

Высококачественный КВ трансивер с цифровой обработкой сигнала T03DSP

Разработан и изготовлен Скидан О.В. UR3IQO



Данный трансивер является попыткой приблизить уровень самодельных конструкций к уровню выпускаемых зарубежных трансиверов (TS870S, IC756PRO/PROII и подобных [1,2]).

При разработке трансивера ставилась задача создать конструкцию, которая предоставляла бы уровень сервиса и параметры на уровне трансиверов высокого класса (FT2000, IC756PROII). С самого начала проектирования аппарата было решено широко использовать современные технологии. В частности было очевидно, что попытки достичь желаемый уровень сервиса с традиционным (аналоговым) главным трактом приема (ГТП) привели бы к рождению настоящего «монстра». Многократное преобразование частоты с использованием нескольких высококачественных кварцевых и электромеханических фильтров, несколько синтезаторов частоты (для первого, второго и т.д. гетеродинов) – это методы, которыми достигались параметры и сервис в конструкциях с полностью аналоговым ГТП (трансиверы IC-781, FT1000). Понятно, что изготовление подобной конструкции в любительских условиях практически невозможно. Поэтому после анализа множества схем импортных трансиверов было решено остановиться на схеме с использованием цифровой обработки сигнала на низкой ПЧ (такие принципы используются в трансиверах Icom серии «PRO» и IC-7800, FT2000, Kenwood TS870/TS2000, Ten-Tec Orion и ряде других). Преимущества этой концепции состоят в оптимальном использовании сильных сторон как аналоговой, так и цифровой обработки сигнала. Аналоговая схемотехника используется во входных цепях с целью достижения высоких динамических параметров, здесь аналоговая схемотехника пока вне

конкуренции. Основная обработка сигнала производится на низкой ПЧ с помощью цифрового процессора. Здесь применение цифровой обработки позволяет реализовать фильтры ПЧ, систему АРУ и ряд других «узлов», с параметрами не достижимыми для аналогового мира, и, кроме того, возможности введения различных сервисных удобств практически не ограничены.

Разработку данной конструкции я начал еще в 2001 году, а провел первую связь на нем в 2003 году. С тех пор трансивер постоянно совершенствуется, причем это касается как программного обеспечения (ПО), так и «железа». Работа не прекращается и сейчас – последние изменения (новый блок DSP и новая передняя панель с новым блоком управления) были сделаны специально к данному конкурсу, чтобы улучшить технические параметры и эргономику трансивера. Также есть планы по увеличению выходной мощности до 50-100Вт, улучшению шумовых параметров синтезатора, применению одного высокостабильного опорного генератора, и, конечно же, по дальнейшему развитию ПО трансивера (прием/передача PSK31, дополнительные DSP фильтры и т.д.).

При проектировании «железа» этого трансивера я старался по возможности использовать как можно более простую схемотехнику (но не в ущерб параметрам!), перекладывая максимум функций на плечи программного обеспечения и применяя современные компоненты.

В результате на сегодняшний день трансивер имеет следующие параметры:

Таблица 1. Параметры трансивера

Диапазоны	160m, 80m, 40m, 30m, 20m, 17m, 15m, 12m, 10m
Минимальный шаг перестройки частоты	0.25 Hz
Импеданс антенны	50 Ohm
Виды работы	USB, LSB, CW, AFSK, RTTY
ПЧ	1-я ПЧ=4.976MHz, 2-я ПЧ=24kHz
Дисплей	Графический ЖКИ 128x64 точек, желто-зеленая светодиодная подсветка
Источник питания	13.8V
Размеры	290mm x 300mm x 150mm (ШxГxВ)

Таблица 2. Параметры приемного тракта (диапазон 20м)

	УВЧ откл.	УВЧ вкл.
Коэффициент шума	12 dB	7dB
IMD3 DR @ 20kHz разнос, 2.4kHz полоса	111 dB	-
IP3 @ 20kHz разнос	+42 dBm	+30 dBm
IP3 @ 10kHz разнос	+41 dBm	-
IP3 @ 5kHz разнос	+38 dBm	-
IP3 @ 2kHz разнос (два сигнала в полосе пропускания фильтра первой ПЧ)	+32dBm	-
Фазовый шум приемного тракта		
2kHz расстройка	- 120 dBc/Hz	
5kHz расстройка	- 128 dBc/Hz	
10kHz расстройка	- 133 dBc/Hz	
20kHz расстройка	- 136 dBc/Hz	
40kHz расстройка	- 142 dBc/Hz	
Параметры АРУ		
Система АРУ	Полностью цифровая, с управлением "вперед"	

Диапазон регулирования	108 dB
Время задержки АРУ (программируемое)	0.02-5.00 s (шагами по 0.02 s)
Время заряда	1 ms
Глубина АРУ (программируемая)	0dB, 3dB, 6dB, 12dB, 20dB
IMD в полосе пропускания	Менее -60 dB (для S9 и S9+40dB сигналов в любом режиме АРУ)
Параметры фильтров DSP	
Полоса пропускания	От 100Hz до 3000Hz шагами по 50Hz
Коэффициент прямоугольности	От 1.04 (полоса 3000Hz) до 2.48 (полоса 100Hz)
Ручной режекторный фильтр	Регулируемая полоса режекции 60...350Hz @-6dB шагами по 10Hz (30Hz@-60dB/60Hz@-6 dB; перестраиваемый адаптивный LMS фильтр). Реализован режим слежения за перестройкой частоты.
Автоматический режекторный фильтр	Модифицированный адаптивный NLMS фильтр
Адаптивное подавление шумов	Адаптивный автокорреляционный фильтр (регулируемая "длина" автокорреляционной функции, регулируемый уровень шумоподавления с передней панели)
Подавитель импульсных помех	Реализован в DSP, регулируемый порог и длительность бланкирующего импульса
Регулировка тембра (ВЧ/НЧ)	-6dB..+6dB шагами по 1dB

Таблица 3. Параметры передатчика

Выходная мощность	20W (без ограничения времени работы)
IMD3	см. рис. 1, 2
Форма телеграфного сигнала	Регулируемая длительность фронта и спада от 2 до 8 мс, см. рис. 3, 4

Таблица 4. Прочее

Автоматический телеграфный ключ (встроенный)	
Скорость	10-60 WPM
Память	12 сообщений, до 55 символов каждое
Самоконтроль	Чистая синусоида, регулируемая частота от 150Hz до 1500Hz шагами по 5 Hz
Соотношение точка/тире	регулируемое от 1:2.5 до 1:4.5 шагами по 0.25
Другие возможности	Автоматическая генерация контрольного номера, 5 вариантов сокращенных цифр в контрольном номере, программируемое изменение скорости передачи
Многофункциональный прибор	
Аналоговый	RX:S-метр, TX: Выходная мощность, КСВ и уровень компрессии (по выбору)
Цифровой	RX:S-метр и калиброванный измеритель мощности входного сигнала TX: Выходная мощность, КСВ и уровень компрессии (одновременно)

Другие возможности
Часы реального времени на 24h (резервное питание от ионистора)
30 каналов памяти с короткими комментариями
5 перестраиваемых каналов "быстрой" памяти
Тройной диапазонный стековый регистр
АПЧ и индикатор настройки в RTTY режиме
Возможность передачи RTTY и CW с подключаемой АТ-клавиатуры
Регулируемый шумоподавитель, реагирующий на голос в SSB режиме
CAT система, совместимая с системой команд Kenwood
Встроенный двухтональный генератор для проверки передающей части

В трансивере реализован полный набор всех сервисных функций, присутствующих в современных аппаратах высокого класса.

Динамические параметры трансивера были измерены по методике описанной в [3] с использованием двух генераторов Г4-158. Шумовые параметры измерены с помощью генератора с кварцевым фильтром на выходе. Для измерения линейности передающего тракта использовался приемник к выходу которого был подсоединен компьютер с программой анализатора спектра. На рис.5 приведена структурная схема трансивера. Штрихпунктирными линиями выделены конструктивно законченные узлы. Структурную схему трансивера можно разделить на четыре части – ВЧ блоки, НЧ блок и процессор цифровой обработки сигнала, блок гетеродинов, управляющие блоки. Трансивер имеет совмещенный тракт приема-передачи. Диапазонные полосовые фильтры (ДПФ), первый смеситель, 1-й кварцевый фильтр 1-й ПЧ, синтезатор частоты первого гетеродина, второй гетеродин, блоки управления и блок цифровой обработки сигнала являются общими.

Приемный и передающий тракты построены по схеме с двойным преобразованием частоты. Первая ПЧ определена имевшимися в наличии кварцевыми резонаторами (хорошего качества) и равна 4.976МГц. Вторая ПЧ равна 24кГц. На второй ПЧ сигнал оцифровывается АЦП и обрабатывается процессором цифровой обработки сигнала (при работе на передачу сигнал второй ПЧ формируется цифровым процессором и преобразуется в аналоговую форму с помощью ЦАП).

Рассмотрим прохождение сигнала в режиме приема. Сигнал с одной из антенн (коммутируемых реле в блоке А1) через переключатель прием-передача и отключаемый аттенюатор попадает в блок ДПФ (А2). В блоке ДПФ используются девять трехконтурных ПФ – по одному на каждый любительский диапазон. К выходу блока ДПФ подключен отключаемый УВЧ (А3) с коэффициентом усиления около 10дБ.

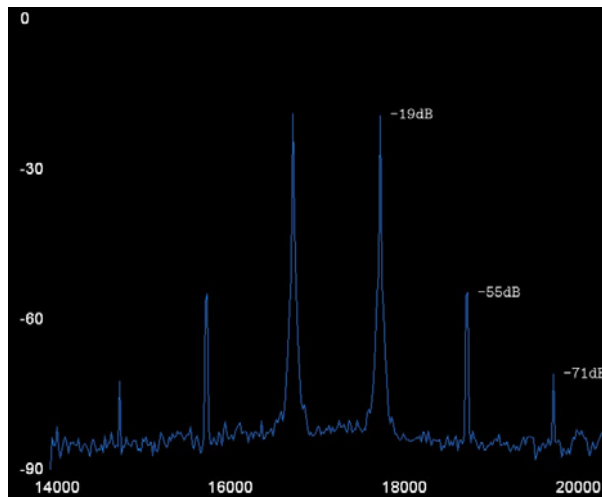


Рисунок 1 Выходной спектр передатчика при испытании двухтоновым сигналом и выходной мощности 10Вт

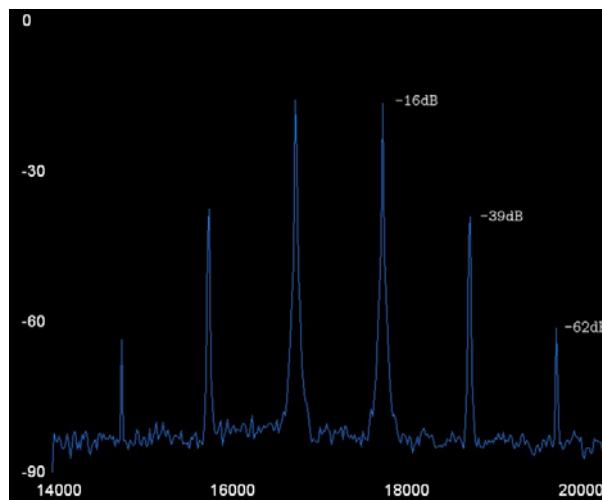


Рисунок 2 Выходной спектр передатчика при испытании двухтоновым сигналом и выходной мощности 20Вт

С выхода УВЧ сигнал поступает в блок А4 на балансный пассивный ключевой смеситель, нагруженный на диплексор и четырехкристальный кварцевый фильтр. Этот фильтр выполняет две функции – подавление зеркального канала приема по второй ПЧ и предотвращение перегрузки усилителя 1-й ПЧ и второго смесителя мощными сигналами соседних станций. Полоса пропускания фильтра выбрана около 3кГц, так как работа ЧМ/АМ не предусмотрена, а использование узкополосного фильтра (в большинстве японских аппаратов используется фильтр первой ПЧ с полосой 15-20кГц) позволяет улучшить реальную избирательность при малых расстройках. При таком построении ГПП до первого селективного элемента (кв. фильтр 1-й ПЧ) имеется только один потенциально нелинейный элемент – первый смеситель (при отключенном УВЧ). Это упрощает получение высоких параметров по реальной избирательности. Однако подобное построение ГПП выдвигает высокие требования к качеству согласования всех узлов (для получения минимального затухания в «связке» ДПФ, пассивный смеситель и КФ) и к усилителю первой ПЧ (он должен иметь очень маленький коэффициент шума при достаточно большом динамическом диапазоне).

В авторском экземпляре трансивера получен коэффициент шума 12дБ (при отключенном УВЧ), при коэффициенте шума, измеренном со входа УПЧ1 (вход блока А5) около 3дБ (коэффициент шума самого УПЧ около 2дБ, остальное – вклад последующих узлов и главным образом АЦП). Таким образом, потери в ДПФ, смесителе и КФ составили 9дБ. Основная задача усилителя 1-й ПЧ компенсация потерь в смесителях и фильтрах.

На выходе УПЧ1 включен двухкристальный кварцевый фильтр. Его назначение – подавить шумы УПЧ1 в полосе зеркального канала приема по второй ПЧ.

После «подчисточного» фильтра сигнал поступает на второй смеситель. Второй смеситель выполнен по балансной схеме и работает в пассивном ключевом режиме. Используются ключи 74НС4052. Такой смеситель обладает очень хорошей линейностью. Следует отметить, что при использовании двойного преобразования частоты и ключевых смесителей, питаемых меандром, довольно остро стоит проблема пораженных точек приемника (следствие взаимодействия высших гармоник колебаний первого и второго гетеродинов), поэтому следует уделить должное внимание хорошей экранировке и развязкам по цепям питания.

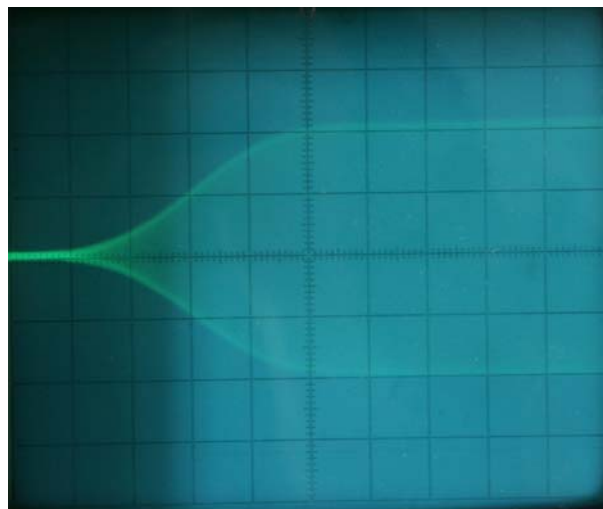


Рисунок 3 Форма телеграфных посылок при скорости около 60wpm (развертка 1мс/дел)

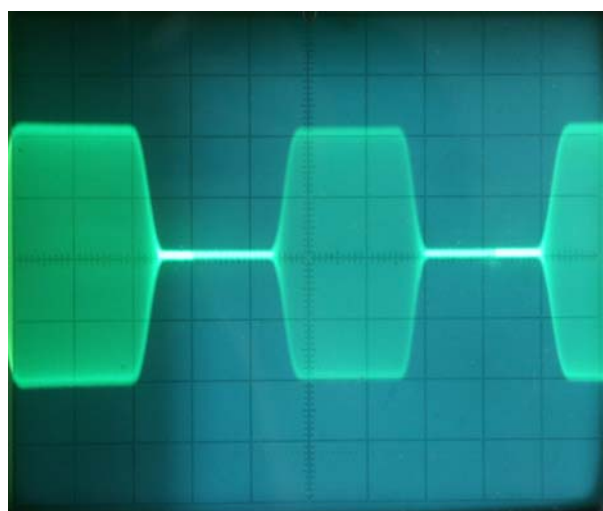


Рисунок 4 Форма телеграфных посылок при скорости около 60wpm (развертка 10мс/дел).

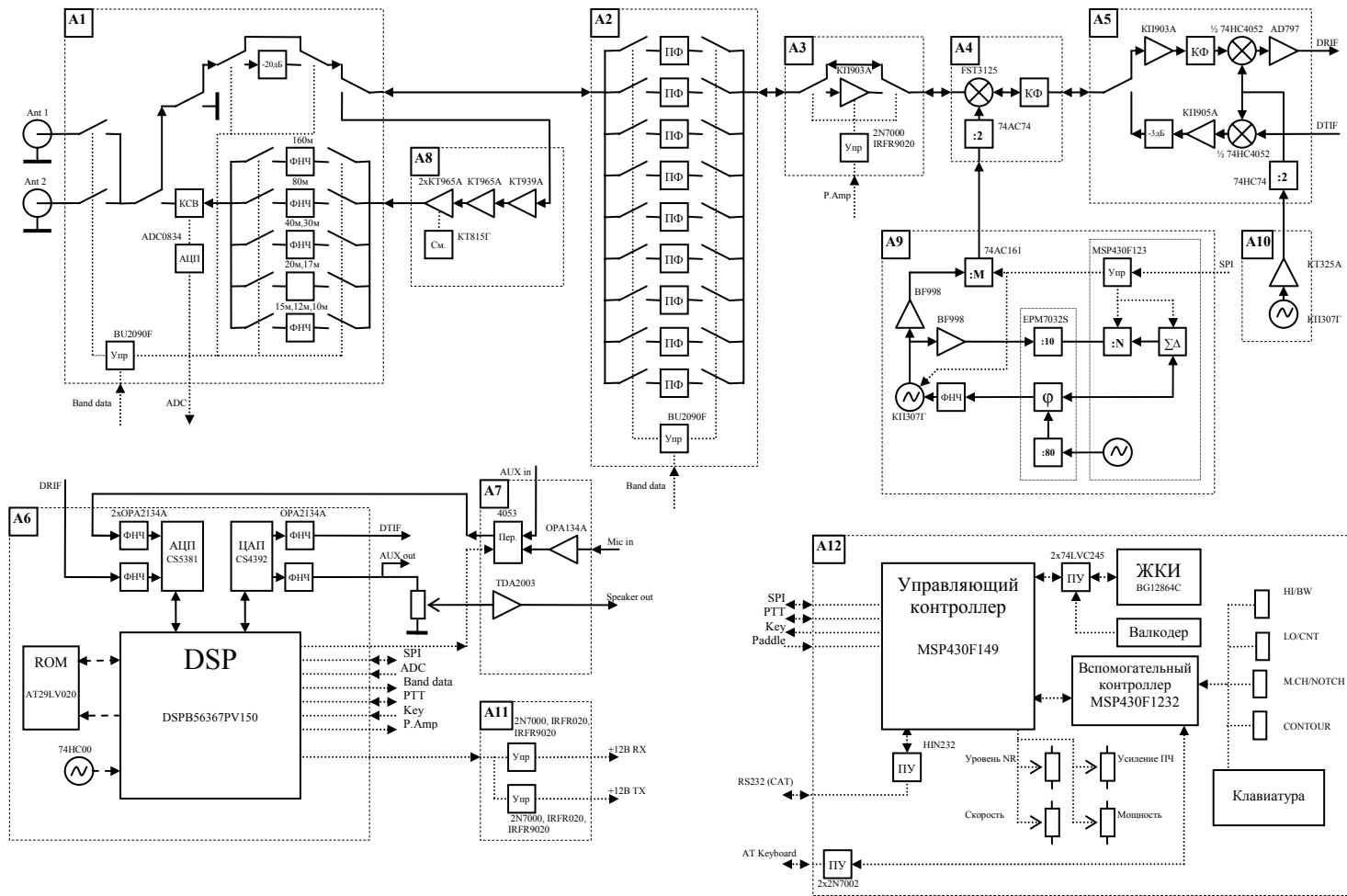


Рисунок 5 Блок-схема трансивера

С учетом коэффициента усиления УПЧ1, коэффициент передачи со входа трансивера до выхода второго смесителя приблизительно равен 1. После второго смесителя сигнал усиливается усилителем второй ПЧ, в качестве которого используется один из лучших ОУ для профессиональной аудиоаппаратуры (AD797). Основной задачей УПЧ2 является усиление сигнала до уровня, при котором обеспечивается нормальная работа АЦП.

Как видно из структурной схемы аналоговые узлы ГТП не охвачены петлей АРУ, а единственный элемент регулирования усиления – аттенюатор, коммутируемый реле. В ГТП применяется только два высоколинейных усилителя (УПЧ1 и УПЧ2) с фиксированным усилением. Такое построение схемы с точки зрения линейности обеспечивает работу усилительных каскадов в оптимальном режиме и позволяет реализовать полностью цифровую систему АРУ, которая обладает массой преимуществ по сравнению с традиционными аналоговыми или смешанными системами. При полосе пропускания 2400Гц односигнальный ДД (в полосе пропускания ГТП) получается немногим более 120дБ, что вполне достаточно и обеспечивает нормальную работу системы АРУ.

С УПЧ2 сигнал поступает в блок цифровой обработки сигнала (DSP). В блоке DSP (А6) сигнал обрабатывается по программе, в которой реализованы следующие «узлы»: подавитель импульсных помех, перестраиваемый цифровой фильтр, автоматический и ручной режекторные фильтры, измеритель мощности принимаемого сигнала, система АРУ, адаптивный фильтр для подавления шумов и другие.

После обработки в блоке DSP демодулированный и отфильтрованный аудиосигнал поступает на разъем компьютерного интерфейса (для работы цифровыми видами), а также через регулятор громкости на УНЧ приемника (в блок А7).

При работе на передачу телеграфом сигнал формируется программой DSP. Форма огибающей посылок телеграфного сигнала рассчитана на получение четкого сигнала с минимальной излучаемой полосой и воспроизводится с высокой точностью программой DSP (см. рис 3, 4). В программе блока DSP также реализована вся логика управления переключением прием/передача. В телеграфе обеспечивается работа в режиме «semi-break in».

При работе на передачу в режиме SSB сигнал усиливается микрофонным усилителем (А7) и поступает в блок DSP (А6), где осуществляется формирование SSB сигнала на частоте второй ПЧ. В программе DSP (в режиме SSB) реализованы следующие «узлы» передатчика: регулировка тембра, компрессор, фильтры, квадратурный модулятор, система VOX, которая обеспечивает переключение трансивера на передачу до появления сигнала на выходе.

При работе на передачу в режиме RTTY передаваемое сообщение кодируется управляющим контроллером и направляется в блок DSP, программа которого формирует RTTY на частоте второй ПЧ трансивера.

Сформированный на частоте второй ПЧ (24кГц) сигнал поступает в блок А5, где переносится на первую ПЧ, усиливается и через аттенюатор, предназначенный для лучшего согласования с кварцевым фильтром, поступает в блок (А4), где повторяет путь сигнала при приеме, только в другом направлении.

С выхода ДПФ (А2) сигнал подается на усилитель мощности (УМ). Усилитель мощности (А8) трехкаскадный и собран по типовой схеме. На выходе УМ включены двухзвенные ФНЧ, подавляющие гармоники основного сигнала.

Далее через КСВ-метр и антенный коммутатор сигнал подается на одну из двух антенн. Данные с КСВ-метра оцифровываются АЦП и передаются в цифровой процессор для дальнейшей обработки. Коммутация диапазонов и переключение прием/передача осуществляется с помощью реле.

Уровень сервиса, предоставляемый современными трансиверами, невозможно реализовать без применения цифрового синтезатора частоты. Поэтому синтезатору

частоты было уделено много внимания, так как это, пожалуй, единственный узел, который оказывает существенное влияние на все параметры трансивера. Первоначально были опробованы схемотехнические решения, примененные в конструкции Elecraft K2 и HT981M (US2II). Однако в них было невозможно добиться хорошей стабильности частоты, они требовали кропотливой настройки, и при этом не обеспечивали нужного шага перестройки частоты. Гибридные синтезаторы, использующие комбинацию DDS и ФАПЧ, удовлетворяли поставленным требованиям, но на тот период времени микросхемы DDS мне не были доступны.

После «исследования» литературы и научных статей, выбор был остановлен на современной технологии применения делителей с дробным коэффициентом деления и цифровой компенсацией побочных составляющих спектра [4]. Эта технология широко используется фирмой IFR (бывшая Marconi Instruments) в измерительных генераторах.

Основная идея заключается в модуляции коэффициента деления ($N/N+1$) обычного ДПКД с целью получения дробного коэффициента деления. Однако при этом возникает большое количество дискретных побочных составляющих в спектре колебаний на выходе ДПКД (такой делитель использовать в синтезаторе нельзя). Проблема побочных составляющих решается путем изменения алгоритма, по которому модулируется коэффициент деления. Коэффициент деления меняется в пределах $N-7 \dots N+8$ по специальному закону. В результате дискретные побочные составляющие «размазываются» по всему спектру превращаясь в шум, спектральная плотность которого крайне мала вблизи основного колебания и высока вдали. Высокочастотный шум затем отфильтровывается фильтром петли ФАПЧ.

В результате синтезатор частоты (A9) содержит только один аналоговый узел – ГУН. Все остальные узлы цифровые и, соответственно, не требуют настройки и обеспечивают стабильную работу. При частоте сравнения 100кГц синтезатор обеспечивает шаг перестройки 0.06Гц (на выходе ГУН, но частота еще делится минимум на 4) и отличные шумовые параметры. Следует отметить, что микроконтроллер на плате синтезатора непосредственно участвует в процессе синтеза частоты (в большинстве радиолюбительских конструкций он используется лишь для управления), рассчитывая коэффициенты деления ДПКД 100000 раз в секунду.

В качестве второго гетеродина (A10) использован простой генератор, стабилизированный кварцевым резонатором.

Применение цифровой обработки сигнала позволяет легко изменять множество параметров приемника и передатчика, поэтому важно хорошо продумать эргономику аппарата с целью обеспечения простого и удобного доступа ко всем функциям. Иначе обилие всевозможных настроек, «закодированных» в меню, может стать в большей степени проблемой, чем преимуществом (один из ярких примеров TS2000 – попробуйте разобраться в его меню без инструкции). На мой взгляд, лучше всего данную проблему решила фирма Icom в аппаратах IC756/PRO/PROII [2] и IC7800. Чтобы не изобретать «велосипед», основная идея по организации пользовательского интерфейса позаимствована отсюда. В таблице 5 приведены несколько примеров отображения информации ЖКИ трансивера.

Таблица 5. Примеры отображения информации ЖКИ трансивера с комментариями



Основной экран – иконки слева и справа показывают текущие функции многофункциональных клавиш F1-F6, расположенных по сторонам экрана. Цифровой S-метр может быть отключен.



Чтобы просмотреть содержимое памяти, достаточно перейти на экран памяти частот. При желании для каждой ячейки памяти можно задать короткий комментарий (на английском или русском).



Экран установки параметров телеграфного сигнала.



T03DSP не поддерживает режим QSK, однако имеется режим автоматического перехода на передачу (semi-break-in). При этом все временные параметры телеграфного сигнала сохраняются и не происходит укорочения первого знака, в отличие от многих других трансиверов.



Автоматический телеграфный ключ с памятью и возможностью генерации контрольного номера помогает в тестах, если под рукой нет компьютера. Формат передачи контрольного номера может быть выбран из 5 вариантов.



Можно работать RTTY без какого-либо дополнительного оборудования. Имеется удобный индикатор настройки и функция АПЧ.



RTTY декодер поддерживает Русский, Английский и расширенный алфавит.



Установка параметров микрофонного усилителя.



Полоса пропускания SSB формирователя изменяется от 100 до 3000Гц, также имеется возможность задать частоту нижнего ската фильтра.

Регулируемый экспандер позволит снизить уровень шума (например, от Вашего РА) в паузах речи.



При приеме сигналов в SSB режиме можно включить чувствительный к голосу шумоподаватель, он не будет реагировать на немодулированные несущие и многие другие виды помех.



Система APX T03DSP реализована полностью в цифровом виде. Это позволяет реализовать очень гибкую систему APX с уникальными параметрами. Еще ни один трансивер для радиолюбителей не позволял регулировать глубину APX (может быть выбрана из 0/3/6/12/20 dB).



Ручной режекторный фильтр это еще один серьезный инструмент для подавления помех. Регулируемая полоса режекции (60...350Гц шагами по 10Гц) совместно с отличным коэффициентом прямоугольности (полоса 30Гц по уровню -60dB и 60Гц по уровню -6 dB) делают его реальным инструментом по подавлению помех.

Еще одна полезная функция – слежение за частотой помехи при перестройке трансивера.



Подавитель импульсных помех реализован в цифровом виде. Он эффективен против помех от систем зажигания и некоторых видов помех от ЛЭП.



Регулируемые параметры адаптивного автокорреляционного фильтра для подавления шумов позволяют оптимизировать его работу в разных эфирных ситуациях.



Ну и конечно же главный инструмент – регулируемый фильтр ПЧ с полосой от 100Гц до 3000Гц, коэффициентом прямоугольности до 1.05 и линейной фазовой характеристикой.

Для эффективного решения поставленной задачи был необходим контроллер с достаточной вычислительной мощностью (кроме того, с встроенной флэш-памятью нужного объема и богатым набором периферии). Выбор был остановлен на 16-битном контроллере фирмы Texas Instruments MSP430F149. Для наиболее эффективного использования его вычислительных ресурсов (в общем-то, небольших по меркам современного компьютерного мира) я разработал операционную систему реального времени, которая, кстати, нашла применение не только в этом трансивере. Ее применение позволило многократно сократить сроки написания управляющего ПО и повысить его качество. Как выяснилось позже, инженеры Icom'a пошли тем же путем и также применили ОС реального времени в управляющем ПО IC7800. На сегодняшний день объем исходных текстов ПО превышает 30000 строк.

«Обслуживанием» клавиатуры (внутренней и внешней) и получением данных от энкодеров занимается вспомогательный контроллер (MSP430F1232). Такое решение позволяет снизить нагрузку на основной контроллер и увеличить кол-во линий ввода-вывода.

Управляющий контроллер, кроме основных функций (управление синтезатором частоты, DSP и интерфейс с пользователем), реализует ряд дополнительных функций. Таких, как телеграфный ключ с памятью и автоматической генерацией контрольного номера, CAT система (подмножество системы команд Kenwood), часы реального времени, 30 каналов памяти и 5 каналов «быстрой» памяти, декодирование/кодирование RTTY сообщений, АПЧ при работе в RTTY и др.

1. Kenwood TS870S User Manual
2. Icom 756PROII User Manual
3. Дроздов В.В. Любительские КВ трансиверы, М. Радио и связь, 1988
4. J.Wells, Marconi Instruments, "Frequency Synthesizers" US Patent 4,609,881 , 2 Sep. 1986