок на основании зарегистрированного независимым устройством точного момента генерации импульса согласно единой шкале времени. Оценивая стабильность фронта сигнала величиной около 1 мс, имеем оценку эквивалентной временной точности измерения в 10^{-9} .

Работа выполнена по теме № 0149-2018-0010 «Технологии инструментальных океанологических наблюдений для исследования физических полей, подводных объектов и экологии в гидросфере: разработка методов и технических средств многопараметрического сканирования водной толщи, дна и подводных объектов автономными и привязными зондами и профилографами».

Литература

- Левченко Д.Г., Носов А.В., Парамонов А.А., Симонов В.Н.* Устройство и способ (варианты) хронирования информации автономной информационно-измерительной системы: Патент № 2277298 РФ // 22.09.2004.
- Левченко Д.Г., Носов А.В., Парамонов А.А., Симонов В.Н.* Устройство хронирования информации автономной информационно-измерительной системы // Научное приборостроение. 2007. Т. 17. № 3. С. 88–94.
- Носов А.В., Руссак Ю.С., Тихонова Н.Ф., Юрицын В.В.* Опыт использования метода термокомпенсации для автономных регистраторов сигналов. // Сборник трудов всероссийской конференции МСОИ–2017. – Т. 2, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН Москва, 2017. – С. 49–54.

SOME SPECIAL ASPECT OF TIME ERROR TERMOCOMPENSATION METHOD USE FOR AUTONOMOUS SIGNAL RECORDERS

A.V. Nosov¹

*¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: a_v_nos@mail.ru*

Submitted 14.10.2017, accepted 25.12.2017

Some previous and new additional results are presented concerning accurate of time correction of data received by using thermo compensated quarts. Materials confirmed relative accuracy of data registration up to 10^{-9} .

Keywords: Controller, termo quarts, autonomous registrator.

References

- Levchenko D.G., Nosov A.V., Paramonov A.A., Simonov V.N.*, Ustrojstvo i sposob (varianty) hronirovanija informacii avtonomnoj informacionno-izmeritel'noj sistemy (Mean and method of time attachment of information for autonomous recorder.), Patent No. 2277298 RF, 22.09.2004.
- Levchenko D.G., Nosov A.V., Paramonov A.A., Simonov V.N.*, Ustrojstvo hronirovanija informacii avtonomnoj informacionno-izmeritel'noj sistemy. (Equipment for time attachment of autonomous recorder), *Nauchnoe priborostroenie*, 2007, Vol. 17, No.3, pp. 88–94.
- Nosov A.V., Russak Ju.S., Tihonova N.F., Juricyn V.V.*, Opyt ispol'zovanija metoda termokompensacii dlja avtonomnyh registratorov signalov (Experience of applyement of thermo compensation method for autonomous signal registrators), *Sbornik trudov vsrossijskoj konferencii MSOI–2017*, Vol. 2, Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, Moskva, 2017, pp. 49–54.