

Простой эталон частоты с управлением по GPS.

Приведен простой современный метод получения эталонной частоты на 10 МГц.

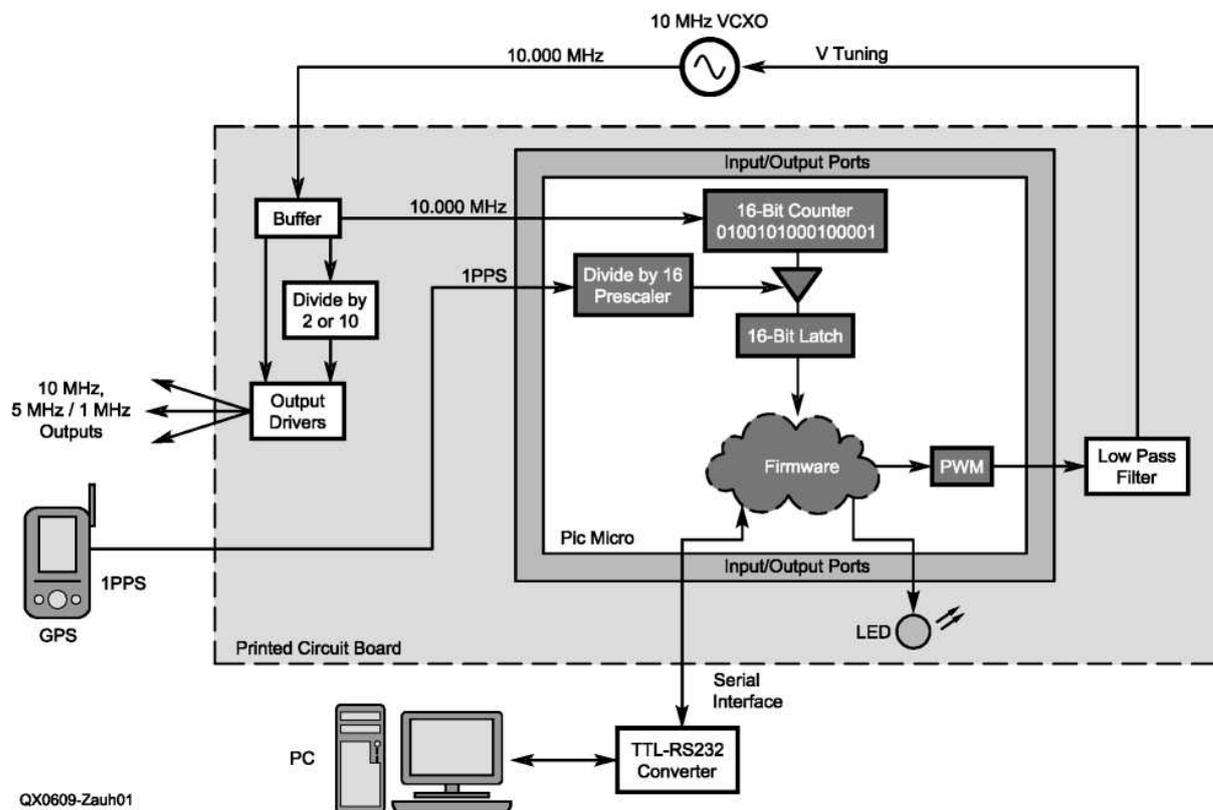
Bertrand Zauhar, VE2ZAZ

242 Robert-Martial St Gatineau,
Quebec J9J 2V1 Canada

ve2zaz@amsat.org

В радиолюбительской практике часто требуется высокоточный эталон частоты. Для работы со слабыми сигналами, такими, как в ЕМЕ связи (отражение от Луны) в СВЧ диапазоне, необходимо вести передачу и прием сигналов на точно установленной частоте; в противном случае узкополосные фильтры могут помешать Вам принять этот слабый сигнал. В этом случае устанавливается опорная частота на 10 МГц, питающая синтезатор частоты, который генерирует рабочую радиочастоту. Точная опорная частота на 10 МГц также полезна для проверки настраиваемого оборудования. Имея точный эталон частоты, Вы можете подать частоту на счетчики и получить метки от сигнал-генератора.

Появление Global Positioning System (GPS) позволило упростить получение частоты и времени высокой точности. Несколько доступных GPS-приемников обеспечивают сигнал 1 импульс в секунду (1 pps). Этот сигнал, как правило, показывает кратковременную точность ± 1 микросекунды (1 ppm или $\pm 1 \times 10^{-6}$).



QX0609-Zauh01

Рисунок 1 — Блок-схема эталона частоты с управлением по GPS.

Высокой точности параметра можно достичь путем усреднения его в течение длительного периода. Это и используется в этом проекте: устройство синхронизирует внешний управляемый напряжением источник сигнала 10 МГц сигналом от GPS (1 pps).

Хорошая работа Brooks Shera¹ имеет большой интерес в широких кругах экспериментаторов, которые хотят увеличить точность частоты за доступную цену. Его система использует технику PLL, чтобы синхронизировать внешний генератор сигналом от приемника GPS и получить точный эталон частоты.

Проект, который я представляю здесь, обеспечивает более простой и более современный подход для получения эталона частоты на 10 МГц с управлением по GPS. Улучшения, найденные в сегодняшней технологии, имеют следующие преимущества: твердые характеристики, больше возможностей и уменьшение числа компонентов.

Отличия от других, ранее опубликованных проектов:

- Использует измерение частоты: как более простое, чем измерение фазы.
- Применяет буферизацию на плате и разветвление выходов с 50-Ω выходным сопротивлением.
- Предоставляет три наиболее распространенные эталонные частоты 10 МГц, 5 МГц и 1 МГц.
- Обеспечивает полное программное управление вхождением в синхронизм и управление режимами без DIP-переключателей.
- Использует меньшее количество компонентов и не требует внешнего DAC и внешнего счетчика.
- Использует только одно напряжение питания: +5 В DC (исключая источник питания VCXO).

Тесты показали, что эта система стабильно обеспечивает величину кратковременной эталонной точности равную 1×10^{-10} . Это получено, при использовании стандартных приемников GPS автомобильного класса. Этот прибор не конкурирует по точности с Цезиевым эталоном. Однако, он намного лучше, чем большинство стандартных встроенных, автономных генераторов, которые я встречал в доступных измерительных приборах. Например, чтобы дать Вам общее представление о порядке точности, 1 от 10^{10} соответствует ошибке в 1 Гц при частоте сигнала 10 ГГц!

Описание системы

На **рисунке 1** приведена блок-схема моего эталона частоты управляемого по GPS. Система аппаратно/программно управляет системой автоподстройки частоты (FLL). В сущности, система сравнивает локальный источник частоты (внешний генератор) с GPS-посылкой. Это подстроит локальный управляемый источник 10 МГц, чтобы соответствовать полученной от GPS посылке с точностью 1 pps. Источник 10 МГц синхронизован относительно посылки GPS на 1 Гц в реальном времени программным обеспечением. Затем эталонная частота 10 МГц делится на более низкие частоты, и они предоставляются пользователю для высокоточных приложений. Управление системой и контроль достигаются использованием двухцветного светодиода и последовательного порта, связанного с терминалом (PC).

Описание аппаратных средств

На рисунке 2 приведена схема электрическая принципиальная эталона частоты управляемого по GPS. Главная операция состоит из подсчета числа возрастающих фронтов, произведенных на частоте 10 МГц кварцевым генератором управляемым напряжением (VCXO) за период 16 секунд (16 импульсов с GPS). Если GPS и VCXO будут работать на одинаковой частоте, то будет посчитано точно 160 000 000 импульсов (± 1 импульс, определяемый технологией счета).

До входа в микроконтроллер сигнал VCXO частотой 10 МГц буферизован и усилен микросхемой приемника U1. Дополнительный входной резистор R1 может быть включен на вход, если это необходимо для VCXO. Буферизированный эталонный сигнал частотой 10 МГц разветвлен в несколько мест на плате.

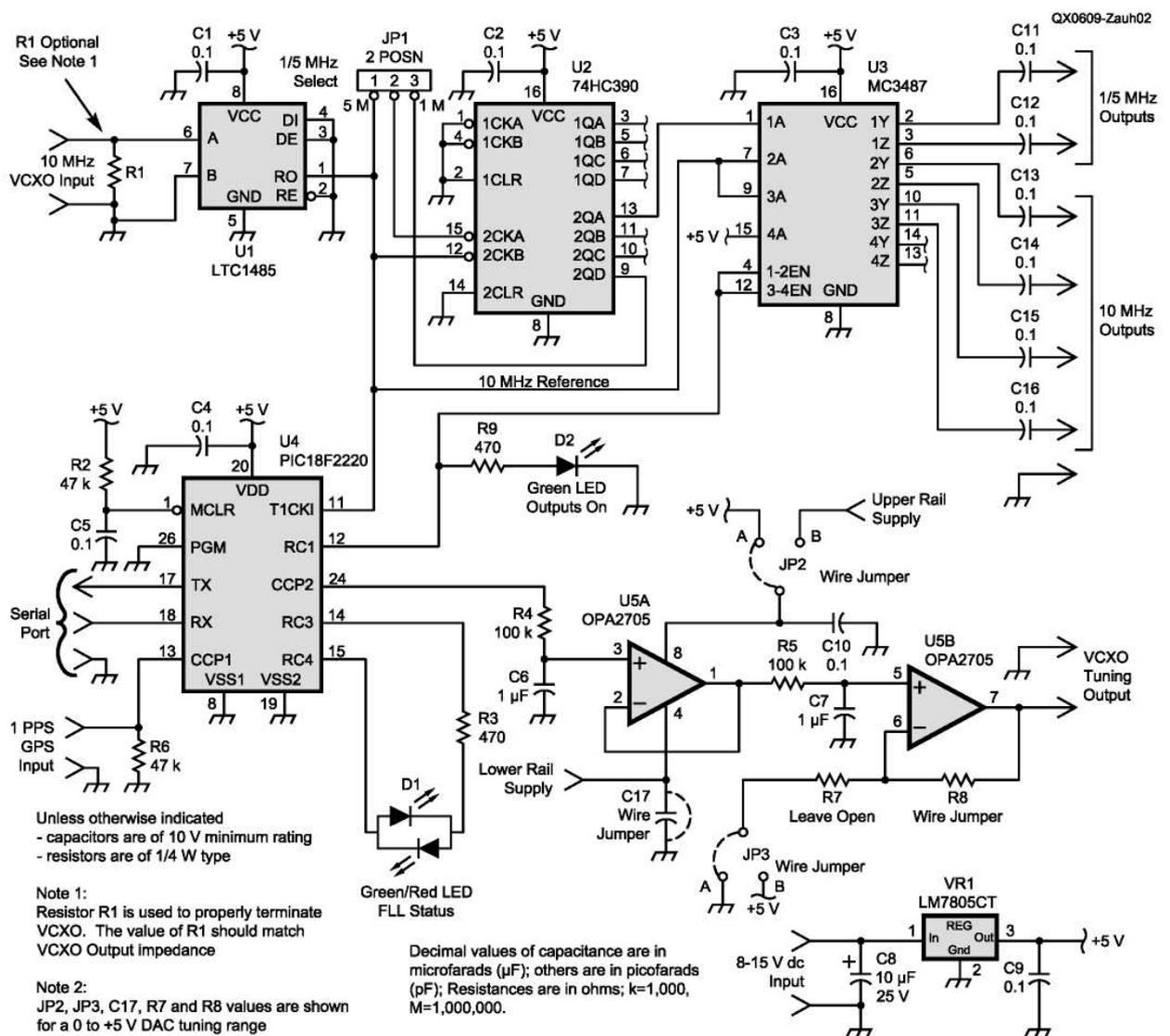


Рисунок 2 — Схема электрическая принципиальная эталона частоты управляемого по GPS.

У микроконтроллера PIC18F2220 (U4) имеется встроенный 16-битный счетчик, увеличивающий свое значение сигналом внешнего источника, в данной схеме –

“10MHz VCXO”. Значение счетчика фиксируется по спадающему фронту другого внешнего сигнала – “1 PPS GPS”. Этот процесс полностью автономен и не зависит от программного обеспечения. Задача микроконтроллера в этом процессе состоит в том, чтобы проанализировать результаты и соответствующим образом подстроить частоту VCXO.

Управление частотой VCXO

У микроконтроллера PIC18F2220 нет интегрированного цифро-аналогового преобразователя (DAC). Чтобы создать регулируемый источник напряжения для изменения частоты VCXO, используется встроенный 10-битный широтно-импульсный модулятор (PWM). PWM сигнал вырабатывается в виде непрерывного сигнала прямоугольной формы. Этот PWM сигнал поступает на внешний двухкаскадный фильтр нижних частот с частотой среза 1 Гц (U5A, U5B и дискретные компоненты) для выделения из него среднего значения постоянного напряжения. Изменяя коэффициент заполнения сигнала PWM, можно задать точное аналоговое напряжение постоянного тока в диапазоне от 210 до 1024 шагов.

Точное управление изменением коэффициента заполнения сигнала PWM достигается 14-битным разрешением DAC. Это соответствует шагу настройки 6×10^{-5} Гц для VCXO, у которого диапазон настройки 1 Гц. Достижение 14-битного разрешения DAC, используя 10-битный PWM, требует дополнительной микропрограммной обработки. Идея состоит в том, чтобы "подмешивать псевдослучайный сигнал" (Oversampling) к ширине импульса в пределах окна с 16 циклами. Эти 16 циклов приводят к дополнительным 4-битам разрешения. Например, увеличение разрешения DAC до 14 бит, на первом шаге означает увеличение 10-битной PWM одним приращением на первом из этих 16 импульсов. Увеличение разрешения DAC на втором шаге означает увеличение 10-битной PWM одним приращением на втором из этих 16 импульсов, и так далее.

Чтобы была возможность для использования различных VCXO, у фильтрующих каскадов предусмотрен механизм, который позволяет Вам питать операционные усилители различными более высокими или более низкими напряжениями. Это делается конфигурацией JP2 и C17. Помните, тем не менее, что максимальная разность потенциалов между более высоким и более низким напряжением должна быть не более 12 В. Другая особенность: второй каскад низкочастотного фильтра имеет дополнительную возможность использовать R7/R8, если VCXO требует больший диапазон настраиваемого напряжения, чем стандартный 5 В диапазон. Дополнительные 5 В могут быть добавлены ко второму каскаду низкочастотного фильтра, используя джампер JP3. Это позволяет использовать VCXO, у которых диапазон настраиваемых напряжений от -5 В до +5 В.

В **таблице 1** перечислены некоторые возможные конфигурации низкочастотного фильтра для различных диапазонов настройки VCXO. Наконец, настройка знака отклонения сигнала может быть выбрана в программном обеспечении, для того, чтобы можно было приспособить оба типа VCXO.

Таблица 1**Конфигурации диапазона настройки**

Диапазон настройки VCXO	R7	R8	C17	JP2 Положительное напряжение	JP3 Смещение
От 0 до +5 В	Не установлен	Переключатель	Переключатель	Положение А	Не установлен
От 0 до +8 В *	100 кОм	62 кОм	Переключатель	Положение В	Положение А
От 0 до +10 В *	100 кОм	100 кОм	Переключатель	Положение В	Положение А
От -5 В до +5 В **	100 кОм	100 кОм	0.1 мкФ	Положение А	Положение В

* Требуется внешний источник положительного питания.

** Эта конфигурация используется с ОС VCXO серии HP 10544/10811. Требуется внешний источник питания -5 В.

Эталонные выходы

Система обеспечивает до четырех эталонных сигналов на 10 МГц. Дополнительно предоставляется до двух эталонных сигналов с выбираемой частотой 5 МГц или 1 МГц. Эти дополнительные сигналы вырабатываются синхронным счетчиком U2.

Дополнительная частота выбирается с помощью джампера JP1. Все выходы имеют 50-Ω выходное сопротивление и обеспечивают прямоугольный сигнал амплитудой не менее, чем 1 В (pk-pk). Эти сигналы обеспечиваются микросхемой линейного формирователя U3.

Когда внутреннее программное обеспечение активировано, эталонные выходы отключаются, если FLL переходит в разблокированное состояние. Такая защита гарантирует, что пользователь не сможет использовать эталон неизвестного качества. Светодиод D2 индицирует наличие эталонного сигнала на выходе.

Светодиоды статуса FLL

Система отображает основной статус FLL и тревожные состояния единственным двухцветным светодиодом (D1). Светодиодный контроль применен для того, чтобы позволить пользователю узнавать о текущем и прошлом статусе FLL за прошедшую секунду. Сдвоенный зеленый/красный светодиод в одном корпусе может воспроизвести три цвета: зеленый, красный и янтарный. Янтарный воспроизводится, когда и зеленый и красный светодиоды включены одновременно. Дополнительно светодиод вспыхнет с частотой 1 Гц, чтобы обеспечить контроль корректности сигнала 1 pps.

Последовательный порт

Так как статусный светодиод FLL, отображает только основной статус FLL и тревогу, также используется последовательный порт. Последовательный порт обеспечивает полное управление и контроль FLL и других микропрограммных возможностей. Последовательный порт соединяется с RS232 портом персонального компьютера через двунаправленный конвертер TTL-to-RS232. Такой конвертер может быть легко сделан, используя несколько транзисторов и дискретных компонентов, или используя микросхему конвертера последовательного порта из серии MAX23x фирмы Maxim. В интернете доступно много простых схем. Может быть также куплен "стандартный" конвертер.

Последовательный порт базируется на ASCII-сообщениях и обеспечивает стандартные текстовые строки статуса, которые могут быть приняты и проанализированы пользователем. Последовательный порт также интерпретирует серию пользовательских команд для управления FLL и другими микропрограммными возможностями.

Дополнительная информация о текстовых строках и пользовательских командах может быть найдена на моем Web-сайте.²

Регулятор напряжения постоянного тока +5 В

Чтобы гарантировать стабильное и чистое напряжение питания платы, используется отдельный регулятор фиксированного напряжения постоянного тока +5 В, VR1. Регулятору требуется теплоотвод, так как когда все эталонные выходы подключены, потребляемый ток приближается к 200 мА. Без теплоотвода это вызвало бы перегрев регулятора напряжения.

Внешний VCXO

Эксплуатационные характеристики системы в значительной степени зависят от выбора конструкции внешнего VCXO на 10 МГц. Чтобы обеспечить лучшую кратковременную стабильность, рекомендуется использовать термостатированный VCXO (OCVCXO). Хороший, подержанный Hewlett Packard OCVCXO легко доступен на eBay.³ Выбор этого блока должен стать Вашей основной целью.

Этот проект был проверен и испытан с OCVCXO, у которых диапазон настройки 1 Гц или 10 Гц, по всему диапазону напряжений настройки. Различные отклонения в настройках могут потребовать разных прошивок для достижения оптимальной работы. Пользователь может поэкспериментировать с ними.

GPS приемник

У приемника GPS, используемого в этой системе, должен быть TTL-совместимый выходной сигнал на 1 pps. Точность этого сигнала будет влиять на общую точность системы. Типичная точность GPS приемников автомобильного класса составляет порядка 1 микросекунды (1×10^{-6} с) и это удовлетворительно для нашего приложения.⁴

Эта конструкция была проверена с приемниками Garmin GPS-35 и Motorola Oncore GT+. Оба имеют вышеупомянутую точность. Блок Motorola Oncore GT+ фактически имеет несколько большую точность на 1 pps. Это не подтвердилось во время оценки. Фактически, "дрожание" от секунды к секунде сигнала 1 pps оказалось большим, чем на Garmin GPS-35, указанное в вышеупомянутой спецификации. Сравнилось среднее значение "дрожания" сигнала FLL, поскольку берется большое количество выборок частоты, прежде чем сделать частотную коррекцию VCXO.

Для лучшей точности я рекомендую устанавливать блок GPS в неподвижное положение (положение - закреплен). В этом режиме прошивка учитывает фиксированное расположение GPS. Это увеличивает точность сигнала 1 pps. Пользуйтесь документацией на блок GPS для получения дополнительной информации о том, каким способом устанавливать блок GPS.

Печатная плата

Я проектировал двухстороннюю монтажную плату, чтобы объединить все аппаратные средства.⁵ На **рисунке 3** приведен вид сверху на монтаж платы. Ее размеры – (2.8x3.5) дюйма ((72x89)мм). Панельки под микросхемы - необязательные, но рекомендуемые. Особенно это относится к микроконтроллеру. Используйте паяльник с качественным жалом. Файлы конструкции монтажной платы доступны для общего пользования.⁵

Пользователь может избрать для монтажа другие методы, например, такие, как макетная плата и соединение проводами. Расположение элементов на плате не настолько важно. Необходимо обратить внимание на “развязки” по питанию около интегральных микросхем.

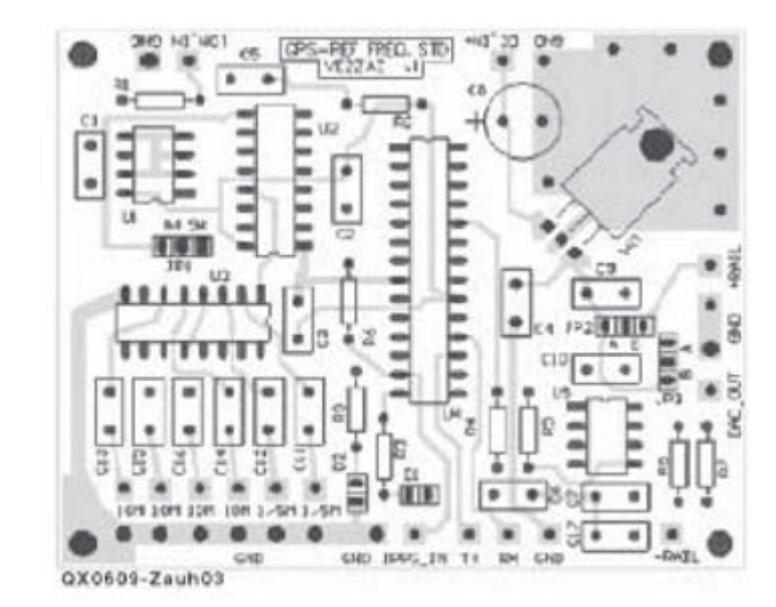


Рисунок 3 — Образец монтажной платы для эталона частоты с управлением по GPS.

Описание микропрограммного обеспечения

Программное обеспечение, запускаемое на PIC микроконтроллере, было написано на языке ассемблера. Исходный код хорошо описан в файле. Исходный код и hex-код могут быть загружены с моего Web-сайта.⁶ (Также см. **Примечание**².) После ассемблирования hex-код занимает около 3 Кбайт флэш-памяти.

Вхождение в синхронизм FLL и цикл управления

Упрощенная блок-схема вхождения в синхронизм FLL и цикл управления показан на **рисунке 4**. Процесс начинается с левой стороны и повторяется бесконечно, пока FLL включена. Микропрограмма делает выборки сигнала 10 МГц VCXO продолжительностью 16 секунд. Основываясь на том, как близка выборка к номинальной частоте, статус FLL будет обновляться. Если частота выборки в пределах установленных лимитов, программное обеспечение будет добавлять выборку для расчета средней частоты. В противном случае выборка будет отклонена и начнется обработка следующей выборки вхождения в синхронизм.

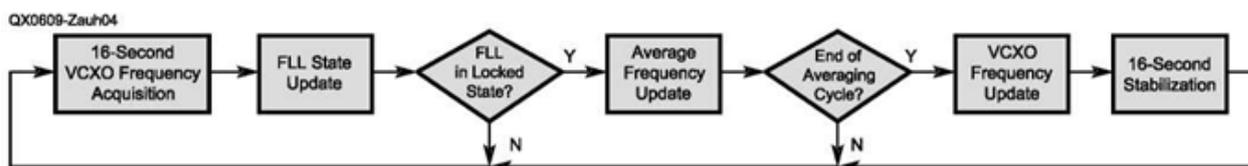


Рисунок 4 — Вхождение в синхронизм FLL и цикл управления.

После обновления средней частоты программное обеспечение проверяет, достиг ли цикл усреднения частоты конкретного количества выборок. Если это произошло, то

напряжение на выходе DAC обновляется, чтобы произвести необходимое изменение частоты VCXO, основанное на расчетной средней частоте. Иначе, программное обеспечение просто начинает обработку следующей выборки вхождения в синхронизм.

Всякий раз, когда на выходе ЦАП значение изменяется, вставляется 16-секундная пауза, чтобы позволить VCXO стабилизироваться прежде, чем начнется следующий цикл усреднения частоты.

Состояния FLL и переходы

Рисунок 5 иллюстрирует различные состояния и переходы во время операции FLL. При нормальных "устойчивых" условиях FLL будет в заблокированном состоянии (**Locked**) с периодическими переходами к состоянию задержки (**Holdover**), чтобы отключить приемник GPS из-за искажения времени. Разблокированное состояние (**Unlocked**) бывает при запуске системы, или, если состояние задержки длится слишком долго. Наконец, отключенное состояние (**Disabled**) инициируется по команде пользователя, и по существу, отключает FLL. В этом режиме FLL просто поддерживает последнее действительное напряжение DAC.

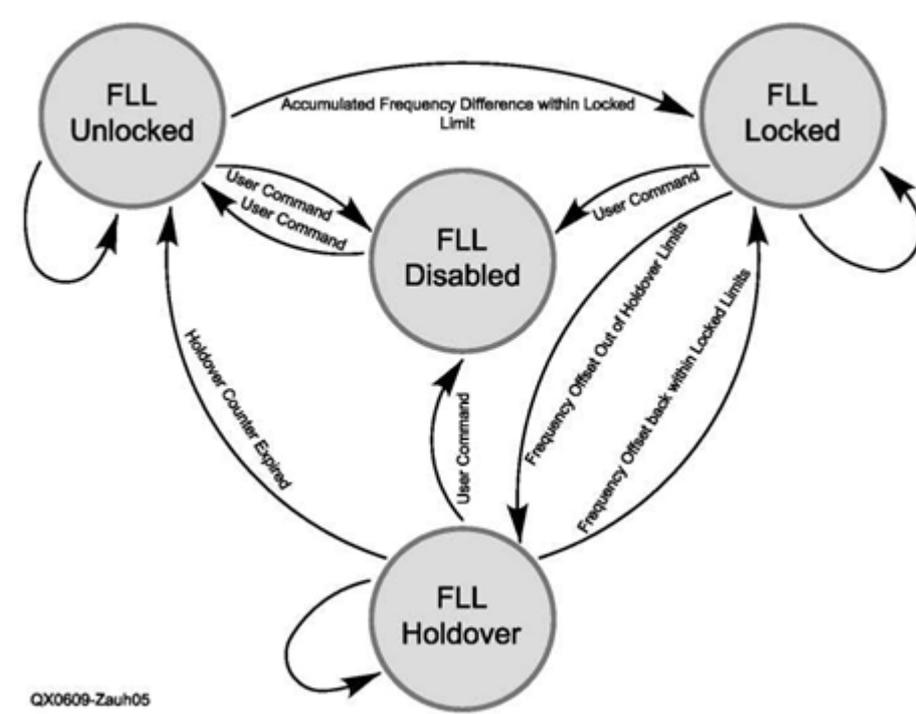


Рисунок 5 — Состояния FLL и диаграмма переходов.

Текущее состояние FLL может быть четко идентифицировано в текстовой строке FLL, посылаемой по последовательному порту каждые 16 секунд. Состояние FLL может также быть определено по цвету светодиода: зеленый - для заблокированного состояния, янтарного - для состояния задержки, красного - для разблокированного и отключенного состояния. Эти цвета указывают на относительный уровень достоверности эталонного сигнала 10 МГц на выходе.

Режимы усреднения частоты

Пользователю доступны два режима усреднения. Я назвал их режим оценки и режим голосования. Режим оценки более эффективен, когда цикл усреднения частоты

короткий, например, 5 минут. Этот режим будет полезен при синхронизации более быстрыми темпами. Режим голосования позволяет обнаружить тенденции и более эффективен, когда усреднение частоты, происходит за более длительный цикл, например, больше, чем 30 минут. Этот способ будет полезен с блоками GPS, у которых сигнал 1 rps с существенным "дрожанием" от секунды к секунде, поскольку FLL не заботится о величине разницы частот, а всего лишь о ее знаке. Тесты также показали, что этот способ приводит к лучшей точности. Режим голосования должен использоваться с длительными циклами усреднения частоты. Подробности о том, как эти режимы использовать представлены в руководстве пользователя.

Функционирование

При включении питания, через последовательный порт система выведет на экран компьютера символ запуска и версию микропрограммы. Затем загрузите сохраненные ранее параметры FLL из данных флэш-памяти. Если микроконтроллер был запущен первый раз после программирования, то загрузятся значения параметров по умолчанию.

Некоторые параметры должны быть установлены пользователем через пользовательские команды, потому что различные приемники GPS и различные VCXO требуют различные величины параметров. Должны быть установлены такие параметры, как число выборок, необходимых для обновления частоты VCXO, число выборок в состоянии задержки и знак отклонения настройки VCXO. Подробное описание каждого из этих параметров есть в руководстве пользователя, который доступен на моем Web-сайте (см. **Примечание** ²).

Система FLL начинает работу с разблокированного состояния и попытается автоматически получить выборки частоты. Корректировки частоты VCXO будут сделаны в конце каждого цикла усреднения. После некоторого времени, которое может занимать от нескольких минут до нескольких часов, система, перейдет к заблокированному состоянию. После того, как система настроена и находится в заблокированном состоянии, она требует минимального обслуживания.

Каждые 16 секунд при любых условиях, программное обеспечение посылает строку состояния, которая предоставляет подробную информацию о процессе вхождения в синхронизм FLL и состоянии тревоги. Пример такой строки состояния показан ниже:

```
L|U|01FF6 |+|F|67FC|0120|FFFD|007D|03
```

Описание каждой области в строке состояния доступно в системном руководстве пользователя.

Если пользователь хочет ускорить начальный процесс вхождения в синхронизм, то он должен вручную настроить FLL, исключая DAC, который приводит к синхронизации GPS - генератор. Этого добиваются по ноль-биениям генератора 10 МГц с другим хорошо известным эталоном. NIST WWV/WWVH или коротковолновая радиостанция NRC CHU-хорошие источники, чтобы достигнуть этого.

Как только система стабилизирована, пользователь может увеличить продолжительность цикла усреднения. Чем дольше цикл усреднения по выборкам, тем более точными будут измерения частоты. Типичный цикл будет длиться от 1 до 4 часов. Это означает, что система будет накапливать ошибки частоты за этот период до внесения изменения частоты VCXO. С хорошим и устойчивым VCXO цикл усреднения может быть сделан еще более длительным. Это улучшит системную точность еще больше.

Чтобы сделать интерфейс человек/компьютер более дружелюбным, я создал программу в Windows, чтобы контролировать и управлять системой. Снимок экрана программного обеспечения показан на **рисунке 6**. Загружаемый файл программного обеспечения для Windows доступен для скачивания на моем Web-сайте.⁶

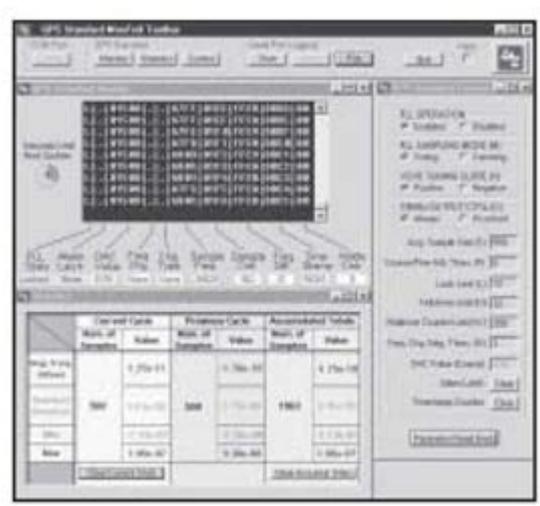


Рисунок 6 — Программное обеспечение для Windows GPS Standard MonTrol, предоставленное автором.

Результаты

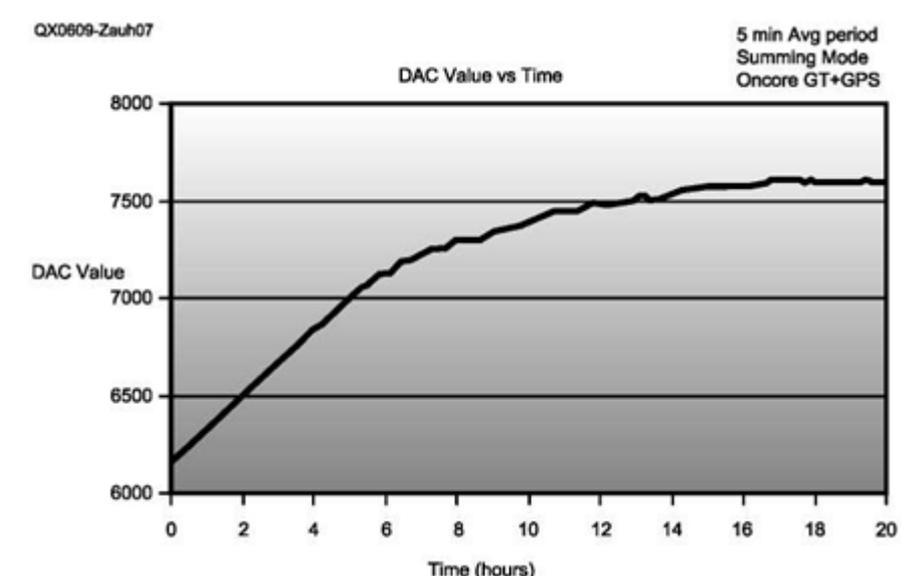


Рисунок 7 — Поведение DAC во время вхождения в синхронизм FLL.

На **рисунке 7** приведен график вхождения в синхронизм FLL. График иллюстрирует значение DAC VCXO, как функцию времени. Первоначально, значение DAC преднамеренно было установлено на 0.1 Гц ниже номинального значения, чтобы выделить процесс вхождения в синхронизм. Цикл усреднения между обновлениями значения DAC был установлен относительно короткий - 5 минут. Горизонтальная часть кривой указывает, что система достигла равновесия. При этих условиях система, как

полагают, является стабильной. Хотя, на данном этапе, конечная точность может быть еще не достигнута. Для достижения более высокой точности, необходимы более длительные циклы усреднения и более точные настройки DAC.

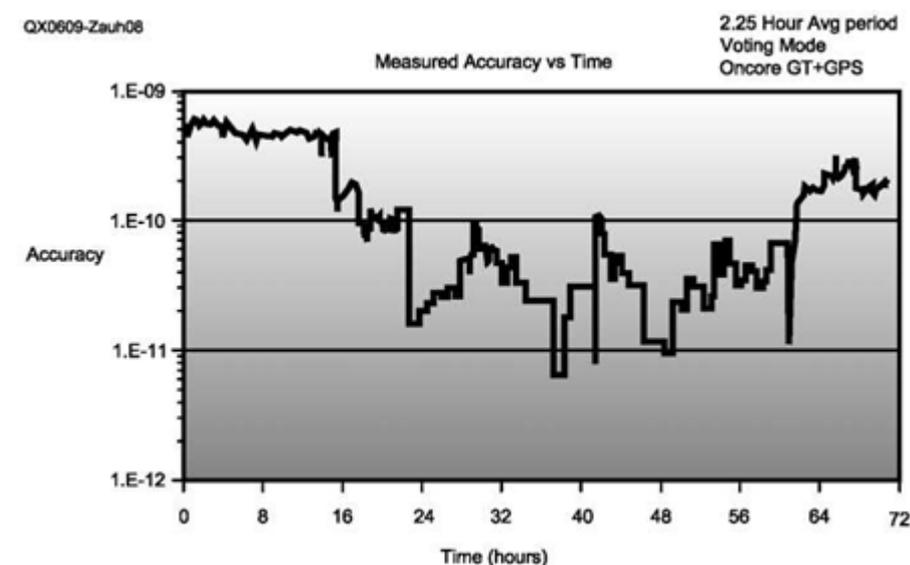


Рисунок 8 — Точность частоты в течение 72-часового периода.

На **рисунке 8** показана измеренная точность системы, как функция времени, в течение 72-часового периода. Эталон, который я использовал для этого сравнения, является радиостанция с атомными часами Canada's CHU.⁷ На графике показана точность частоты, как функция времени. Проанализировав график, можно прийти к заключению, что точность, подобная рубидию, может быть достигнута, но не может быть гарантирована. Это происходит из-за нескольких факторов. Некоторые из них - стабильность OCVCXO в течение долгого времени, напряжение, температура и вибрация. При съемке аналогичной атомной точности, малейшее нарушение на VCXO дает сдвиг частоты. Вот почему я считаю, что трудно получить точность лучше, чем 10^{-10} для систем, основанных на OCVCXO.

Заключение

Располагая старым корпусом, Вы сможете собрать этот высокоточный эталон 10 МГц менее, чем за 200 долларов США, включая стоимость VCXO и GPS приемника. Это составляет крошечную долю расходов на атомно-базируемые системы. Используя его, Вы также узнаете много о точности частоты, стабильности и соответствующих методах измерений. У Вас больше не будет сомнений относительно точности переданной Вами частоты или частоты, снятой Вами со счетчика!

Примечания

¹ В. Shera, W5OJM, "A GPS-Based Frequency Standard," QST, Jul 1998, p 37.

² Поддерживаемый мной Web-сайт, где я постоянно обновляю данные к проекту, подробное руководство пользователя, исходные файлы и дополнительные комментарии. Пожалуйста, посетите сайт www3.sympatico.ca/b.zauhar для получения дополнительной информации.

³ Обратите внимание на кварцевые генераторы HP10544A, HP10544-xxxxx, HP 10811A или HP 10811-xxxxx. Эти блоки отличаются один от другого по стабильности и диапазону настройки, но все они должны работать в нашей системе. Ориентировочная цена на eBay, приблизительно 80\$ за блок.

⁴ Новые GPS приемники, которые обеспечивают сигнал 1 pps, стоят на eBay менее 50\$. Это OEM версии без дисплея. На таких блоках параметры настройки вводятся через последовательный порт.

⁵ Я распространяю вытравленные "голые" печатные платы высокого качества для этого проекта. Если Вы интересуетесь покупкой печатной платы, то, пожалуйста, свяжитесь со мной через электронную почту. Я так же сделал файлы расположения монтажной платы, доступные, как файлы PDF, на моем Web-сайте. Распечатайте их в масштаб 1:1. Разводка сделана таким образом, что сигналы из одного слоя в другой передаются через выводы компонентов. В случае использования монтажной платы ручной работы все компоненты и связи должны тогда быть распаяны с обеих сторон платы.

⁶ Для тех из Вас, кто не может запрограммировать микроконтроллеры серии PIC18F, я предоставляю запрограммированные микроконтроллеры для покупки. Для получения дополнительной информации, пожалуйста, свяжитесь со мной через электронную почту.

⁷ Для измерения частоты я использую радиостанцию с атомными часами CHU на несущей частоте 14.670 МГц. Я, в основном, использую метод "ноль-биений" генератора 10 МГц, с выключенным входением в синхронизм от GPS, с эталоном CHU от коротковолнового приемника. По длительности между двумя сигналами "ноль-биений", я вычисляю разность частот. Я вычисляю погрешность по следующей формуле:

$$\text{Точность} = 1 / (T_{\text{null-null}} \times 14.67 \times 10^6).$$

Национальный исследовательский совет Канады поддерживает трое атомных часов, и несущая частота CHU является производной от них. Несущая частота гарантирует точность 5×10^{-12} или лучше. Мне повезло, что я живу приблизительно в 15 км от передатчиков. С таким небольшим расстоянием от-станции-к-станции, способ распространения волны по земле и, несомненно, по поверхности. Так как поверхностное распространение волны очень устойчиво (без фазовых искажений), я могу считать полученную несущую частоту (и фазу) CHU практически такой же хорошей, как в 5×10^{-12} , что гарантирует антенна, и, по крайней мере, на порядок лучше, чем уровень точности, который я пытаюсь измерить.

Bertrand Zauhar радиоловитель с позывным VE2ZAZ с 1984г. Он имеет расширенную любительскую лицензию. Bertrand проектировал для хобби среди других разработок, передатчик конвертер L-диапазона (Amsat Journal, May/June 2003), предварительный делитель частоты на 1 - 12 ГГц, базируемый на микропроцессоре контроллер ретранслятора, несколько любительских спутниковых антенн и RF-чувствительная сигнализация (73-Amateur Radio, May 1998). Bertrand получил свой диплом инженера электроники в 1989 от Ecole Polytechnique de Montreal. С тех пор его профессиональная техническая карьера была сделана на фирме Nortel в Монреале и Оттаве. В настоящее время он инженер-конструктор аппаратных средств электроники на оборудовании оптической связи.

Таблица 2.

Перечень элементов.

Обозначение компонента	Характеристики	Part Number
C1-C5, C9-C16	0.1 мкФ, 10 В или выше, радиальный	Digikey: 478-2472-ND or equiv.
C17	Переключатель для 0-5-В настраиваемого диапазона VCXO.	
	0.1 мкФ, 10 В или выше, радиальный для некоторых других диапазонов. См. текст.	Digikey: 478-2472-ND or equivalent.
C6, C7	1 мкФ, 10 В или выше, радиальный	Digikey: 478-2479-ND or equiv.
C8	10 мкФ, электролитический, 25 В или выше	Digikey: P1176-ND or equiv.
D1	Двухцветный (Зелено-Красный) светодиод, два светодиода.	Digikey: MV6461A-ND or equiv.
D2	Зеленый светодиод	Digikey: MV5477C-ND or equiv..
JP1	1 x 3 штыря, интервал 0.1 inch, один компьютерный джампер.	Digikey: S1012-36-ND. Cut to size, or equiv.
JP2	Переключатель. Выбирает положительное питание операционного усилителя. См. текст.	
JP3	Переключатель. Добавляет смещение -5В. См. текст.	
R1	51 Ом, % W, аксиальный. Дополнительный. См. текст.	Digikey: P51BACT-ND or equiv.
R2, R6	47 кОм, % W, аксиальный	Digikey: P47KBACT-ND or equiv.
R3, R9	470 Ом, % W, аксиальный	Digikey: P470BACT-ND or equiv.
R4, R5	100 кОм, % W, аксиальный	Digikey: P100KBACT-ND or equiv.
R7	Дополнительный, не устанавливается для 0-5-В настраиваемого диапазона VCXO. См. текст.	
R8	Переключатель для 0-5-В настраиваемого диапазона VCXO. См. текст.	
U1	Linear Technology LTC1485, DIP-8 package	Digikey: LTC1485CN8-ND.
U2	74HC390, DIP-16 package	Digikey: 296-9199-5-ND.
U3	MC3487, DIP-16 package	Digikey: 296-1408-5-ND.
U4	Microchip PIC18F2220, DIP-28/0.3 inch package, программируется	Digikey: PIC18F2220-I/SP-ND.
U5	Texas Instruments OPA2705, DIP-8 package	Digikey: OPA2705PA-ND.
VR1	7805 Voltage Regulator, TO-220 package	Digikey: LM7805CT-ND.
Панельки (Sockets) для:		
U1, U5	IC Socket, 8-pin, 0.3 inch spacing, low profile, необязательно	Digikey: ED3108-ND or equiv.
U2, U3	IC Socket, 16-pin, 0.3 inch spacing, low profile, необязательно	Digikey: ED3116-ND or equiv.
U4	IC Socket, 28-pin, 0.3 inch spacing, low profile, рекомендуется	Digikey: ED3128-ND or equiv.
Теплоотвод для VR1	TO-220 компактный теплоотвод, рекомендуется	Digikey: HS107-ND or equiv.



Фотография А — Собранная в корпусе система эталона частоты. Модуль в левом верхнем углу - плата GPS. Модуль слева внизу - плата контроллера FLL, а управляемый термостатированный кварцевый генератор находится справа внизу. Конвертер RS232 с обвязкой находится на плате наверху в центре. В верхнем правом углу регулятор на 8 В, и вход DC с держателем плавкого предохранителя.



Фотография В — Эта фотография показывает подключение эталона частоты с управлением по GPS к частотомеру НР.