Автор: Yuri A. Murashev
14.06.2008 23:00 - Обновлено 27.02.2012 20:37

Юрий, RX3AEW
Зачем все делалось и делалось именно так…

Места творчеству для радиолюбителей становится все меньше – это стоит признать. Все меньше людей могут понять романтику живого общения сквозь треск эфира. Технологии сухие и безжалостные, но обличенные в форму одной простой кнопки, порождают лень, убивающую творчество.
Но поиск приключений на свою голову не истребить в радиолюбительской среде. Появилось много нового в радиотехнике за последнее время, и постепенно схемные решения уходят за рамки любительской квалификации в сторону профессиональной схемотехники, особенно в области связи. Цифровые технологии неумолимо теснят аналоговые во многих областях, и надо стараться идти в ногу со временем.
Предлагаемая Вашему вниманию конструкция носит экспериментальный характер и предназначена, прежде всего, для тех, кто начинает осваивать современные микроконтроллеры.
При разработке этого трансивера я придерживался следующих принципов:

1. Максимальная простота конструкции;
2. Повторяемость;
3. Минимум наладки с аналоговыми приборами;
4. Минимум деталей;
5. Невысокая стоимость, доступность компонентов;
6. Максимально возможное использование узлов микроконтроллера.

В основу конструкции лег микроконтроллер Atmega 8535 производства компании Atmel. Это распространенные, дешевые и простые в программировании контроллеры вполне подходят для старта и отработки цифровых функциональных блоков.
Трансивер можно использовать для экспериментов с различными алгоритмическими реализациями цифровых узлов. Он не задумывался как законченная конструкция, поэтому в нем минимум функций. Основная цель – не пытаться повторить выпускаемые промышленностью аналого-цифровые аппараты, а создать модель для понимания работы цифровой техники связи и обработки сигналов. Поэтому здесь не приводятся технические характеристики конструкции (чувствительность, избирательность и т.д.) – в них нет ничего выдающегося. Программный код прост и доступен для понимания начинающим программистам. Он не предназначен для действий «запрограммировал-забыл», а скорее «запрограммировал-разобрался-улучшил». Потому и назван этот проект трансивера «Полигон».

Что нового в конструкции?
Не имея возможности построить на выбранном микроконтроллере полнофункциональный SDR (Software-Designed Radio, полностью цифровой радиотракт) здесь использовано гибридное решение – радиосигнал преобразуется в сигнал звуковой частоты в гетеродинном приемнике, а далее обрабатывается микроконтроллером. Для приема радиосигналов использована простая схема приемника прямого преобразования на ИС К174ХА2, предложенная Владимиром Тимофеевичем Поляковым («Радио», №12, 1997г., стр.34). Техника прямого преобразования проста, но при правильном

использовании очень эффективна. Благодаря именно простым схемам она стала стартовой площадкой для целого поколения радиолюбителей. Сейчас есть возможность существенно усилить разработанные когда-то решения современными технологическими достижениями и вернуть трансиверам прямого преобразования новизну и привлекательность.
Что нового и оригинального в конструкции? Вот несколько особенностей:
1. В трансивере всего три микросхемы – стабилизатора напряжения, приемника и микроконтроллера (а всего около 60 деталей);
2. На микроконтроллере реализованы: узкополосный ФНЧ, автоматический ключ, гетеродин с цифровой перестройкой частоты (не путать с цифровым синтезатором частоты) и АПЧ.
3. Гетеродином служит тактовый генератор микроконтроллера, работающий на частоте 14 МГц. Это главное, ужасающе-кощунственное с точки зрения цифровой техники решение. Но оно упростило конструкцию и прекрасно работает! Вспомним, что цифровая техника – это только частный случай аналоговой, так что изменение в пределах 0,5% задающей частоты микроконтроллера вполне допустимо. Критически-важные процессы, жестко привязанные ко времени (такие, как оцифровка звукового сигнала), тактируются отдельным 32кГц-генератором, реализованным тут же, в микроконтроллере.
4. В трансивере использовано два колебательных контура (один из них П-контур включен всегда, а в режиме приема подключается еще параллельный колебательный контур), а использование перестраиваемого кварцевого гетеродина позволяет настроить его без использования ВЧ-генератора.
5. Для наладки устройства из измерительных приборов требуется тестер, ВЧ-вольтметр, нагрузка 50 Ом. Крайне желателен также контрольный приемник.
6. Трансивер легко превратить в однополосный телефонный трансивер, а при некотором усложнении - сделать его многодиапазонным. Тактовая частота 14 МГц, так что только перенастроив входные фильтры можно легко создать конструкцию на диапазоны 20, 40, 80, 160 м не меняя номинала кварцевого резонатора (но следует учесть, что на частотах выше 10 МГц характеристики К174ХА2 ухудшаются).
7. Также легко можно добавить цифровую регулировку усиления по НЧ и шумоподавление (опять же без изменения схемы).
Определенно, этот микротрансивер относится к «конструкциям выходного дня», практически не требующим наладки и «будучи правильно собранным, работающим сразу после включения», но его функциональность позволяет провести много интересных экспериментов.
Конструкция позволяет перейти на однополосный прием, где выделенные ВЧ-фазовращателем квадратурные сигналы подаются на цифровой НЧ-фазовращатель, реализованный все в том же микроконтроллере, а также реализовать (почти без изменения схемы!) режим передачи телефоном. Об этом – в последующих статьях.
Цифровая шкала и управление через меню усложняют ПО, поэтому они не реализовывались. Повторюсь – основная цель этой конструкции – простая реализация цифровых узлов приемно-передающего тракта, отработка собственных алгоритмов и фрагментов кода. То есть это - полигон с минимальным набором функций, открывающий широкие возможности для экспериментов на пути к пониманию работы SDR.

Структурная схема
Функциональная блок-схема трансивера приведена на рис.1
В режиме приема входной сигнал радиочастоты подается с антенны на антенный коммутатор (реле), и далее – на П-контур и одноконтурный полосовой фильтр ПФ. После этого отфильтрованный сигнал проходит тракт преобразования на микросхеме К174ХА2, включающий усилитель высокой частоты (УВЧ), балансный смеситель, фильтр низкой частоты (ФНЧ) на простейшей интегрирующей RC-цепи, и усилитель низкой частоты (УНЧ). Роль гетеродина выполняет сигнал генератора тактовой частоты микроконтроллера, прошедший через делитель. Сигнал с него подается на смеситель приемного тракта.
После УНЧ К174ХА2 сформированный и усиленный НЧ-сигнал подается на коммутатор, отключающий последующие узлы от приемного тракта в режиме передачи. Далее, принимаемый сигнал подается на узкополосный фильтр низкой частоты (УФНЧ) с возможностью цифрового усиления сигнала. УФНЧ представляет собой два последовательных фильтра с конечной импульсной характеристикой (FIR - Finite Impulse Response) 30-ого порядка. Затем, отфильтрованный сигнал поступает на дополнительный простой ФНЧ в виде RC-цепи, и, наконец, – на высокоомные головные телефоны. Используемый микроконтроллер не имеет встроенного цифро-аналогового преобразователя, но имеет три независимых таймера с функцией управляемых генераторов ШИМ, что позволяет создать ЦАП. Один генератор ШИМ используется для формирования выходного звукового сигнала, второй – для формирования сигнала перестройки по частоте и автоподстройки частоты ГПД. Третий таймер используется как тактовый генератор выборки сигнала и других привязанных ко времени процессов. Тактовый генератор микроконтроллера работает на частоте 14,308 МГц (с учетом сдвига частоты резонатора LC-цепочкой, сам резонатор возбуждается на 14,320 МГц). Встроенный программируемый делитель выдает сигнал требуемой частоты (14,308/4=3,577 МГц – частота, используемая для «круглых столов» и проведения соревнований клубом RU-QRP). В качестве частотозадающего элемента используется один керамический резонатор, нагруженный емкостью варикапа и дополнительной индуктивностью. При изменении выходного сигнала перестройки частоты от 0 до 5В, частота изменяется в пределах 3,567-3,587 МГц.
Перестройка частоты гетеродина осуществляется при помощи двух кнопок «частота вверх» и «частота вниз» - при удержании одной частота ГПД плавно возрастает, другой - плавно уменьшается. Отсутствие ручки «Настройка» позволяет еще боле упростить конструкцию трансивера и увеличить стабильность работы ГПД. Автоподстройка частоты ГПД работает следующим образом: таймер 32кГц обеспечивает подсчет импульсов тактового генератора 14МГц за равные промежутки времени (около 0,2мс); если число импульсов отличается от зафиксированного при перестройке, блок АПЧ корректирует сигнал перестройки частоты соответственно произошедшему смещению. Коррекция происходит с частотой 5кГц, т.е. практически непрерывно. При перестройке частоты ГПД, АПЧ не препятствует изменению частоты, поскольку устанавливаемая частота служит внутренней уставкой АПЧ и этот блок отслеживает только смещение частоты относительно установленной в результате перестройки.
Переключение режимов приема и передачи осуществляется автоматически при нажатии на телеграфный ключ, обратный переход из режима передачи в прием осуществляется при отсутствии нажатий на ключ в течение заданного времени (в приведенной

программе около 1 с).

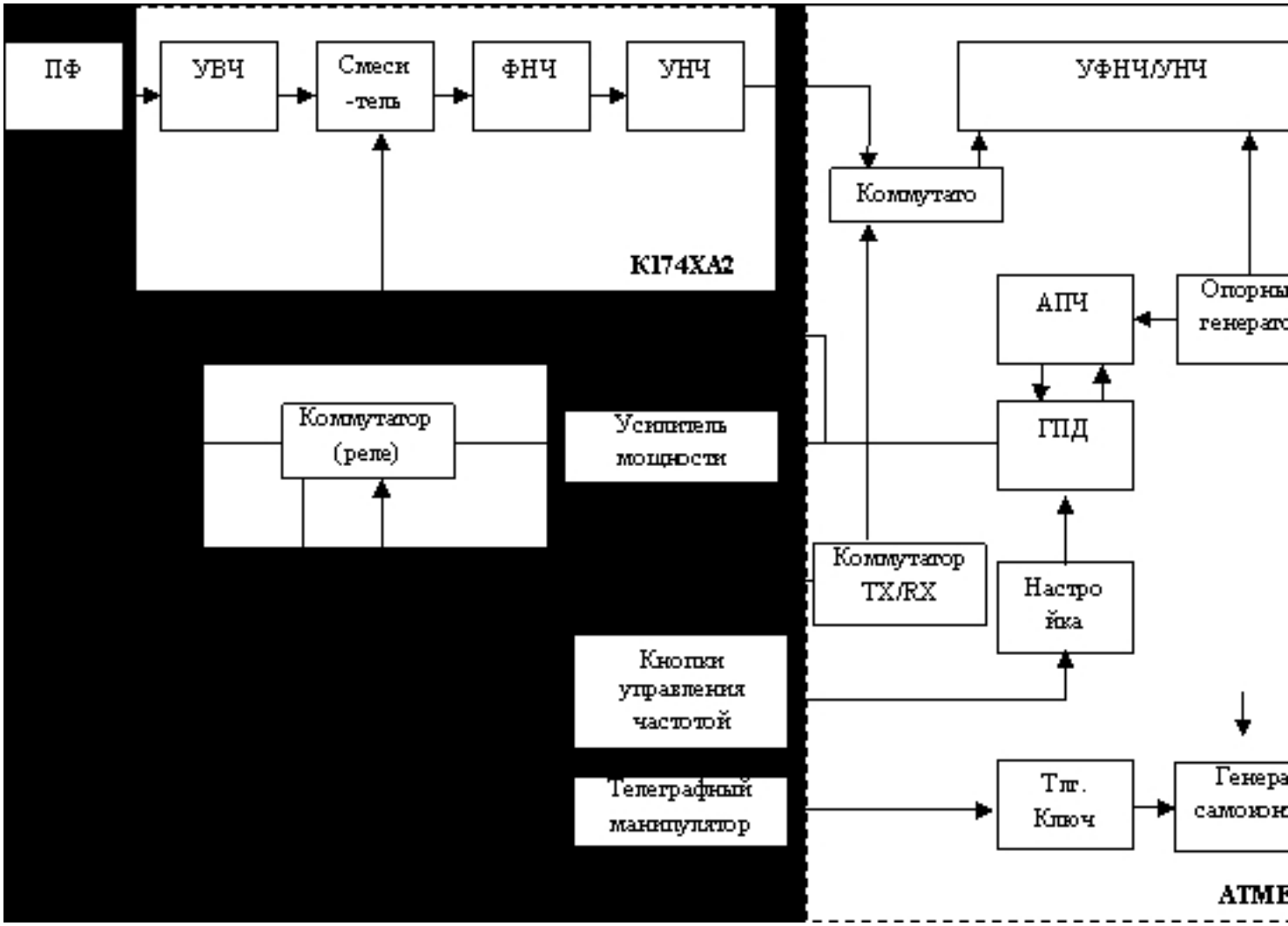


Рис. 1 Функциональная блок-схема QRP ТПП «Полигон»

В режиме передачи сигнал ГПД подается с делителя частоты микроконтроллера на усилитель мощности на одном полевом транзисторе. Манипуляция ГПД осуществляется программным полуавтоматическим телеграфным ключом, управляемым телеграфным манипулятором. На головные телефоны в режиме передачи подается сигнал с генератора самоконтроля. Антенный коммутатор кроме переключения антенны коммутирует также и питание выходного каскада передатчика. Чтобы не происходило подгорания контактов реле, в алгоритме коммутации предусмотрен защитный временной интервал длительностью в одну «точку», который позволяет сначала сработать реле, а уже затем подать ВЧ сигнал на вход усилителя мощности.
В режиме передачи АЦП остановлен.

Принципиальная схема

На рис.2 приведена электрическая принципиальная схема микротрансивера. Большинство номиналов элементов некритично (кроме номиналов колебательных

контуров). Питание конструкции подается с аккумулятора или сетевого источника питания с выходным напряжением 12…14В на анод диода VD1, служащего защитой от случайного изменения полярности питающего напряжения (очень актуально для полевых условий!). Напряжение с катода защитного диода (его тип не критичен, лишь бы он мог пропускать максимальный ток около 1,5 А) подается на микросхему стабилизатора DA2, обеспечивающую напряжение на выходе 5 В для питания DA2 и DA3, а также на дроссель L2 в цепи стока VT1 и на реле K1. Транзистор VT2 можно исключить из схемы, если использовать реле K1, срабатывающее при напряжении на обмотке 5В, тогда им можно управлять непосредственно с выхода микроконтроллера (драйверы его портов выдают в нагрузку ток до 30 мА), внеся инверсию в логику коммутации в программе.

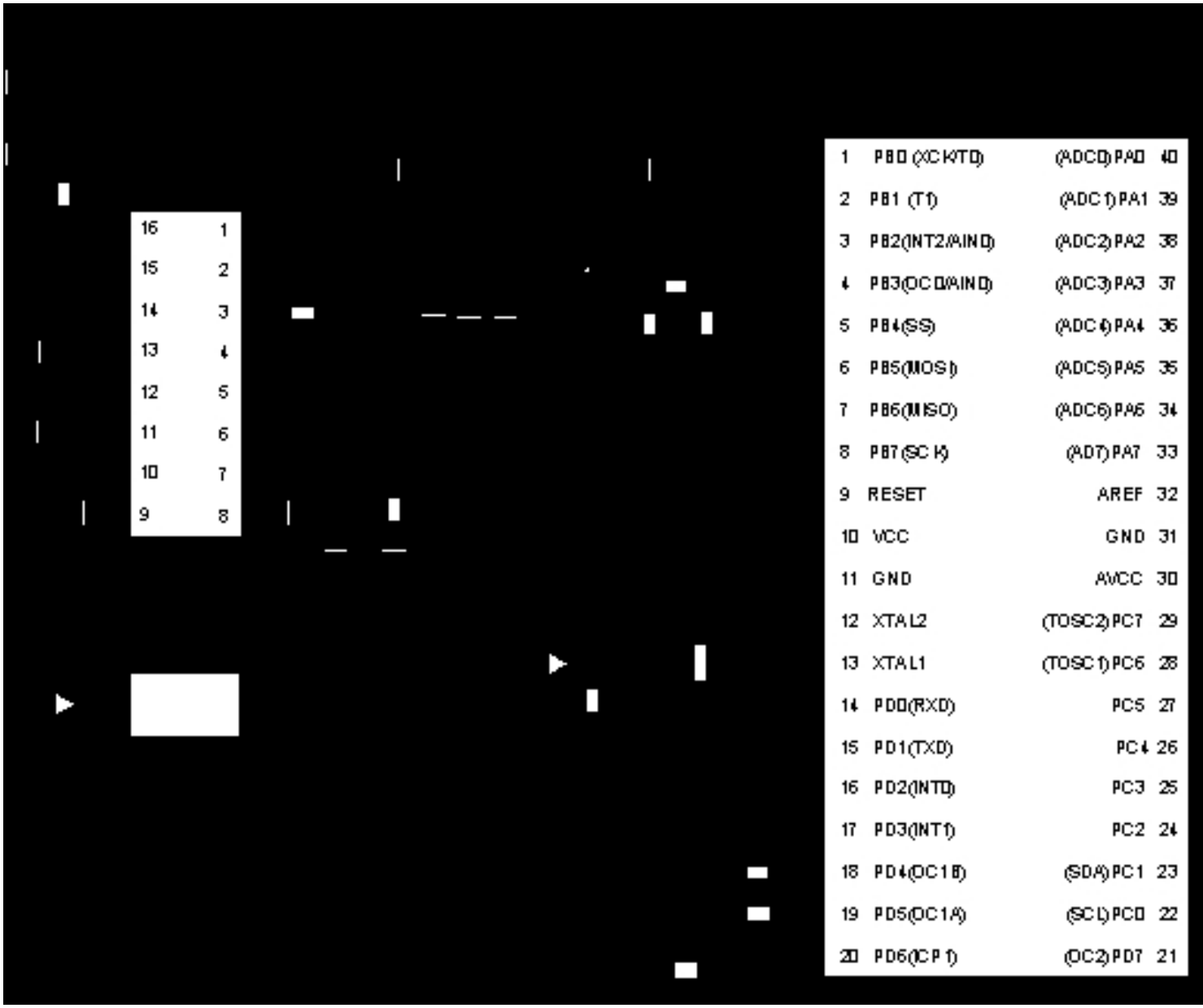


Рис. 2 Принципиальная схема QRP ТПП «Полигон»

Файл схемы в формате PDF

Следует обратить внимание, что микроконтроллер имеет два типа «земли» и «питания» - цифровую пару (VCC, GND) и аналоговую (AVCC, GND). Чем меньше связаны эти пары, тем лучше, поскольку помехи цифровых цепей через цепи питания и «землю» проникают на вход приемного тракта, снижая чувствительность приемника. Хорошим вариантом, видимо, будет трансформаторная гальваническая развязка цепей подачи сигнала гетеродина на смеситель приемника DA1 и усилитель мощности VT1, но этот вариант пока не апробировался. В отношении предела чувствительности можно сказать, что минимальный уровень слышимого сигнала составляет около 0,5 мкВ. Соединения между выводом 4 DA3, DA1 и VT1 следует выполнять экранированным кабелем для минимизации наводок в схеме. Аналоговая «земля» обозначена на схеме белым значком, цифровая – черным.

В режиме приема, с антенны сигнал поступает на П-контур, служащий для фильтрации сигнала и согласования выходного сопротивления усилителя мощности с сопротивлением антенны в режиме передачи. Через дроссель L2 в цепь П-контура подается питающее напряжение 12В, коммутируемое на сток VT1 при переключении в режим передачи. Конденсатор C4 служит для изоляции цепи антенны от постоянного питающего напряжения. Далее сигнал поступает через полосовой фильтр L3C12 на вход 1 микросхемы приемника DA1. Подробно конструкция приемного тракта рассмотрена в статье В.Т.Полякова «Приемник на одной микросхеме» («Радио», №12, 1997г., стр.34), поэтому останавливаться на ней не будем. Заметим лишь, что в отличие от оригинала, в данной схеме отсутствует гетеродинный контур, а ВЧ напряжение гетеродина (тактовая частота микроконтроллера, деленная на 4) после сглаживания цепочкой R5C17 подается на вывод 5 DA2.

Резистор R2 регулирует усиление по ВЧ DA1. Подача небольшого положительного напряжения на вывод 3 или отсутствие R2 ведет к резкому падению общего усиления тракта.

После преобразования в DA1, НЧ сигнал, выделенный на C19R7 после предварительной фильтрации R6C7, поступает на вывод 40 DA3 – канал «0» АЦП микроконтроллера. Остальные каналы коммутатора АЦП заземлены для снижения шумов.

Питание на аналоговую часть трансивера подается через фильтр L5C21.

Цепочка ZQ1L6VD2 задает тактовую частоту микроконтроллера и гетеродина трансивера. Управляющее напряжение подается на катод варикапа через резистор R8 с фильтра R9C26 генератора ШИМ. Этот генератор используется как для перестройки частоты гетеродина при нажатии на кнопки «частота вверх» и «частота вниз» (выводы 22, 23 DA3), так и для формирования сигнала АПЧ. При переходе в режим передачи, микроконтроллер автоматически производит отстройку частоты на 700 Гц (частота CW-фильтра приемника).

Телеграфный ключ подключен к выводам 14,15 микроконтроллера. Активированные при программировании внутренние «подтягивающие» резисторы обеспечивают высокий уровень напряжения на этих дискретных входах, т.е. нормальный уровень на них –

логическая «1». При замыкании на «землю», уровень на входе падает до логического «0», что обрабатывается программой соответствующим образом.

Выходной сигнал звуковой частоты выделяется фильтром R11C27C28BA1 из ШИМ второго генератора Таймера1 (вывод 19 DA3).

ZQ2 позволяет использовать Таймер2 DA3 в качестве опорного генератора для критически важных процессов обработки – выборки и фильтрации входного сигнала.

Светодиод VD4 служит для индикации работы при включении трансивера и в режиме передачи.

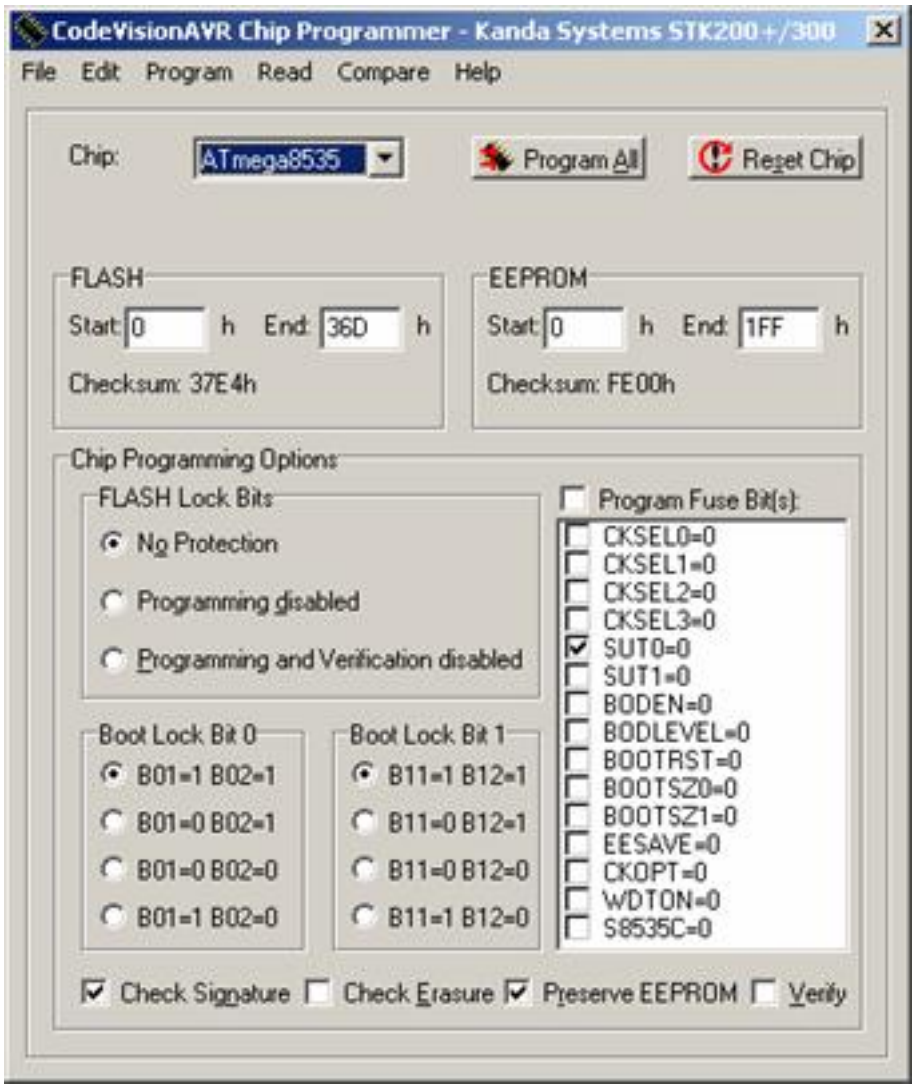
Катушка L1 намотана на каркасе диаметром 5 м без сердечника и содержит 30 витков провода ПЭВ0,3. Катушки индуктивности входного контура L3 и L4 намотаны на каркасе диаметром 5 мм с подстроечным сердечником, L3 имеет 25 витков, L4- 5 витков провода ПЭВ 0,3. Дроссель L6 намотан на каркасе диметром 5 мм с латунным сердечником и содержит 40 витков провода ПЭВ 0,3. Его индуктивность (стало быть, и количество витков) не критична, но не должна превышать 10 мкГн, иначе генератор DA3 не возбуждается. Чем больше индуктивность L5, тем больше будет диапазон перестройки. При указанных параметрах и диапазоне управляющего напряжения 0…5В, перестройка на 3,5 МГц составляет до 20 кГц, но отличается существенно нелинейной зависимостью частоты генерации от управляющего напряжения. В конструкции использовано реле типа РЭС49 с одной переключающей группой контактов, рассчитанное на напряжение переключения 12В.

В режиме передачи микроконтроллер формирует «паузу», давая возможность переключиться реле, а затем подает сигнал гетеродина на затвор транзистора VT1, работающего как усилитель мощности. Указанный на схеме транзистор развивает на нагрузке 50 Ом мощность около 1,5 Вт. При этом амплитуда напряжения на нагрузке, подключенной к антенному входу, составляет 12В. Подключение к антенне типа «длинный провод» осуществлялось через согласующее устройство MFJ-941E.
Программирование

Для того, чтобы запрограммировать микроконтроллер Atmega8536 16PU, необходим программатор (например, простейший «5 проводов» для LPT-порта ЭВМ) и среда программирования. Рекомендую начинать с Code Vision AVR, приведенный ниже код именно для него. Бесплатная версия, которую можно скачать здесь http://www.hpinfotech.ro/cvavre.zip
имеет ограничения, не существенные для данного проекта. Тем, кто первый раз сталкивается с микроконтроллерами, очень рекомендую прочитать Интернет-самоучитель
http://123avr.nm.ru/.
Очень легко читать, масса полезных ссылок! Тем, кто знаком с языком программирования С и общей архитектурой микроконтроллеров (описание МК ATmega8535 можно найти по адресу
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2502.pdf

), можно начать с седьмой главы
http://avr123.nm.ru/07.htm
, где рассказывается, как за 5 минут сделать программатор и настроить CodeVisionAVR.

Внимание! Будьте осторожны с фьюзами! Фьюз – это бит (флаг), позволяющий сконфигурировать работу отдельных узлов микроконтроллера на этапе программирования. После завершения программирования в процессе работы программы эти биты недоступны. Опасность их использования кроется например в том, что можно выбирать тип тактового генератора. Если выбранный тип не соответствует воплощенному в схеме, то микроконтроллер не стартует, пока не будет реализована схема, соответствующая конфигурации фьюзов. Прочитайте внимательно их описание в datasheet и упомянутом выше учебнике. В проекте «Полигон» использованы следующие настройки фьюзов (в правом нижнем углу формы, установки фьюзов соответствуют кварцевому тактовому генератору):



Помните – фьюзы самостоятельно лучше не трогать до тех пор, пока с ними полностью не разберетесь!

Код программы в основном написан на языке С, но процедура цифровой фильтрации

написана на Ассемблере, поскольку требует высокой скорости работы – она должна успевать выполняться между выборками входного сигнала, которые происходят с частотой 3 кГц.

Ниже приводится полный код микропрограммы, он содержится в одном файле и после компиляции CodeVisionAVR занимает около 1700 байт в памяти микроконтроллера.

Файл архива проекта программы.

Этот код может быть скопирован во вновь создаваемый проект CodeVisionAVR, скомпилирован и загружен в микроконтроллер «Полигона». Папка с проектом должна размещаться в той же директории, куда установлен CodeVisionAVR. При компиляции CVAVR выдает четыре предупреждения (warnings), они связаны с тем, что часть переменных находится в ассемблерном коде и не видна компилятору, а часть переменных зарезервирована под дальнейшее развитие проекта. Не нужно обращать внимания на эти предупреждения компилятора, на работе программы это не сказывается.

Наладка

При первом включении рекомендую отключить выход DA2 от остальной схемы и убедиться, что на выходе стабилизатора присутствует напряжение 5В. После этого можно подавать питание на DA1 и DA3. Питание выходного каскада на VT1 через L2 лучше отключить во время настройки во избежание случайного выхода на передачу в отсутствие антенной нагрузки.

Внимание! Перед программированием микроконтроллера отключайте питание трансивера, после этого подсоединяйте программатор, и лишь затем подавайте питание снова! После окончания программирования, сначала снимите питание со схемы, затем отсоедините программатор, только после этого опять включайте трансивер. Не ленитесь это делать каждый раз, если не имеете программатора с гальванической развязкой, иначе можно вывести из строя LPT-порт ЭВМ или соответствующие линии микроконтроллера!

Если все правильно собрано и скомпилировано – конструкция начнет работать, надо лишь настроить входные контура.

При включении питания трансивера светодиод VD4 должен моргнуть. Если этого не произошло, значит, микроконтроллер не запустился. Можно попробовать временно исключить из схемы варикап и дроссель L6, замкнув начало и конец этой LC-цепи.

Для контроля работы DA3, можно прикоснуться пинцетом к выводу 40 микроконтроллера – в головных телефонах должен прослушиваться фон наводки 50 Гц. Если так, значит, микропрограмма работает и все в порядке. Можно также, отсоединив выход DA1, и подав напряжение на вход 40 АЦП DA3 с генератора звуковой частоты, снять АЧХ фильтра микроконтроллера.

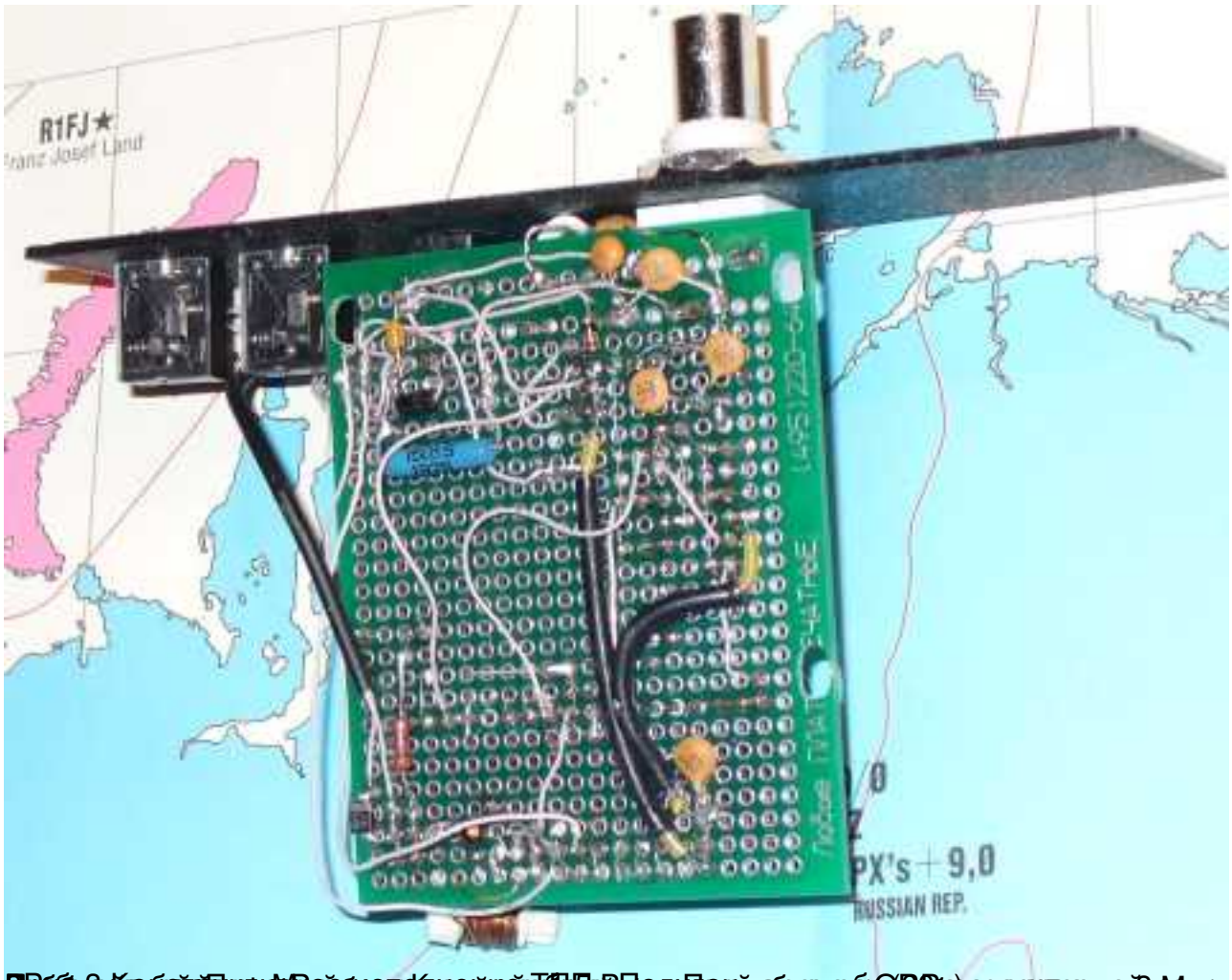
После того, как разобрались с трактом НЧ, можно настраивать тракт ВЧ. На выводе 4 DA3 при нормальной работе присутствует меандр частотой около 3580 МГц. Чудес здесь не бывает – если микроконтроллер работает с указанным на схеме кварцем, значит частота на выводе 4 также имеет нужный номинал. Можно использовать сигнал гетеродина для настройки входных контуров, подав его с выхода цепочки R5C17 на антенный вход приемника и измеряя ВЧ напряжение на контуре L3C12. Перемещением сердечника катушки L3 или подбором емкости конденсатора C12 нужно добиться максимального значения ВЧ напряжения на этом контуре.

Теперь можно подключить нагрузку 50 Ом к антенному входу, подключить к ней ВЧ вольтметр, подать напряжение на выходной каскад через L2 и нажать на ключ. Амплитуда ВЧ напряжения должна быть около 12В, соответственно при нажатии на «тире» ВЧ вольтметр должен показывать около 8В.

Не переходите в режим передачи без согласованной антенны или антенной нагрузки!

Конструкция

Предложенная схема была воплощена в небольшой конструкции полевого микротрансивера.
Для экспериментов удобнее использовать ATMega8535 в корпусе DIP40 – он имеет стандартное для макетных плат расположение выводов через 2,5 мм, что удобно и для ручной пайки. Печатная плата специально не разводилась, межэлементные соединения сделаны расплетенными жилами из многожильного монтажного провода, а также проводом МГТФ (в основном разводка питания и соединения с разъемами) и коаксиальным кабелем. Для монтажа использовались компоненты для поверхностного монтажа (SMD), за исключением электролитических конденсаторов, микросхем, кварцевых резонаторов. Все уместилось на макетной плате из текстолита 75x60 мм. На фото кнопки управления частотой еще не вынесены на переднюю панель, а размещаются на самой плате.



[redacted] ote