

## Антенный анализатор VNA на Arduino Uno



- Диапазон частот 1 ... 30 МГц
- Связь с компьютером и питание от USB
- Панорамное измерение КСВ, Z, X, R
- Циклические измерения параметров антенны
- Программная калибровка
- Измерение параметров коаксиального кабеля
- Измерение АЧХ четырехполюсников
- Режим генератора сигналов

При настройке антенно-фидерных систем важно правильно измерить коэффициент стоячей волны (КСВ). Этот параметр в любительских условиях обычно измеряется с помощью КСВ-метра на фиксированной частоте, а частотная характеристика антенны строится рядом последовательных замеров. Для однодиапазонной антенны этот классический метод вполне применим.

Но чтобы настроить таким образом 7-и диапазонную КВ антенну, в которой изменение размеров одного конструктивного элемента влияет в разной степени на ее параметры на нескольких диапазонах, потребуется масса усилий и времени.

Тут необходим профессиональный антенный анализатор, который выведет на дисплей или экран ноутбука график значения КСВ, а также активного и реактивного сопротивления антенны в зависимости от частоты. Удобно и наглядно. Именно к такому выводу я пришел, когда смонтировал на дачном участке на крошечной, с трудом отвоёванной у жены площадке, всеволновую КВ антенну GAP TITAN DX.

Во всей остроте встал вопрос – покупать фирменный антенный анализатор или делать его самому. Учитывая, что этот прибор нужен не чаще раза в год, а на приобретение антенны уже была потрачена изрядная сумма денег, я склонился ко второму варианту.

Антенный анализатор должен быть по возможности простым, его настройка и калибровка должна быть доступна в домашних условиях без использования каких-либо образцовых приборов. Он должен обеспечивать панорамное измерение КСВ, X и R с выводом графиков на экран компьютера и (или) собственного дисплея в частотном диапазоне 1-30 МГц. Ну, и конечно, стоимость комплектующих должна быть существенно ниже стоимости самого дешевого серийно выпускаемого антенного анализатора. Противоречивые требования... Тем не менее после длительных поисков и анализа существующих решений был найден вполне удовлетворительный вариант.

Впервые описание схемы, конструкции и принципа действия векторного антенного анализатора, удовлетворяющего, на мой взгляд, всем перечисленным требованиям, было опубликовано в журнале «Funkamateur» №12 за 2004г. Авторы – Davide

Tosatti (IW3HEV) и Alessandro Zanotti (IW3IJZ). Журнал «Радиолюбби» в №1 за 2005г. опубликовал сокращенный перевод этой статьи. За прошедшее с той поры десятилетие идея не только не устарела, но и получила дальнейшее развитие.

Польский радиолюбитель Jarek (SP3SWJ) на своем сайте <https://sites.google.com/site/sp3swj/> разместил массу информации по дальнейшему развитию идеи. Множество вариантов схем и конструкций от VNA MAX 1 до VNA MAX 6, масса ссылок. Частотный диапазон от 1-30 МГц до 1-500 МГц. К сожалению, сайт, на мой взгляд, совершенно «бестолковый». Очень сложно понять, какая прошивка и какая программа для какой схемы. Где первая версия, а где последняя и т.п. Полную информацию, необходимую для повторения, выловить очень не просто, а для некоторых схем ее просто нет.

Davide (IW3HEV) организовал серийное производство своего антенного анализатора под брендом miniVNA - <http://miniradiosolutions.com/>. Красивая коробочка позволяет проводить измерения в диапазоне от 100 КГц до 200 МГц, а с дополнительным блоком и до 1,5 ГГц. Все хорошо, но почти 400€ за это чудо техники для российского радиолюбителя дороговато... Схема и описание miniVNA опубликовано в журнале «A Radio. Praktica Elektronika» №10 за 2007 г.

После этого краткого экскурса в историю перейдем к делу. Структурная схема антенного анализатора VNA показана на рисунке 1.

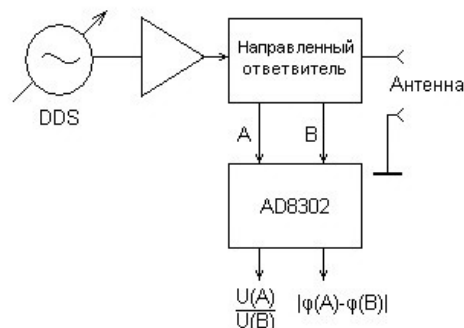


Рис. 1 Структурная схема анализатора

Сигнал с генератора на основе DDS через направленный ответвитель подается в исследуемую антенну. Сигналы с датчика прямой и отраженной

волны подаются на уникальную микросхему от Analog Devices – AD8302. На ее выходе формируются два аналоговых сигнала. Первый пропорционален отношению амплитуд входных сигналов, второй – разности их фаз.

По этим двум значениям можно рассчитать все характеристики антенны, в том числе KCB тракта, активную и реактивную составляющие входного сопротивления антенны.

Комплектующие для этого антенного анализатора в общем-то достаточно редкие, но вполне доступные. Проблема в том, что найти все необходимые компоненты у одного продавца невозможно. А если приобретать в разных российских интернет магазинах, транспортные расходы становятся слишком большими. К счастью, есть Aliexpress и eBay. В общем, без помощи братского китайского народа я бы ничего не смог сделать.

Как я уже писал, основное требование к этой конструкции – простота изготовления и минимальная стоимость. При сохранении необходимых метрологических характеристик, разумеется. Поэтому я использовал в конструкции два готовых модуля. Первый – это модуль синтезатора на основе DDS AD9851. На небольшой плате смонтирована микросхема синтезатора, тактовый генератор и вся необходимая обвязка. И стоит этот модуль в Китае дешевле одной микросхемы DDS в России.

Второй модуль – «Arduino Uno». Это популярная отладочная плата на основе микроконтроллера ATmega328. Она включает в себя микроконтроллер, всю необходимую обвязку и конвертер USB-COM для связи с компьютером. И опять же его стоимость в Китае соизмерима со стоимостью од-

ного микроконтроллера в России...

А вот измерительный модуль пришлось собирать самостоятельно. Его схема показана на рисунке 2. Сигнал с модуля DDS подается на монолитный усилитель DA1 типа GALI производства Mini-Circuits <http://www.minicircuits.com>. Можно использовать любую модификацию усилителя, подобрав номинал резистора R13 для получения номинального тока через усилитель согласно datasheet. Я использовал GALI33+ с номинальным током 40 МА.

Важнейшая часть измерительного модуля – направленный ответвитель T1. От его качества зависит точность и частотный диапазон анализатора. Это так называемый «Tandem Match» – трансформатор на двухдырочном бинокле. Хорошо работает в частотном диапазоне 1-30 МГц бинокль типа BN-43-202 с магнитной проницаемостью феррита около 2000 или BN-73-202 из феррита 12000.

К сожалению, бинокли от старых советских комнатных телевизионных антенн не подойдут. Они изготовлены из феррита 30 ВЧ и не работают на частотах ниже 10 МГц. Попытка сделать аналог бинокля из ферритовых колец тоже не пройдет.

Все четыре обмотки T1 выполнены проводом ПЭВ-2 диаметром 0,5 мм. Две обмотки содержат по 6 витков и две – по одному витку. Витком считается прохождение провода в отверстие. Схема намотки направленного ответвителя показана на рис. 3.

Подробно методика изготовления «Tandem match» описана в статье в упоминавшемся выше журнале Funkamateur и в pdf файле, который можно скачать с моего сайта.

К разъему X1 подключается антенна. В показанном на схеме отключенном состоянии реле K1 сиг-

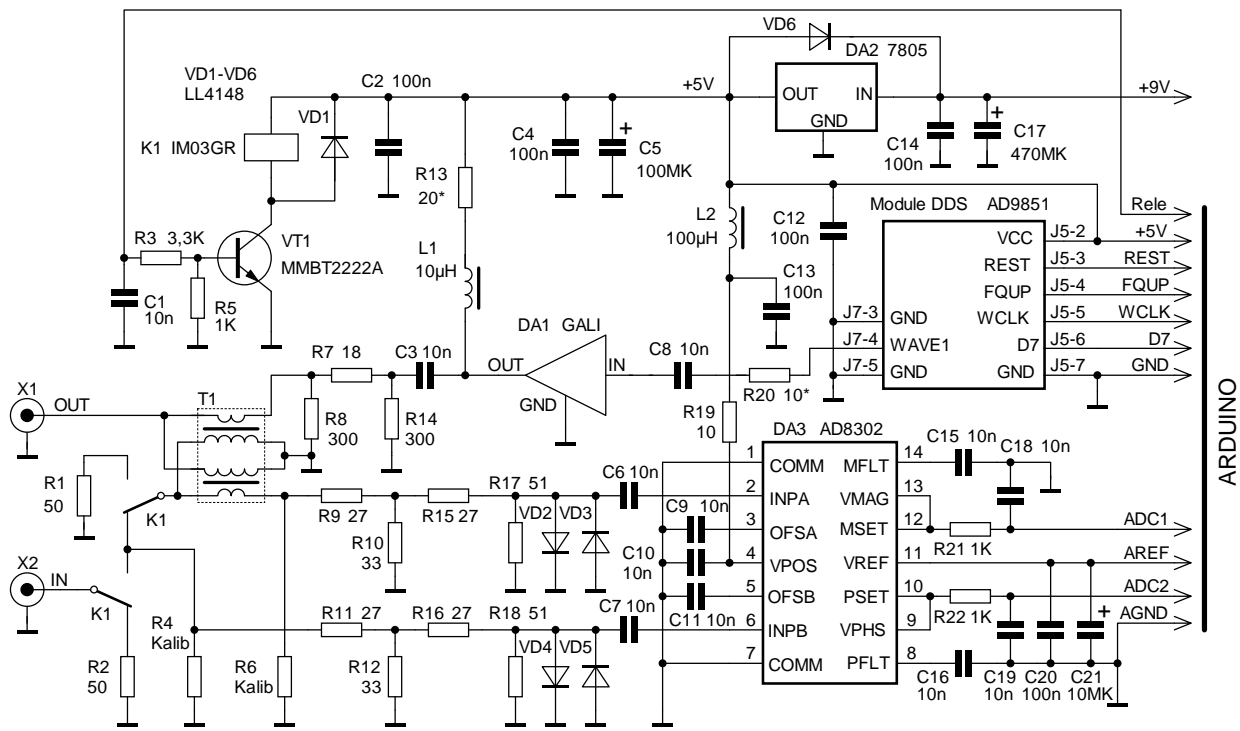


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного модуля

налы прямой и отраженной волны с направленного ответвителя через аттенюаторы 10 db на резисторах R9, R10, R15 и R11, R12, R16 подаются на входы DA3 AD8302. Аттенюаторы нужны для исключения перегрузки AD8302. Сигналы на входах не должны превышать 0,22 V.

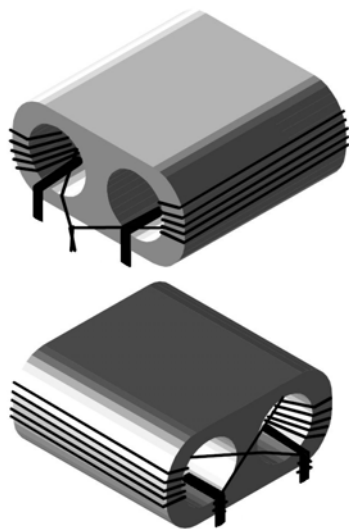


Рис. 3 Tandem match

Этот антенный анализатор можно использовать и для исследования амплитудно-частотных характеристик электрических цепей. При включенном состоянии реле K1 сигнал с разъема X1 может быть подан на исследуемую цепь, сигнал с выхода этой цепи подается на разъем X2. Таким образом можно настроить полосовой фильтр, снять характеристику кварца и т.п.

Аналоговые сигналы, пропорциональные отношению амплитуд и разности фаз прямой и отраженной волны с выхода DA3 подаются на АЦП микроконтроллера ATmega328 в модуле Arduino. Учитывая, что ноутбук в наше время перестал быть роскошью, я решил на первом этапе отказаться от собственного индикатора в этом антенном анализаторе. Вся информация выводится на экран ноутбука, к которому анализатор подключается через интерфейс USB.

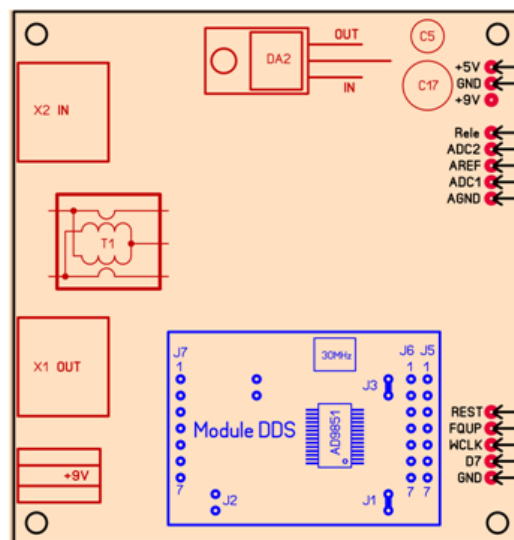
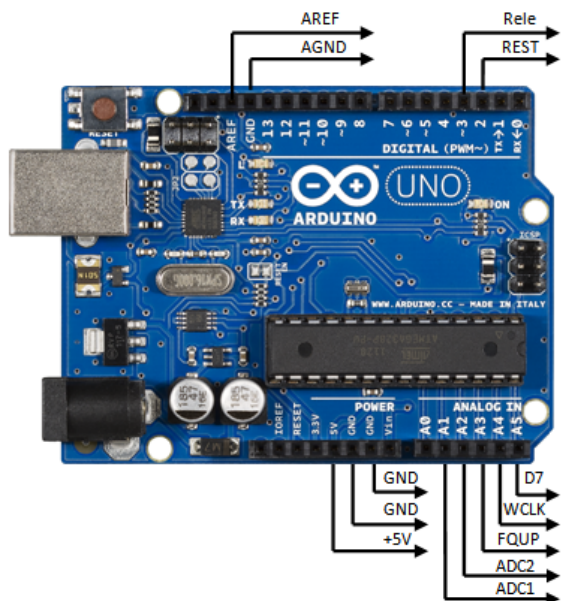
Дополнительного питания не требуется, хотя на плате и предусмотрен стабилизатор на 5 В. Это в расчете на будущую модернизацию для возможности работы в автономном режиме. Конечно, на крыше с ноутбуком не всегда удобно, но зато читать информацию с большого экрана гораздо комфортнее и нагляднее, чем с небольшого дисплея.

Подключение измерительного модуля к плате Arduino показано на рисунке 4.

Программу для ATmega328 я написал на Си в среде CodeVisionAVR v2.05.0. Совсем не обязательно программировать Arduino в ее фирменной среде. Это имеет смысл только для тех, кто впервые сталкивается с программированием.

Тем же, кто имеет представление о других языках программирования, нет никакой необходимости разбираться в синтаксисе и других тонкостях

языка Arduino. Ведь это упрощенный до предела Си, в котором отсутствует встроенный отладчик, тщательно скрыты от пользователя все аппаратные модули внутренней периферии контроллера. А о возможности ассемблерных вставок даже и речи нет.



Измерительный модуль	Arduino	ATMega328
+5V	+5V	+5V
GND	GND	GND
Relе	3	PD.3
ADC2	A2	PC.2
AREF	AREF	AREF
ADC1	A1	PC.1
AGND	GND	GND
REST	2	PD.2
FQUP	A3	PC.3
WCLK	A4	PC.4
D7	A5	PC.5

Рис. 4. Подключение измерительного модуля к Arduino

Есть, конечно и плюсы у Arduino. Основной, на мой взгляд, это возможность загрузки программы в контроллер без программатора, используя смонтированный на плате конвертер USB-COM. К счастью, есть программа, которая позволяет загрузить в плату Arduino любой HEX файл. Это XLoader.

Но фирменное программное обеспечение Arduino все-таки понадобится. Из него нужно взять драйвер конвертера USB-COM. Дело в том, что разработчики решили отказаться от надежного и проверенного временем конвертера USB-COM на FT232RL от FTDI и применили свой собственный на ATmega16U2.

Поэтому нужно сначала скачать последнюю версию программного обеспечения Arduino с сайта <http://www.arduino.cc/> и распаковать архив **arduino-1.0.5-r2-windows.zip** в любое удобное место на диске. Затем, после подключения платы к компьютеру и ее обнаружения системой (речь идет о Windows XP или Windows 7), нужно выбрать установку драйвера из указанного места и указать путь к папке с драйвером:

**arduino-1.0.5-r2 → drivers.**

Теперь скачиваем архив с сайта: <http://russemotto.com/xloader/> и устанавливаем XLoader. Работа с программой проста и интуитивно понятна. Нужно выбрать тип платы – **Uno(ATmega328)**, и номер виртуального COM порта, который присвоен плате. Определить его можно в диспетчере устройств Windows. Скорость обмена 115200 установится сама, менять ее не нужно. Затем указываем путь к HEX файлу прошивки **vna328.hex**. О FUSE битах можно не беспокоиться, они уже выставлены и возможности испортить их нет. После этого нажимаем кнопку «Upload» и ждем 2-3 секунды до окончания загрузки.

Остается упомянуть только об одной детали, на которую я потратил много времени. На плате Arduino предусмотрен автоматический сброс для запуска загрузчика программного обеспечения. Он осуществляется по линии DTR виртуального COM порта. Детали понятны из принципиальной схемы платы, которую можно скачать с моего сайта.

Т.е. программа загрузчика в компьютере непосредственно перед началом загрузки файла прошивки кратковременно устанавливает на линии DTR низкий логический уровень. Происходит сброс ATmega328 и запуск программы загрузчика в нем. После окончания загрузки управление передается только что загруженной программе.

Все хорошо и удобно, но оказалось, что при открытии компьютером виртуального COM порта, на линиях DTR и RXD кратковременно появляются нулевые уровни. Это приводит к запуску загрузчика, когда он совсем не нужен. В результате управляющая программа не может связаться с анализатором.

Чтобы этого не происходило, нужно перерезать перемычку RESET-EN на плате Arduino. Она промаркирована и хорошо видна на лицевой стороне платы. Но после этого процесс загрузки программы в контроллер усложняется. Сразу после нажатия

экранной кнопки Upload в XLoader нужно кратковременно нажать на реальную кнопку RESET на плате. Именно в такой последовательности и без задержки.

Не всегда это получается с первого раза, в этом случае загрузка не идет, а XLoader зависает. Закрывать его получается только убийством процесса в Windows. Поэтому лучше сначала загрузить прошивку в контроллер, а затем перерезать перемычку на плате. Было бы проще, если бы разработчики установили джампер вместо перемычки.

Есть и еще один глюк USB-COM от Arduino. Как я уже упоминал, при открытии порта компьютером фантомный импульс проскакивает не только на линии DTR, но и на RXD. Контроллер интерпретирует его как два принятых байта, что нарушает протокол обмена. С этим пришлось бороться программно. Поборол...

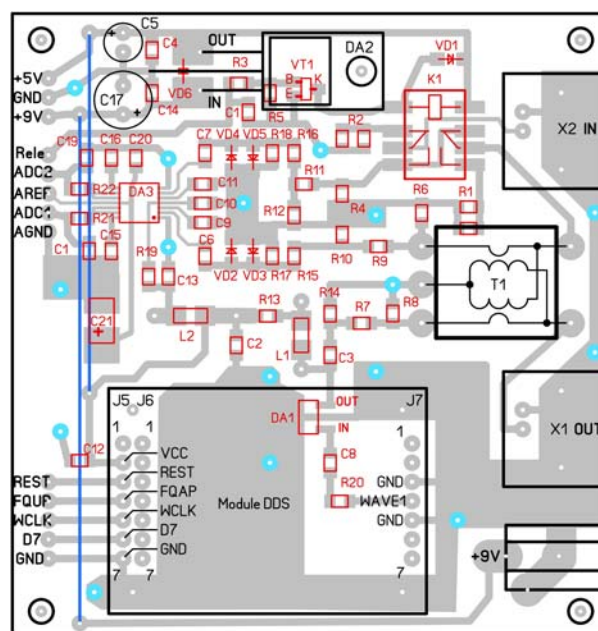


Рис. 5. Плата антенного анализатора

Несколько слов об использованных деталях. Все резисторы и неполярные конденсаторы SMD типоразмеров 1206 или 0805. Индуктивности L1 и L2 могут быть как SMD, так и обычные для монтажа в отверстия. VT1 – любого типа, N-P-N, вывод коллектора в середине. Реле K1 типа IM03GR или в корпусе для монтажа в отверстия IM03NS с рабочим напряжением 5 В.

В последнем случае на плате нужно предусмотреть отверстия для выводов, а реле смонтировать со стороны установки деталей в корпусах, монтируемых в отверстия. Резисторы R1 и R2 составлены из двух, включенных параллельно резисторов 100 Ом. Резисторы R4 и R6 калибровочные, необходимость их установки и номиналы определяются при наладке. Стабилизатор DA2 в данной версии не используется, т.к. анализатор питается от USB. Он установлен в расчете на будущую доработку конструкции.

Измерительный блок смонтирован на плате из двустороннего фольгированного стеклотекстолита размерами 79x83 мм. Чертеж платы показан на рисунке 5, вид со стороны печатных проводников. Монтаж односторонний, но верхний слой фольги не удаляется. Он служит общим проводом и экраном. В контактные площадки со сквозным переходом, выделенные цветом, вставляются отрезки провода, которые распаиваются с обеих сторон платы. Остальные отверстия зенкуются со стороны фольги.

Обратите внимание на установку джамперов на модуле DDS. Они должны быть установлены именно так, как показано на рисунке 4 – замкнуты J1 и J3, остальные разомкнуты. Схему и описание модуля DDS можно скачать с моего сайта.

Для наладки желательно иметь ВЧ вольтметр, а лучше осциллограф с полосой пропускания хотя бы несколько мегагерц и частотомер. В крайнем случае можно обойтись ВЧ пробником на диоде и мультиметром.

После завершения монтажа и загрузки прошивки в контроллер нужно запустить на компьютере управляющую программу **Ig\_MiniVNA**. Ее последнюю версию можно загрузить с сайта: <http://clb.site.free.fr/>. Это последняя версия. Действительно последняя, т.к. по утверждению автора при крахе компьютера он потерял все... Но программа работает как на Windows XP, так и на Windows 7 64 бит.

После распаковки архива нужно найти файл **IG\_MiniVNA.ini** и открыть его для редактирования в текстовом редакторе. Найдите в нем строчку: **Coefficient DDS=10737523000** и исправьте ее на **Coefficient DDS=23860477000**.

Это необходимо сделать потому, что программа по умолчанию работает с DDS типа AD9951, а нам нужно управлять AD9851.

Теперь запускайте файл **IG\_MiniVNA.exe**, выбирайте в меню **Configure → Language** из списка язык интерфейса (русского, к сожалению, нет, так что придется выбрать английский), затем в **Configure → Com Port** номер порта. Анализатор при этом должен быть подключен к компьютеру. Если есть частотомер, подключите его к гнезду X1 OUT, выберите **Configure → miniVNA → Calibrate DDS frequency** и уточните коэффициент DDS. Там все понятно. Если частотомера нет, этот пункт можно пропустить, небольшая погрешность при настройке антенны не имеет значения.

Теперь подключаем к выходу DA1 GALI ВЧ вольтметр, пробник на диоде или осциллограф. Осциллограф, конечно предпочтительнее. Выбираем в меню **Modes → Generator** и выставляем частоту в пределах 2...3 МГц. Контролируем осциллографом форму и амплитуду сигнала на выходе DA1. Для уменьшения влияния входной емкости осциллографа нужно использовать делитель 1/10.

Подбором резистора R20 выставляем максимально возможную амплитуду сигнала, при которой еще нет сильных искажений синусоиды. Если осциллографа нет, просто устанавливаем амплитуду сигнала на уровне около 1,5 В.

Теперь нужно откалибровать измерительную схему. Предварительно необходимо изготовить соединительный кабель минимальной длины с двумя разъемами BNC на концах, с помощью которого будем соединять между собой разъемы X1 OUT и X2 IN анализатора. Также понадобится эталонный безиндуктивный резистор 50 Ом, который можно изготовить из разъема BNC припаяв к нему два SMD резистора по 100 Ом (рис. 6).



Рис. 6. Опции, необходимые для калибровки

Устанавливаем режим антенных измерений – **Modes → Antenna**, затем **Configure → miniVNA → Calibrate Reflection** и делаем, как просит программа. Затем выбираем **Configure → miniVNA → Calibrate Transmission** и опять выполняем требования программы.

Теперь, чтобы удостовериться, что все работает как задумано, подключаем к разъему X1 OUT эталонный резистор 50 Ом, в поле **Frequency** выбираем диапазон 1-30 МГц и нажимаем экранную кнопку «**I Sweep**». Ставим галочки R.L., Phase и R.s. Линия R.L. должна идти в самом низу, в районе 30 db, линия Phase – по центру, около 90 градусов, а линия R.s. на 50 Ом. При движении курсора мышки по экрану под графиками выводятся числовые значения параметров.

Если все так, наладка закончена. Но можно попытаться добиться максимально возможной точности измерений. Точного, по возможности, соответствия R.s. = 50 Ом во всем диапазоне частот добиваемся подпайкой калибровочного резистора на место R4 или R6. Номинал этого резистора подбирается ориентировочно в пределах 300 Ом...2 К.

Можно проверить показания и на других образцовых резисторах в пределах 5...500 Ом, подключая их к разъему X1 OUT и попытаться найти компромисс путем подбора номинала калибровочного резистора R4 или R6. Но чем дальше от 50 Ом, тем больше будет погрешность. Тут уж ничего не поделаешь, ведь мы делаем не эталонный, а любительский прибор для настройки реальной антенны, а не для псевдонаучных изысканий. Какая разница при работе в эфире, если KCB = 1,1 или 1,05?

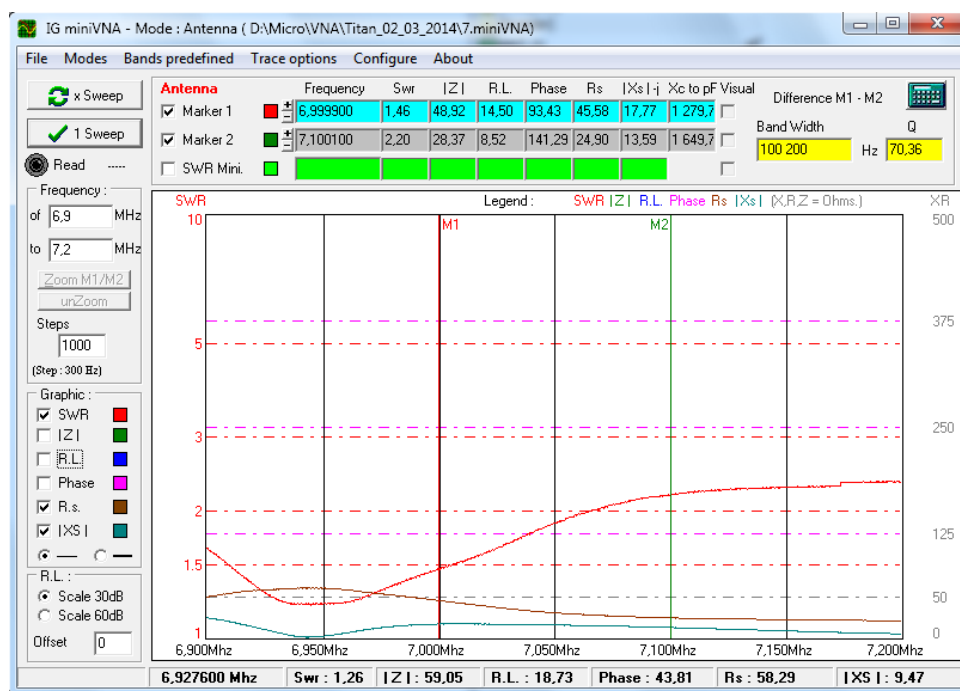


Рис. 7. Вид окна программы IG\_MiniVNA

Фазу и возвратные потери нужно постараться максимально приблизить к 90 градусам и 30 db, соответственно небольшим перемещением обмоток на бинокле направленного ответвителя. Делать это нужно диэлектрической пластинкой, когда анализатор собран в корпусе, т.к. окружающие предметы сильно влияют на настройку.

Работа с программой в режиме измерений интуитивно понятна, поэтому я не буду на этом останавливаться. При желании можно найти описание работы и примеры измерений на сайте SP3SWJ <https://sites.google.com/site/sp3swj/>. К сожалению, только на польском языке и в большом беспорядке...

На рисунке 7 показан вид окна программы при исследовании моей антенны в диапазоне 40м. Наглядно видно, что резонанс сдвинут вниз по частоте. Надо настраивать.

Частотный диапазон анализатора определяется в первую очередь направленным ответвителем, материалом его сердечника, аккуратностью и симметричностью намотки. Верхняя граница частотного диапазона зависит от типа DDS. Теоретическое предельное значение – половина тактовой частоты DDS, в данном случае это 90 МГц. Реально удовлетворительные параметры обеспечиваются до частоты не более 1/4 тактовой, т.е до 45 МГц. Но больше 30 МГц для КВ антенны и не нужно.

Антенный анализатор может работать под управлением еще одной программы, которую написал Dietmar Krause (DL2SBA). Ее можно скачать с его сайта <http://dl2sba.com/>

Программа написана на JAVA и может работать не только под Windows, но также под Linux и Mac. Для Windows и Linux достаточно скачать JAR-файл, ссылка на последнюю версию которого есть

на страничке [vna/J](#) → **Downloads** сайта автора. Разумеется, предварительно нужно установить на компьютер JAVA.

Интерфейс [vna/J](#) похож на IG\_MiniVNA. Только после запуска программы из списка поддерживаемых устройств нужно выбрать miniVNA. Работа с этими программами практически аналогична. Для [vna/J](#) на страничке [vna/J](#) → **Manuals** есть подробные инструкции по установке ПО, калибровке анализатора, а также руководство пользователя.

**Чертеж печатной платы измерительного блока в формате Sprint Layout, его схему в формате sPplan, прошивку и проект программы для Arduino, а также все упомянутые статьи из журналов и много других дополнительных материалов к этой конструкции можно загрузить с сайта автора по адресам:**

<http://ra4nal.qrz.ru>  
<http://ra4nal.lanstek.ru>

**Разработка 2014 г.**

**Перепечатка со ссылкой на первоисточник.**