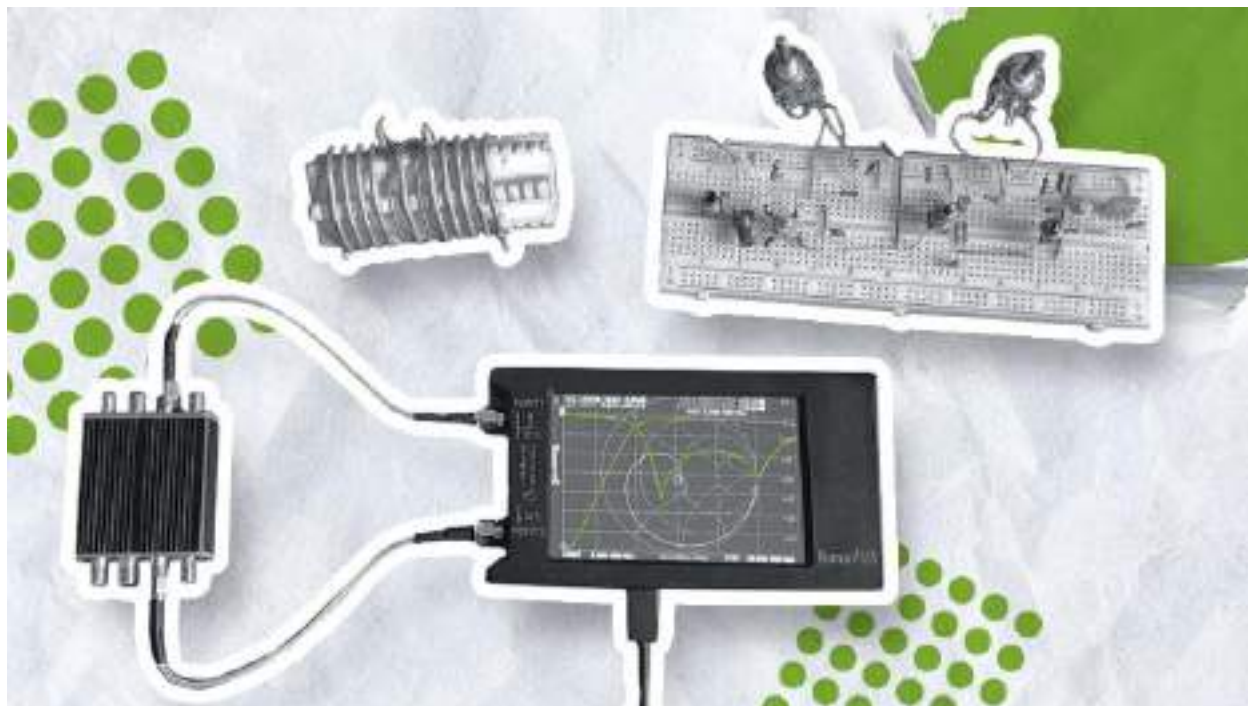


## Векторный анализатор NanoVNA для радиолюбителей



Если вы — радиолюбитель, увлекаетесь приёмниками или радиопередатчиками, то вам постоянно приходится решать задачи согласования приёмников или передатчиков с фидерами, фидеров — с антеннами, фильтрами, малошумящими усилителями приёмников и усилителями мощности передатчиков.

Даже если у вас есть высокочастотные генераторы сигналов и хороший осциллограф, измеритель ёмкости и индуктивности, с их помощью будет довольно сложно выполнять такие операции.

К счастью, сегодня практически каждому радиолюбителю доступен такой прибор, как векторный анализатор цепей Vector Network Analyser (VNA), с успехом решающий все перечисленные выше задачи.

И если раньше VNA занимал много места и стоил как автомобиль (рис. 1), то сегодня доступен недорогой и компактный анализатор NanoVNA. Разные модели этого анализатора работают в разных диапазонах частот и обладают разными возможностями.

Конечно, точность и диапазон рабочих частот у NanoVNA меньше, чем у дорогих профессиональных VNA. Однако с его помощью радиолюбитель сможет заниматься настройкой аппаратуры, работающей в коротковолновом (КВ), ультракоротковолновом (УКВ) диапазонах частот, а также в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ).

В этой статье я расскажу о том, как работать с NanoVNA-H 4 (рис. 2). Эта модель средняя по цене и возможностям, способна проводить измерения в диапазоне частот от 10 КГц до 1.5 ГГц.

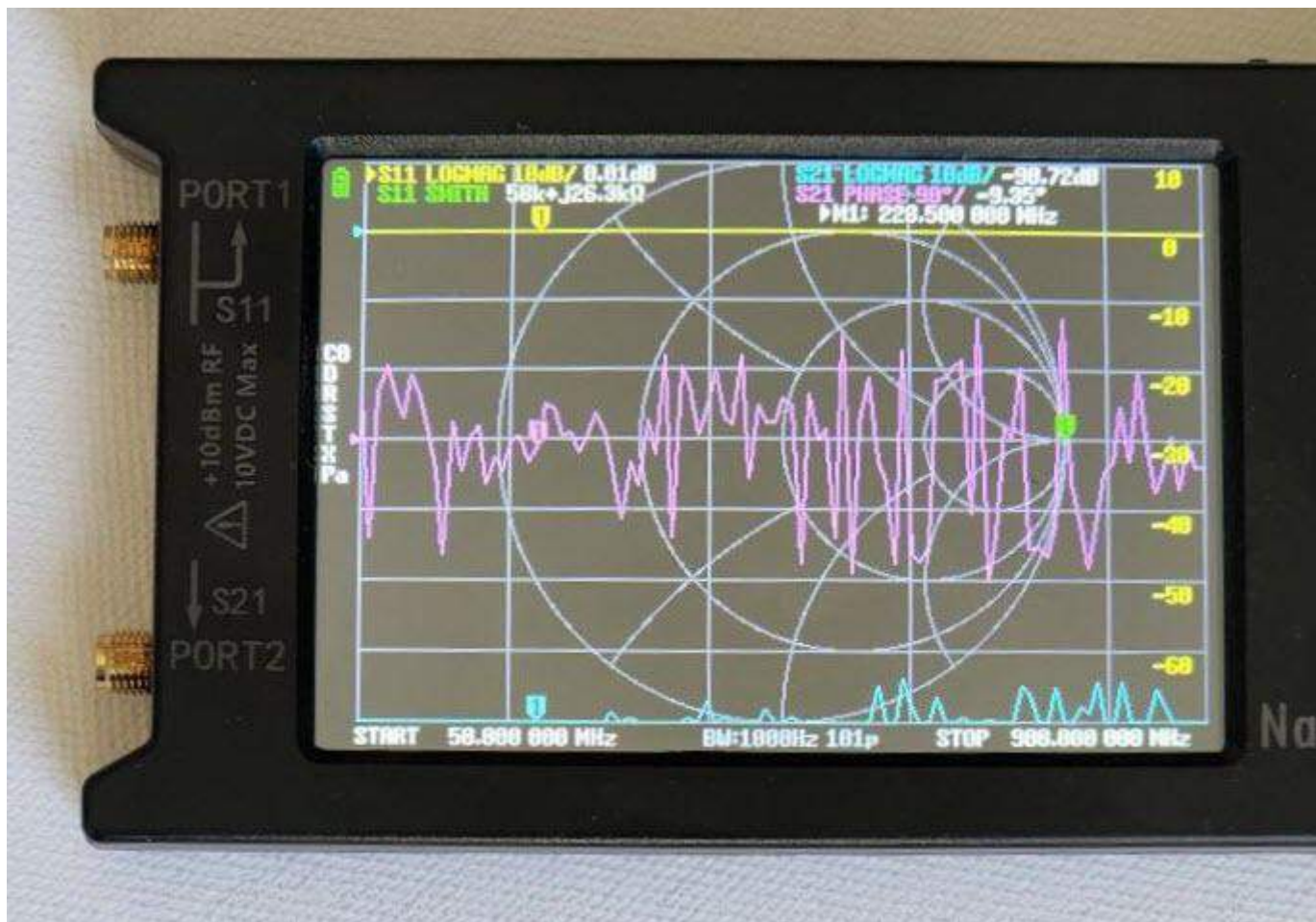


Рис. 2. Векторный анализатор NanoVNA-H 4

Более дорогая модель NanoVNA-F V3 поддерживает частотный диапазон от 1 МГц до 6 ГГц. Вам также могут встретиться старые модели NanoVNA-H с маленьким экраном, работающие на частотах до 900 МГц.

Учтите, что для перечисленных выше VNA в описаниях на сайтах указаны заявленные характеристики. В то же время точность измерений, особенно на высоких частотах, зависит от качества соединений, разъёмов и потерь в соединительных кабелях, и особенно от процедуры калибровки NanoVNA, которую я распишу подробно.

### Немного теории

Прежде чем описать приёмы работы с NanoVNA, я кратко рассмотрю некоторые важные понятия и термины.

Когда речь идет о согласовании различных высокочастотных устройств, вам могут встретиться такие термины, как «согласование по импедансу», «согласование импеданса антенны с волновым сопротивлением фидера», «согласование выходного сопротивления передатчика с входным сопротивлением фидера», «согласование по волновому сопротивлению».

Чтобы разобраться с терминологией, начнём с реактивного сопротивления ёмкости и индуктивности.

### Реактивное сопротивление

Скорее всего, у вас есть мультиметр или омметр для измерения сопротивления резисторов. Однако такой прибор будет совершенно бесполезным для измерения **реактивного сопротивления** ёмкости или индуктивности (реактанса). Для ёмкости сопротивление постоянному току бесконечное (не считая мизерных токов утечки), а для идеальной индуктивности оно равно нулю.

Реактивное сопротивление ёмкости (конденсатора) обозначается  $X_C$ , измеряется в омах и показывает, насколько конденсатор препятствует протеканию переменного тока.

Реактивное сопротивление конденсатора вычисляется так:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC},$$

где  $f$  — частота в герцах,  $C$  — ёмкость в фарадах.

Индуктивность (катушка) сопротивляется изменению переменного тока. Её реактивное сопротивление  $X_L$  также измеряется в омах:

$$X_L = 2\pi fL,$$

где  $f$  — частота в герцах,  $L$  — индуктивность в Гн.

С ростом частоты сигнала реактивное сопротивление конденсатора уменьшается, а катушки, наоборот, увеличивается.

### Полное сопротивление или импеданс

В реальном мире нет идеальных конденсаторов и катушек. У конденсаторов есть выводы, обладающие индуктивностью, а также токи утечки через диэлектрик. У катушки есть ненулевое сопротивление проводника, из которого она изготовлена, а также паразитная ёмкость между витками и выводами.

Кстати, и обычные резисторы тоже могут обладать индуктивностью. Поэтому в качестве нагрузки, заменяющей антенну в передатчиках при настройке, используют специальные безиндуктивные резисторы. Конечно, индуктивность выводов конденсаторов, паразитное сопротивление и ёмкость катушек сильно сказываются только на высоких частотах.

Полное сопротивление или **импеданс** представляет собой сопротивление, которое оказывает элемент или цепь гармоническому переменному току с учётом активного и реактивного сопротивления.

Импеданс измеряется в омах и записывается в комплексной форме:

$$Z = R + jX,$$

где

- $R$  — активное (реальное) сопротивление;
- $X$  — суммарная реактивность (мнимая часть);
- $j$  — мнимая единица ( $j^2 = -1$ ).

По отдельности для индуктивной реактивности  $X_L$  и ёмкостной реактивности  $X_C$ :

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Суммарная реактивность цепи (если одновременно есть  $L$  и  $C$ ) вычисляется как

$$X = X_L - X_C$$

Модуль импеданса, то есть фактическое «полное сопротивление» для переменного тока, вычисляется по формуле:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

В этих формулах:

- $f$  — частота сигнала в герцах;
- $L$  — индуктивная составляющая в генри;
- $C$  — ёмкостная составляющая в фарадах.

На рис. 3 представлена графическая интерпретация импеданса.

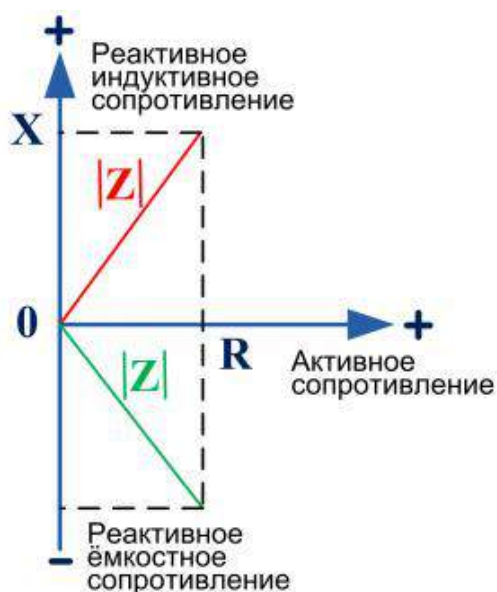


Рис. 3. Графическая интерпретация импеданса ([ИСТОЧНИК](#))

## Волновое сопротивление

Когда идет речь про [волновое сопротивление](#), то имеется в виду характеристика линии передачи (кабеля, фидера), а не сопротивление проводников постоянному току.

Волновое сопротивление кабеля измеряется в омах и показывает, как в нём соотносятся ток и напряжение бегущей волны. Оно зависит от геометрии и диэлектрика кабеля.

Волновое сопротивление нельзя измерить обычным омметром, потому что это не активное сопротивление проводников, а параметр, проявляющийся только для переменных сигналов.

В радиоловительской практике чаще всего используется кабель с волновым сопротивлением 50 Ом. Вам также может встретиться кабель с волновым сопротивлением 75 Ом.

Подробнее о волновом сопротивлении и линиях передачи читайте в статье [«Уроки по электрическим цепям — линии передачи»](#).

## Немного об S-параметрах

Прежде чем перейти к рассказу о векторном анализаторе цепей, рассмотрим так называемые S-параметры, представляющие собой коэффициенты отражения и передачи сигнала.

Представим себе, что у нас есть устройство с двумя портами (разъёмами), такое как фильтр или фидер. Пусть, например, фидер соединяет передатчик с антенной.

Сигнал от передатчика попадает на вход фидера, и часть его отражается назад. Другая часть проходит дальше, к выходному порту и антенне. При этом часть сигнала отражается от выхода, к которому подключена антенна, и часть проходит через устройство в антенну.

Если передатчик согласован с фидером, а фидер — с антенной, то отражения малы и вся мощность попадает в антенну. Если же есть отражения, то антенне достаётся небольшая мощность, а отражённая волна возвращается в передатчик и перегружает его.

В случае приёмника ситуация аналогичная. Сигнал поступает с антенны на фидер, и часть его отражается обратно в антенну. Чем меньше отражения, тем будет сильнее сигнал на входе приёмника.

Для оценки передачи и отражений устройства с двумя портами, такого как фидер или фильтр, используются такие S-параметры:

- $S_{11}$  — коэффициент отражения от входа устройства. Этот параметр показывает, сколько сигнала вернулось назад из-за рассогласования импеданса;
- $S_{21}$  — коэффициент прямой передачи. Он показывает эффективность передачи сигнала от входа к выходу устройства;

- $S_{12}$  — коэффициент обратной передачи, который показывает эффективность передачи сигнала с выхода на вход;
- $S_{22}$  — коэффициент отражения на выходе. Показывает, какая часть сигнала отражается обратно на вход устройства из-за рассогласования импеданса на выходе.

На рис. 4 показаны эти параметры на примере полосового фильтра.

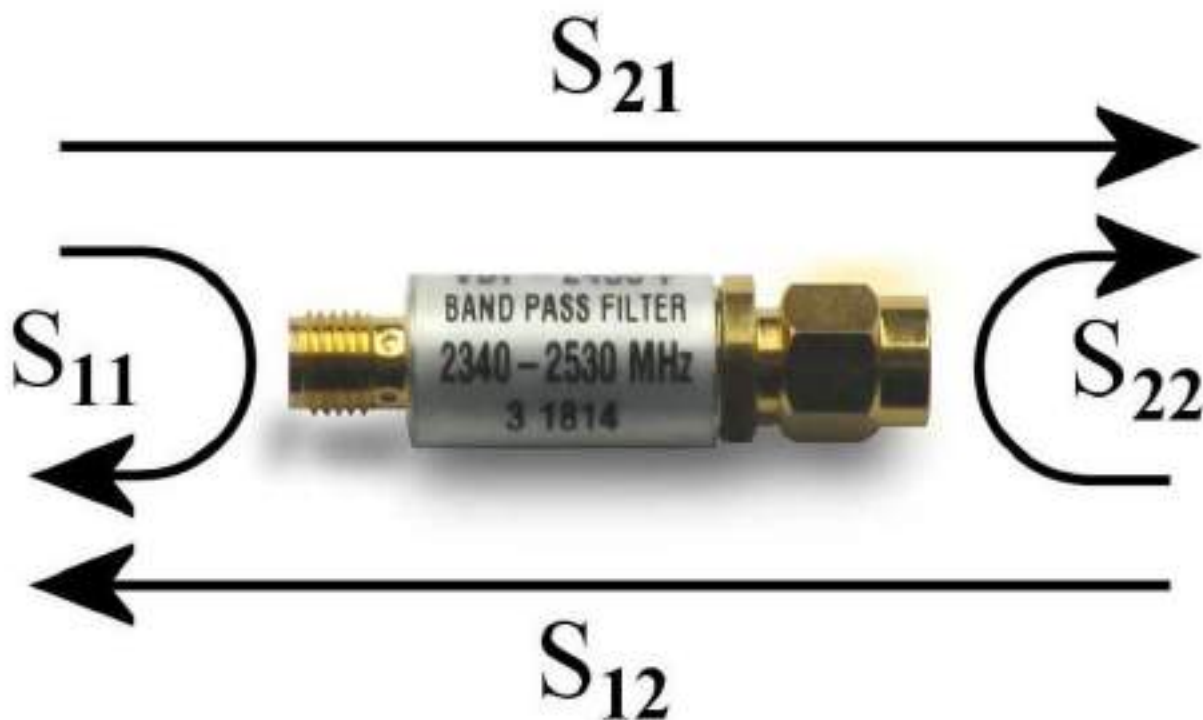


Рис. 4. S-параметры ([источник](#))

В идеальном случае, когда устройство согласовано по входу и выходу, а также не имеет потерь, значения коэффициентов  $S_{11}$  и  $S_{22}$  равны нулю (нет отражений), а коэффициенты передачи  $S_{21}$  и  $S_{12}$  равны единице (полная передача в обоих направлениях). В идеальных направленных устройствах  $S_{12}$  может быть нулевым (полная изоляция).

Надо отметить, что значения этих коэффициентов обычно зависят от частоты. Например, через полосовые фильтры проходят сигналы только частот, лежащих в полосе пропускания.

### Как работает векторный анализатор цепей

У NanoVNA есть два коаксиальных разъёма SMA — **PORT1** и **PORT2** (у старых моделей обозначаются как **CH0** и **CH1**). С разъёма **PORT1** тестовый сигнал подаётся на проверяемое устройство DUT (Device Under Test). Встроенный направленный ответвитель на этом же порту фиксирует отражённый сигнал и вычисляет параметр  **$S_{11}$** . Сигнал, прошедший через DUT и поступивший на **PORT2**, используется для измерения  **$S_{21}$** .

Перед измерениями необходимо задать диапазон частот для встроенного в NanoVNA генератора тестового сигнала, а также провести калибровку для исключения влияния кабелей, разъёмов и внутренних трактов.

В процессе измерений анализатор последовательно изменяет частоту сигнала в заданном диапазоне, сравнивая амплитуду и фазу отражённого и прошедшего сигналов с опорным тестовым сигналом. Таким образом определяются **S11** и **S21**.

Параметры **S12** и **S22** доступны только при перестановке DUT либо при использовании более продвинутых моделей NanoVNA.

Сетевой анализатор позволяет определить:

- полное сопротивление (импеданс) устройства, включая реактивную часть;
- характеристики фильтров, усилителей, антенн;
- степень согласования устройств на разных частотах;
- коэффициент отражения и стоячую волну (КСВ).

Также анализатор может построить диаграмму Смита, выполнить TDR-анализ и проводить другие измерения.

### Калибровка NanoVNA

Прежде чем проводить измерения с помощью NanoVNA, необходимо откалибровать этот прибор. Для калибровки вам будут нужны эталоны (рис. 5) и два кабеля SMA Male-Male из комплекта NanoVNA.

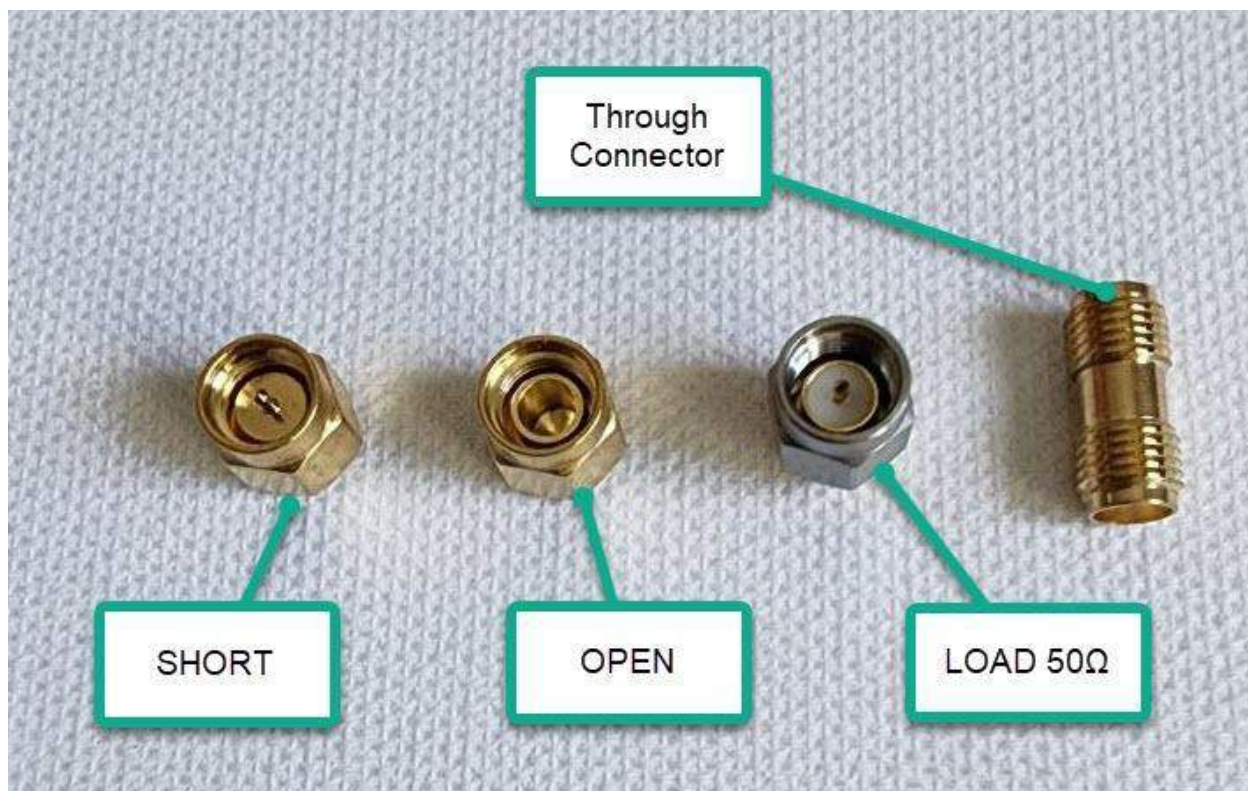


Рис. 5. Эталоны для калибровки

В полевых условиях калибровку NanoVNA можно выполнить с помощью панели этого прибора, а в условиях лаборатории удобнее с помощью программы NanoVNA-Saver.

Перед запуском калибровки необходимо включить NanoVNA и выбрать диапазон, в котором будет проводиться калибровка.

#### Калибровка на панели NanoVNA

Подключите питание NanoVNA с помощью кабеля USB из комплекта прибора, чтобы зарядить аккумулятор. Включите питание с помощью выключателя, расположенного на корпусе устройства (рис. 6).

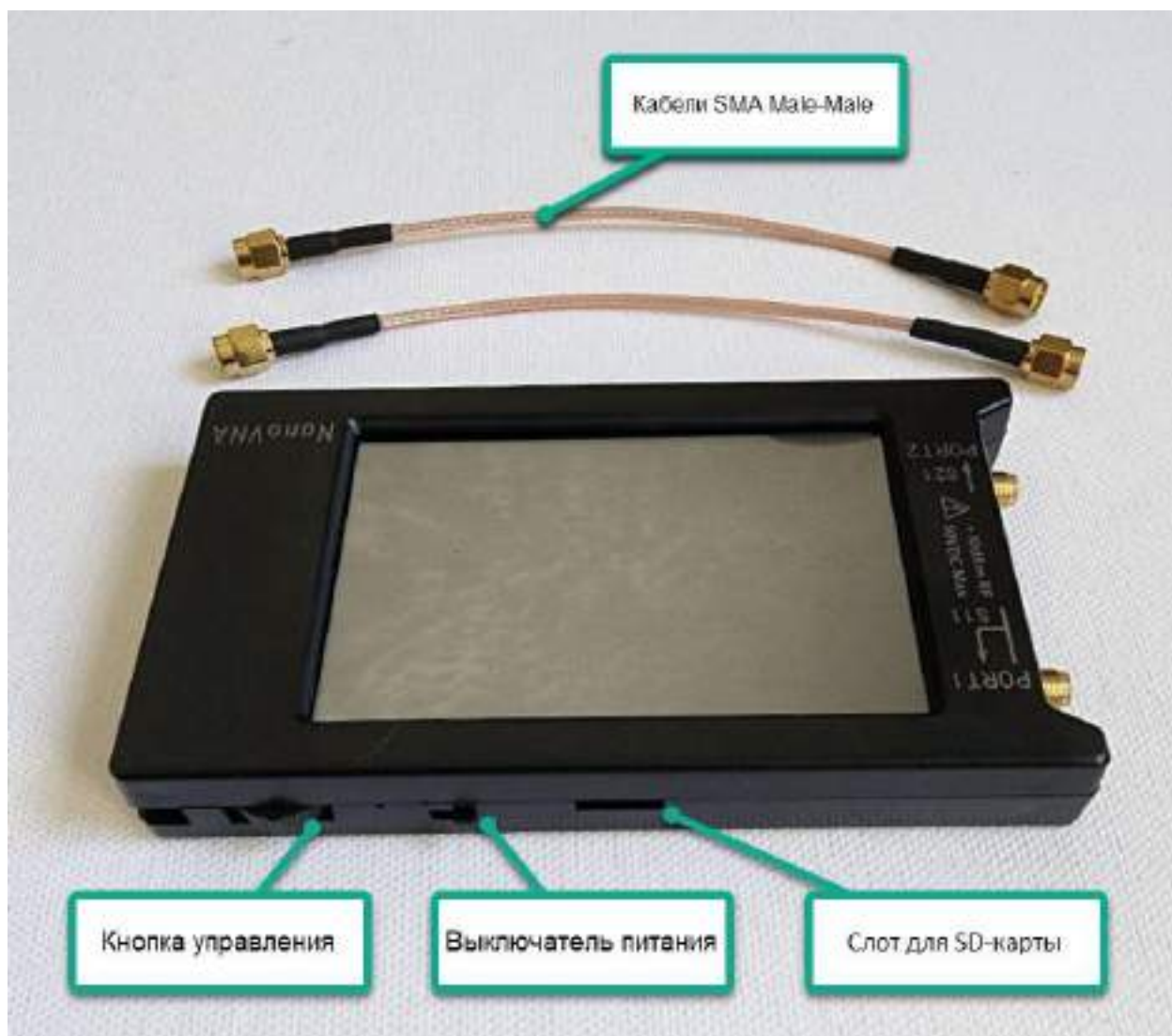


Рис. 6. Кнопки управления и кабели SMA Male-Male

После включения питания управлять работой NanoVNA-H 4 можно с помощью кнопки, показанной слева внизу на рис. X, но удобнее это делать стилусом треугольной формы из комплекта прибора. Кнопку управления можно нажимать, а также качать в одну или в другую сторону.

Для выбора нужного диапазона нажмите на кнопку управления или коснитесь стилусом экрана устройства. На экране появится меню (рис. 7).

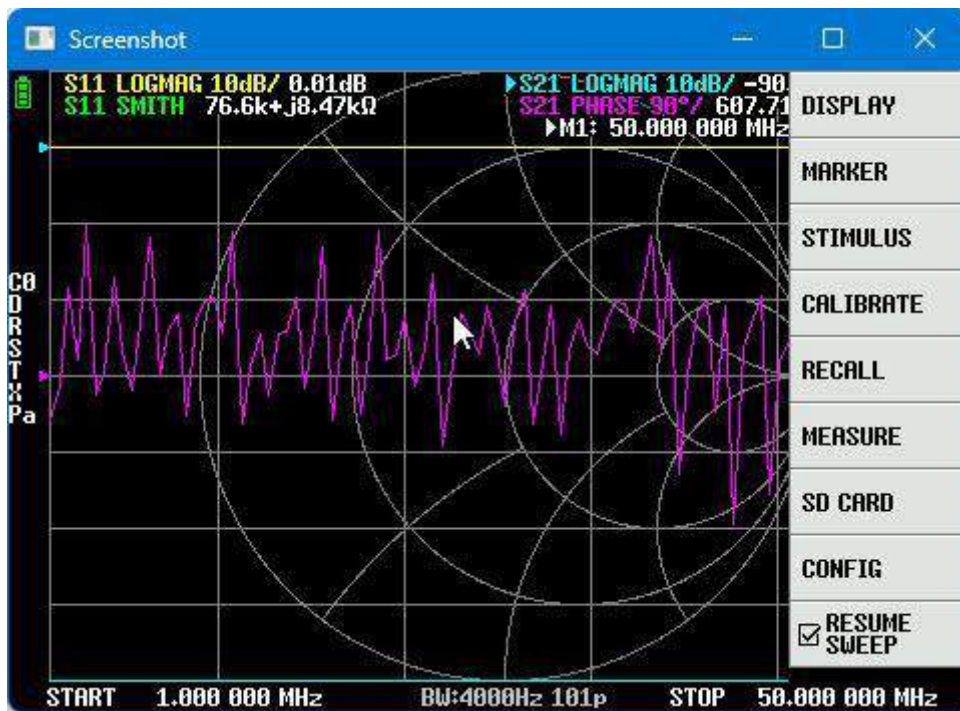


Рис. 7. Меню устройства NanoVNA

Выберите из меню строку **STIMULUS**, коснувшись этой строки стилусом. На экране появится меню, позволяющее выбрать границы изменения частоты при проведении измерений (рис. 8).



Рис. 8. Меню Stimulus

Слово «Stimulus» можно перевести на русский язык как «источник сигнала».

Для ввода начальной частоты коснитесь стилусом кнопки **START**. Появится панель ввода частоты (рис. 9).

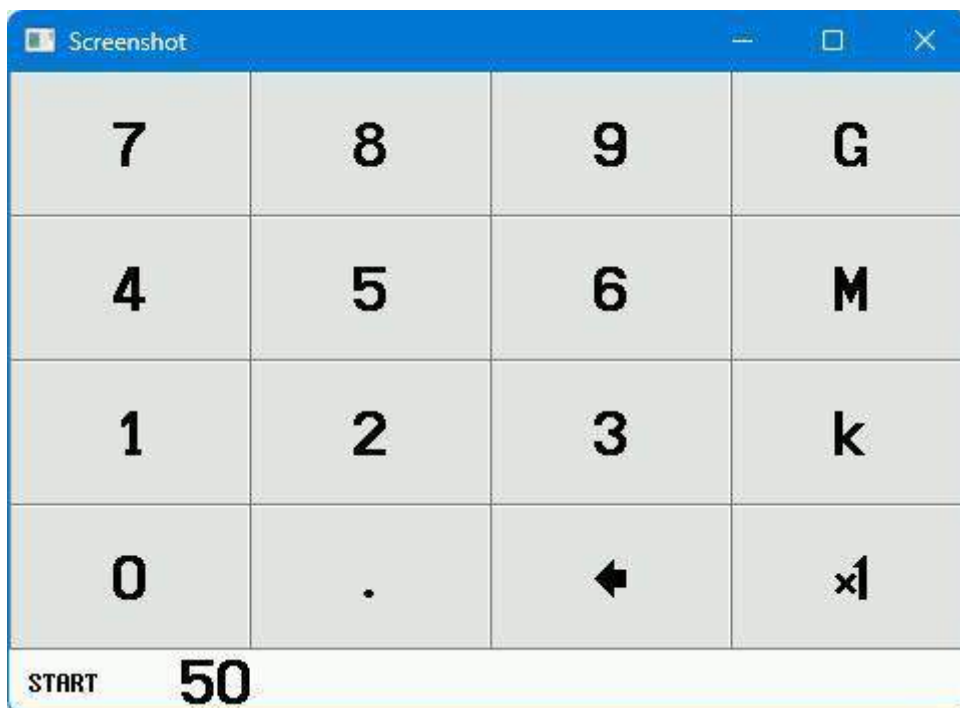


Рис. 9. Панель ввода частоты

Касайтесь стилусом цифр и символа точки для ввода частоты. Обратная стрелка нужна для исправления ошибок. После ввода частоты дотроньтесь до **k**, чтобы ввести КГц, **M** — для МГц и **G** — для ГГц. Если нужно ввести частоту в Гц, воспользуйтесь кнопкой **x1**.

Чтобы ввести конечную частоту, используйте в меню **STIMULUS** кнопку **STOP** аналогичным образом.

Далее откройте меню калибровки. Для этого выйдите из меню **STIMULUS**, выбрав строку **BACK**, а затем откройте меню **CALIBRATE** (рис. 10).

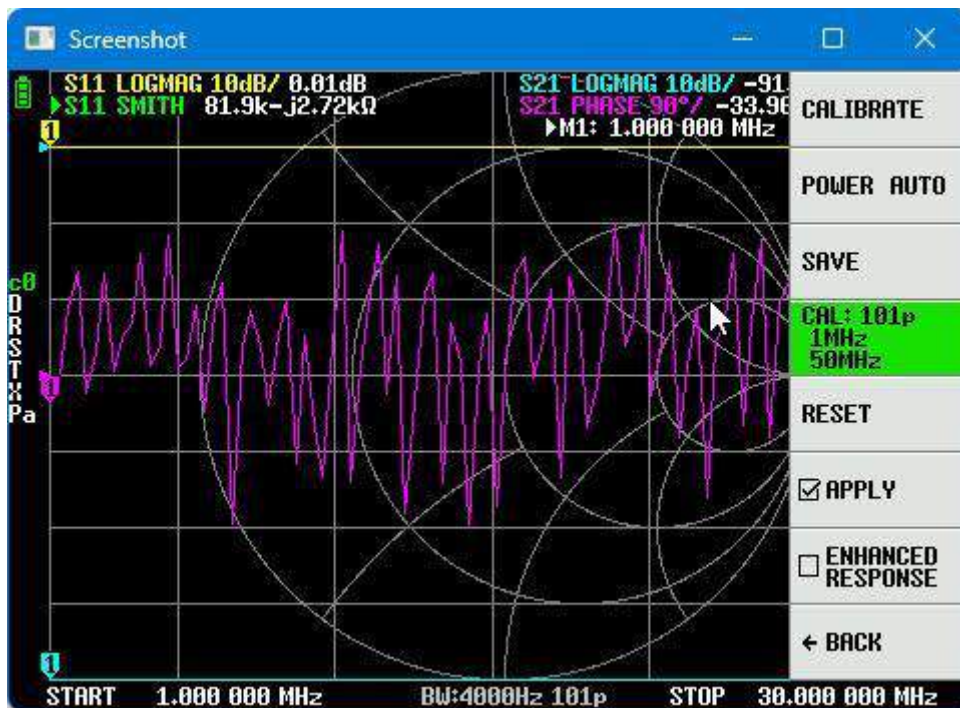


Рис. 10. Меню CALIBRATE

Сбросьте старую калибровку кнопкой **RESET**. Теперь нужно будет запустить калибровку и по очереди подключать эталоны к разъемам **PORT1** и **PORT2** устройства.

Режим OPEN

Подключите эталон **OPEN** (рис. 5) к разъему **PORT1**. Далее выберите меню **CALIBRATE**, а затем щёлкните кнопку **OPEN**. Через некоторое время эта кнопка будет отмечена флажком, после чего подсветится кнопка **SHORT** (рис. 11).

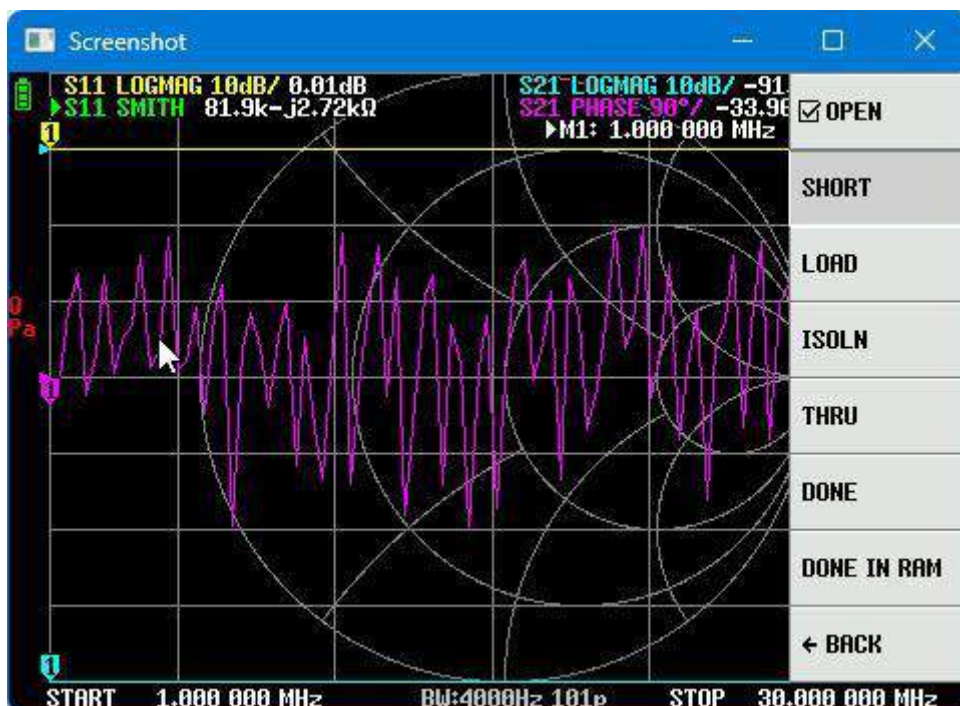


Рис. 11. Выполнена калибровка в режиме Open

## Режим SHORT

Подключите эталон **SHORT** к разъёму **PORT1** и коснитесь стилусом кнопку **SHORT**. Дождитесь, когда эта кнопка будет отмечена флажком.

## Режим LOAD

Далее подсветится кнопка **LOAD**. Подключите к разъёму **PORT1** эталон **LOAD 50Ω** и коснитесь кнопки **LOAD**. Дождитесь завершения калибровки в этом режиме.

## Режим ISOLN

На следующем шаге оставьте эталон **LOAD 50Ω** подключенным к **PORT1**, а к разъёму **PORT2** либо не подключайте ничего, либо еще один эталон **LOAD 50Ω** (если в комплекте к NanoVNA имеется два таких эталона). Коснитесь кнопки **ISOLN**.

## Режим THRU

Для калибровки в режиме **THRU** соедините разъёмы **PORT1** и **PORT2** двумя кабелями SMA Male-Male с переходником **Through Connector** (рис. 12).



**Рис. 12. Калибровка в режиме Thru**

Далее коснитесь стилусом кнопки **THRU** на панели прибора.

После выполнения всех этих процедур коснитесь кнопки **DONE** (рис. 13).

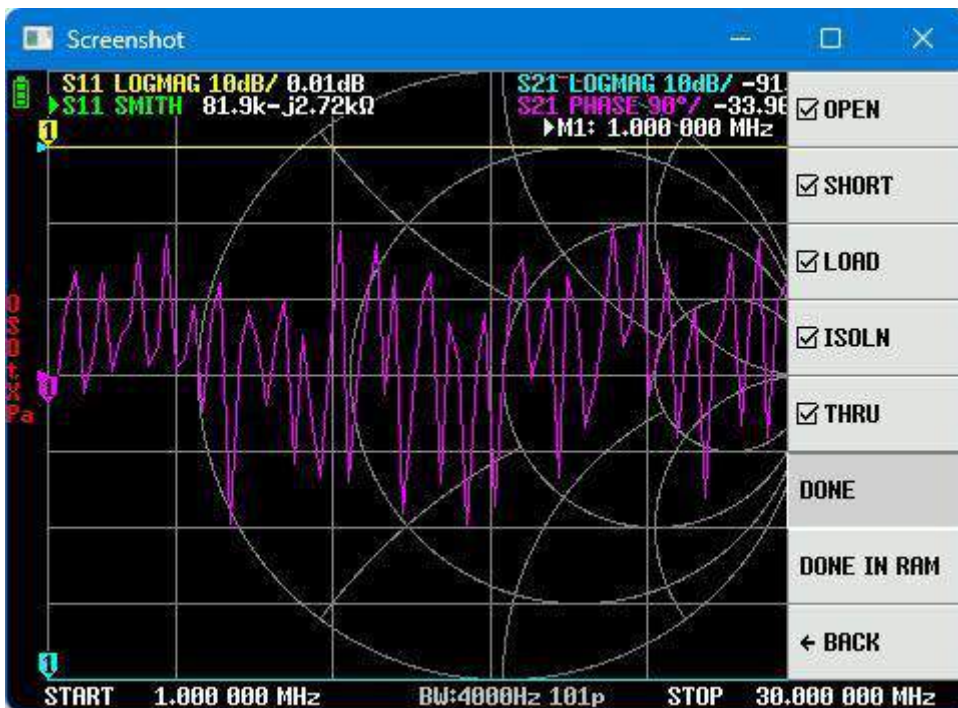


Рис. 13. Кнопка DONE

Выберите стилусом слот для сохранения данных калибровки или SD-карту (рис. 14).

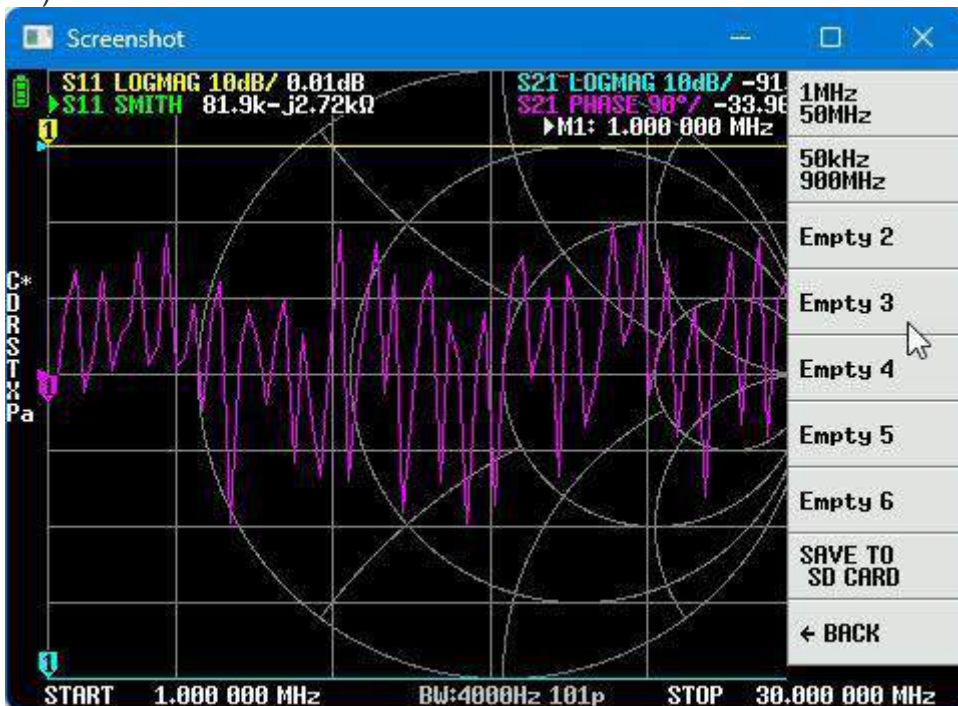


Рис. 14. Выбор слота для сохранения данных калибровки

Обратите внимание, что после выполнения калибровки слева на экране появится вертикальная строка вида «Cn D R S T X», где вместо n будет номер ячейки, в которой были сохранены данные калибровки. На рис. 15 эта строка отмечена зелёной стрелкой.

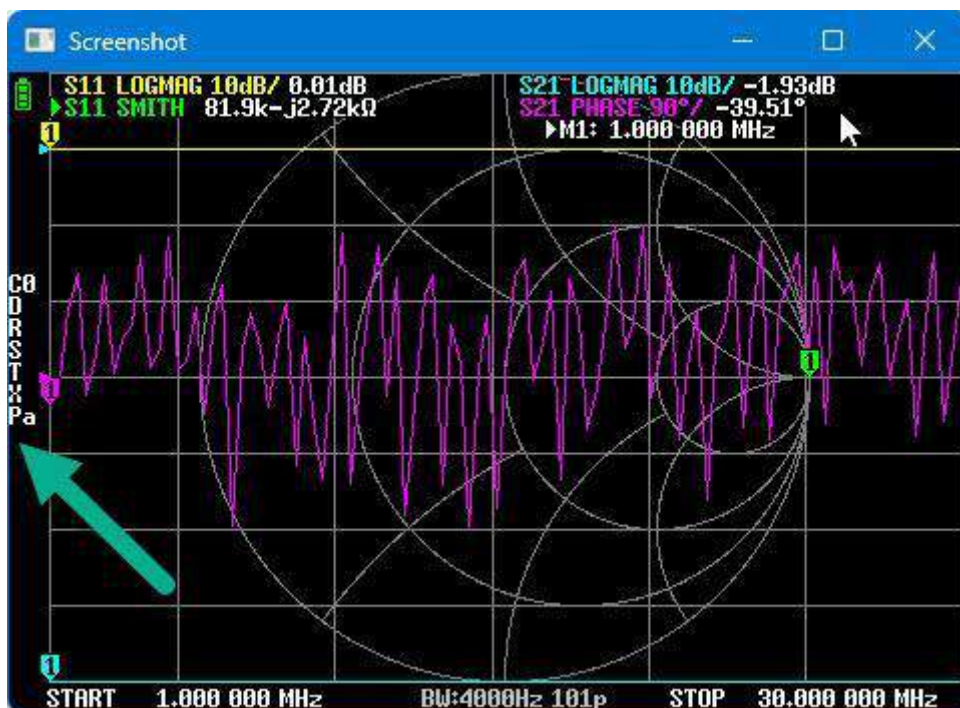


Рис. 15. Калибровка выполнена

Для повышения точности калибровки используйте эталоны из комплекта NanoVNA. Некачественные эталоны снизят точность калибровки. Кроме того, лучше всего выполнять калибровку сразу перед проведением измерений. Так уменьшится влияние изменения температуры.

#### Калибровка NanoVNA через программу NanoVNA-Saver

Для прибора NanoVNA создана бесплатная программа [NanoVNASaver](#), доступная на платформах Windows, Linux и macOS. Её удобный графический интерфейс заметно облегчает работу с NanoVNA при помощи компьютера.

Я установил эту программу в Microsoft Windows, загрузив файл архива [NanoVNASaver.x64.zip](#). В архиве находится программа `nanovna-saver.exe`, которую можно сохранить на диске компьютера и запускать без установки и настройки. Если при запуске появится предупреждение о защите компьютера, щёлкните ссылку **Подробнее**, а затем кнопку **Выполнить в любом случае**.

Подключив NanoVNA к компьютеру через порт USB и запустив программу `nanovna-saver.exe`, найдите в левом нижнем углу окна программы блок **Serial port control**. Для поиска USB-порта, к которому подключено устройство, щёлкните кнопку **Rescan**, а для подключения его к программе — кнопку **Connect to device**. После подключения на этой кнопке появится надпись **Disconnect** для отключения устройства (рис. 16).

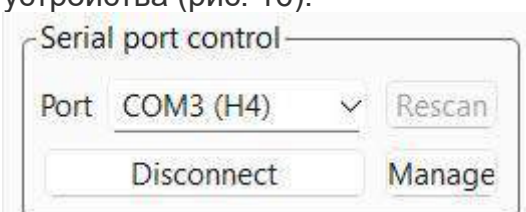


Рис. 16. Блок Serial port control

При калибровке устройства через NanoVNA-Saver нужно выполнить те же самые действия, что были описаны ранее.

Вначале выберите диапазон сканирования в блоке **Sweep control** (рис. 17), расположенном слева сверху окна программы (поля **Start** и **Stop**).

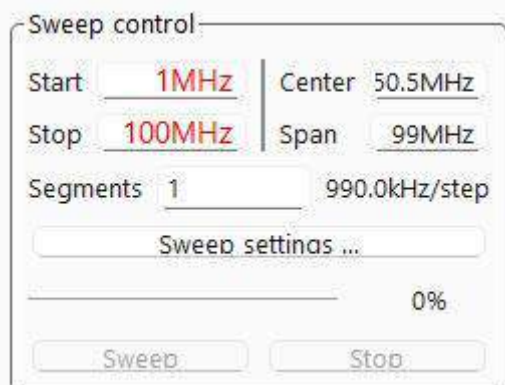


Рис. 17. Выбор диапазона сканирования

Теперь запустите калибровку, щёлкнув кнопку **Calibration**, расположенную под блоком **Serial port control**. Появится окно **Calibration** (рис. 18).

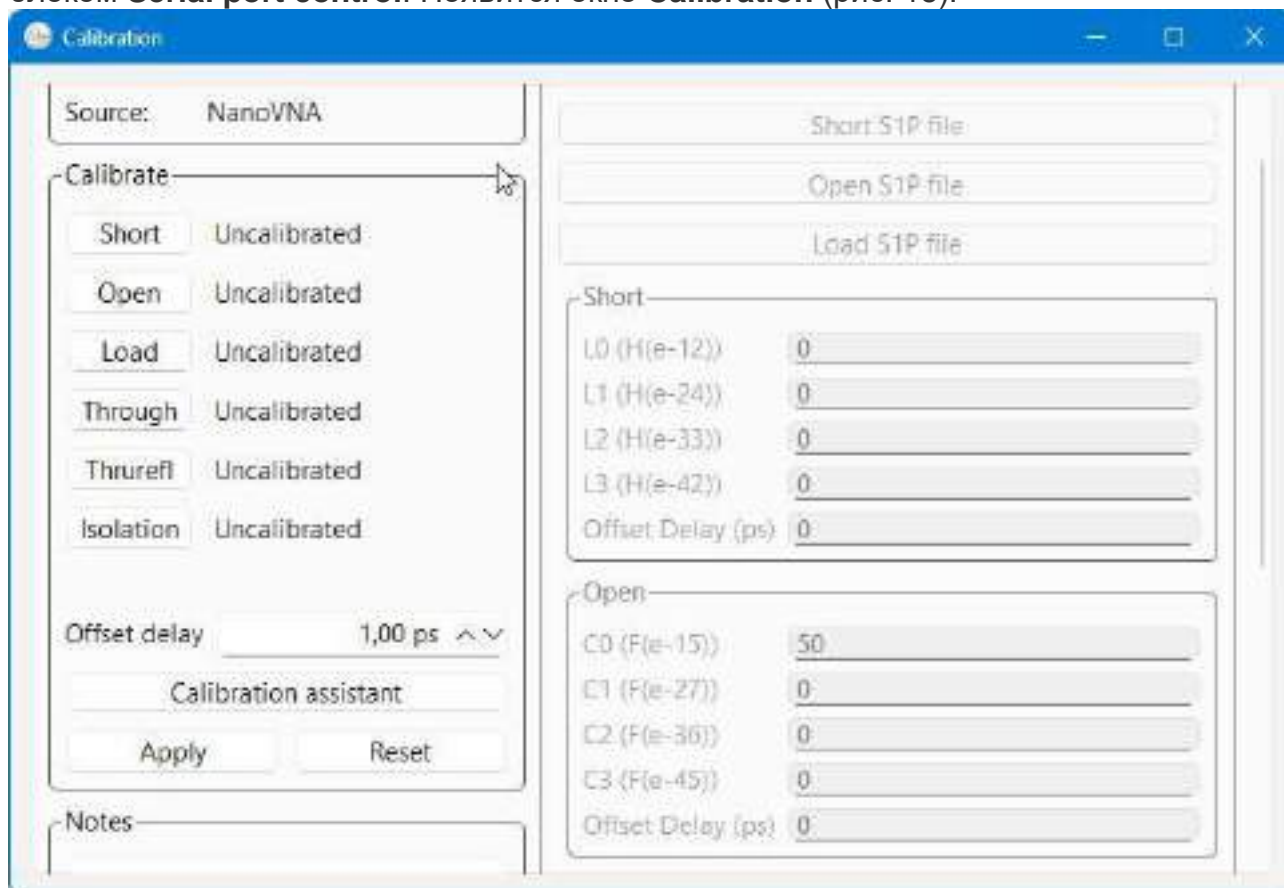
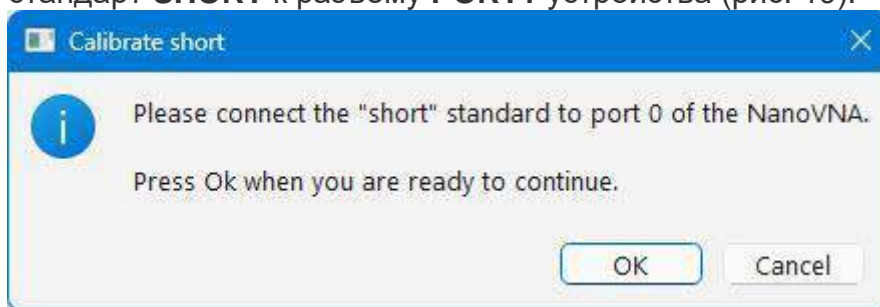


Рис. 18. Окно Calibration

Щёлкните здесь кнопку **Calibration assistant** и выполните предложенные вам действия.

В первом окне мастера калибровки вас попросят подготовить необходимые эталоны, о которых я уже рассказывал. Для запуска процесса калибровки щёлкните кнопку **OK**. На экране появится сообщение о том, что нужно подключить стандарт **SHORT** к разъёму **PORT1** устройства (рис. 19).

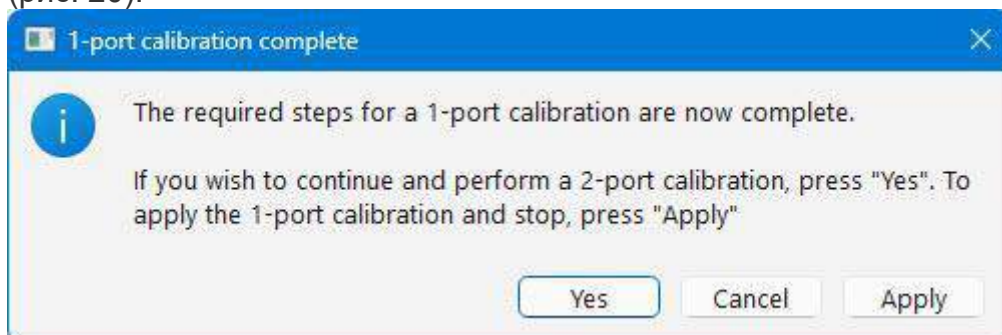


**Рис. 19. Сообщение о подключении стандарта SHORT к разъёму PORT1**

Подключите требуемый стандарт и щёлкните кнопку **OK**.

Далее вам будут предложены действия по подключению других стандартов. Выполняйте необходимые подключения, нажимая кнопку **OK** в появляющихся окнах.

Когда калибровка по первому порту будет закончена, появится вопрос о том, нужно ли остановить калибровку или выполнить калибровку по второму порту (рис. 20).



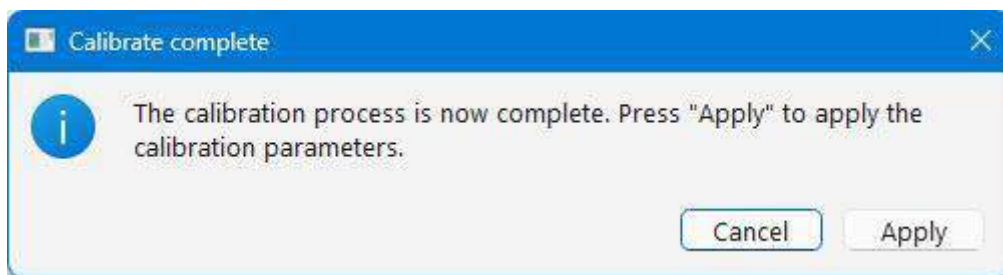
**Рис. 20. Предложение выполнить калибровку по второму порту**

Так как мы будем получать характеристики фильтров, нам потребуются оба порта. Щёлкните кнопку **Yes** для продолжения калибровки.

Выполните шаги **Isoln** и **Thru**. Для первого из них оставьте эталон **LOAD 50Ω** подключенным к **PORT1**, а к разъёму **PORT2** либо не подключайте ничего, либо еще один эталон **LOAD 50Ω** (если у вас есть два таких эталона). Щёлкните кнопку **OK**.

При калибровке в режиме **Thru** соедините разъёмы **PORT1** и **PORT2** кабелем SMA Male-Male и щёлкните кнопку **OK**.

На экране появится сообщение о завершении калибровки (рис. 21).



**Рис. 21. Сообщение о завершении калибровки**

Щелкните кнопку **Apply** чтобы применить результаты калибровки. Для сохранения калибровки в файле воспользуйтесь кнопкой **Save calibration**. Кнопка **Load calibration** позволяет загрузить из файла выполненную ранее калибровку.

### Тестирование фильтров

Если вы уже откалибровали NanoVNA, переходите к измерениям. Замечу, что калибровку нужно делать в том же диапазоне частот, в котором эти измерения будут проводиться.

#### Подключение фильтра

Подключите фильтр к разъёмам NanoVNA через кабель, с которым выполнялась калибровка (рис. 22).



**Рис. 22. Подключение фильтра к разъёмам NanoVNA**

#### Просмотр результатов измерений

После подключения фильтра на экране NanoVNA появятся результаты измерений. Если их нет, убедитесь, что в кнопке **PAUSE SWEEP** не установлен флажок (рис. 23).

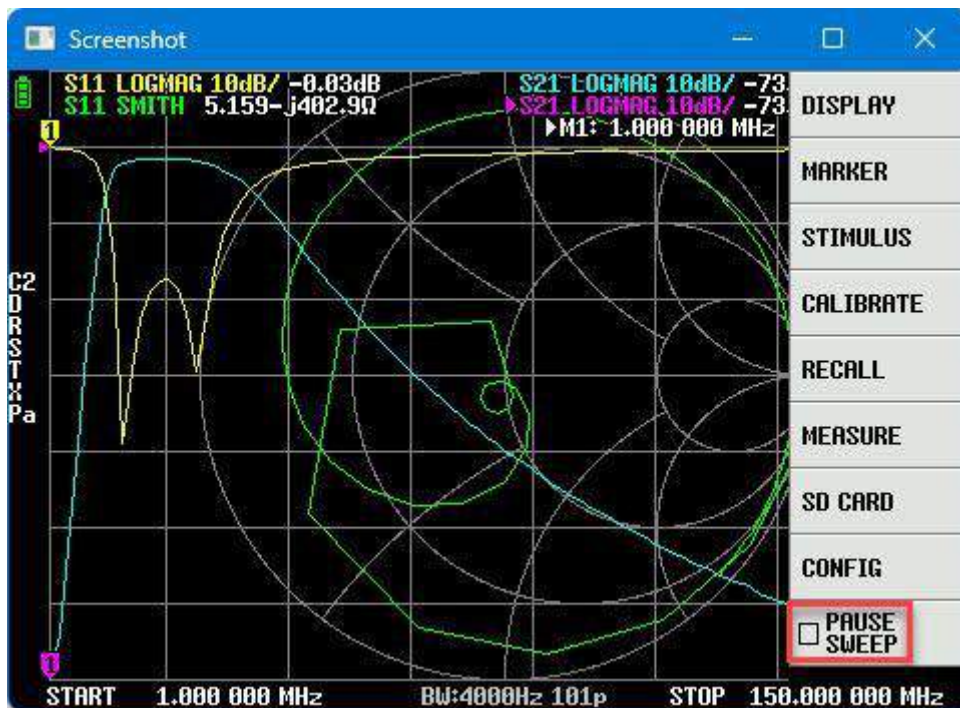


Рис. 23. Флажок в строке меню PAUSE SWEEP

По умолчанию NanoVNA выполняет измерения автоматически, одно за другим. Но если отметить флажок в строке меню **PAUSE SWEEP**, измерения будут приостановлены.

#### Настройка отображаемых данных

Чтобы указать, какие именно графики нужно показывать на экране NanoVNA, воспользуйтесь меню **DISPLAY** (рис. 24).

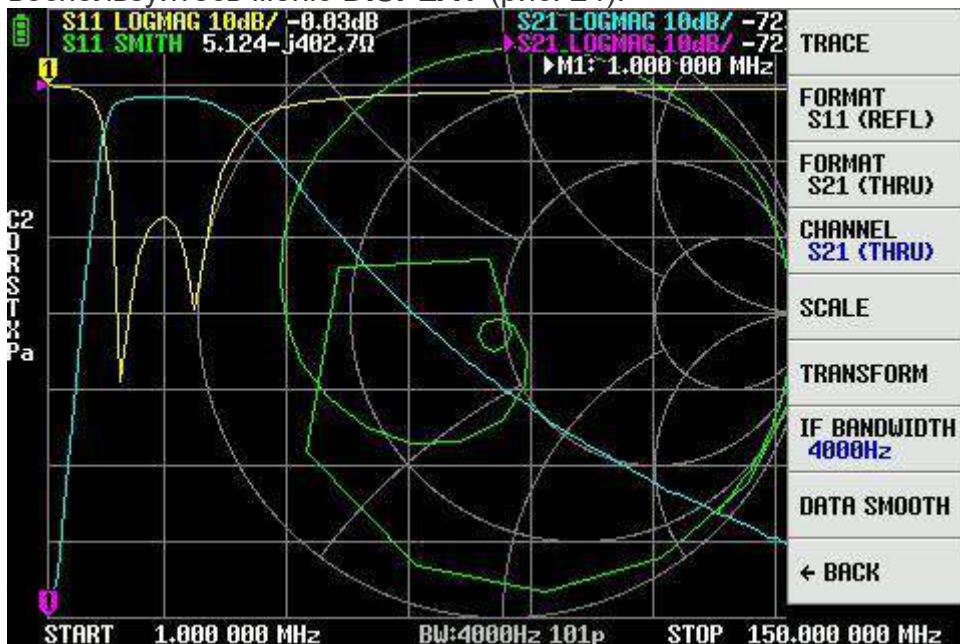


Рис. 24. Строки меню DISPLAY

Кнопка **TRACE** позволяет включать или выключать нужные графики. На рис. 25 я отключил все графики, кроме S21, позволяющего измерить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) фильтра.

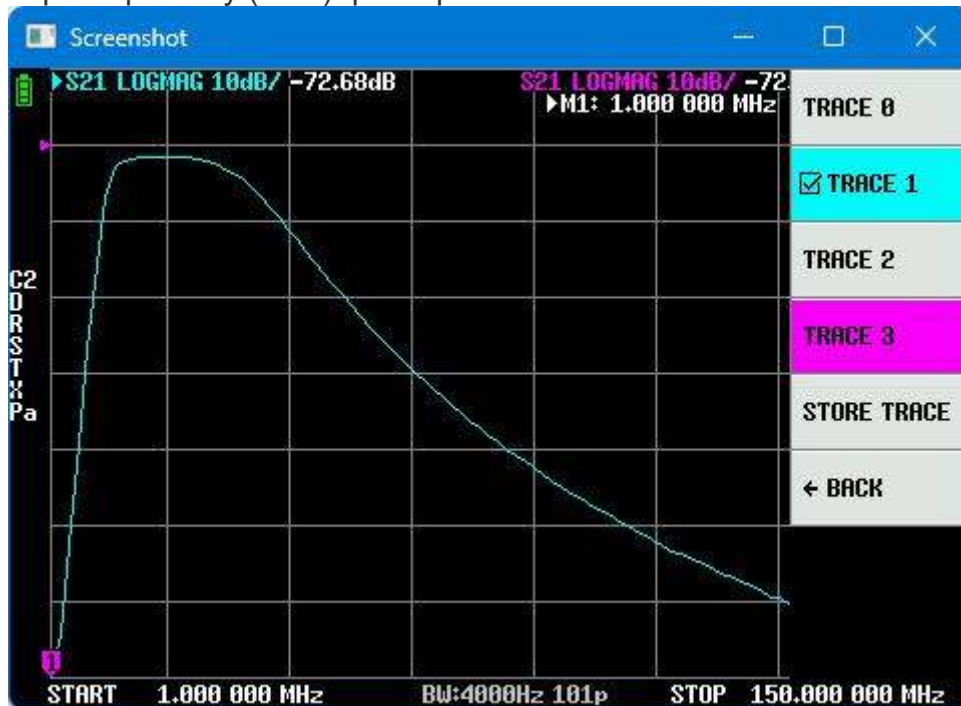


Рис. 25. Включен только график S21

Передвигая стилусом метку фиолетового цвета, обозначенную цифрой 1, можно определить затухание фильтра на нужной вам точке АЧХ (рис. 26).

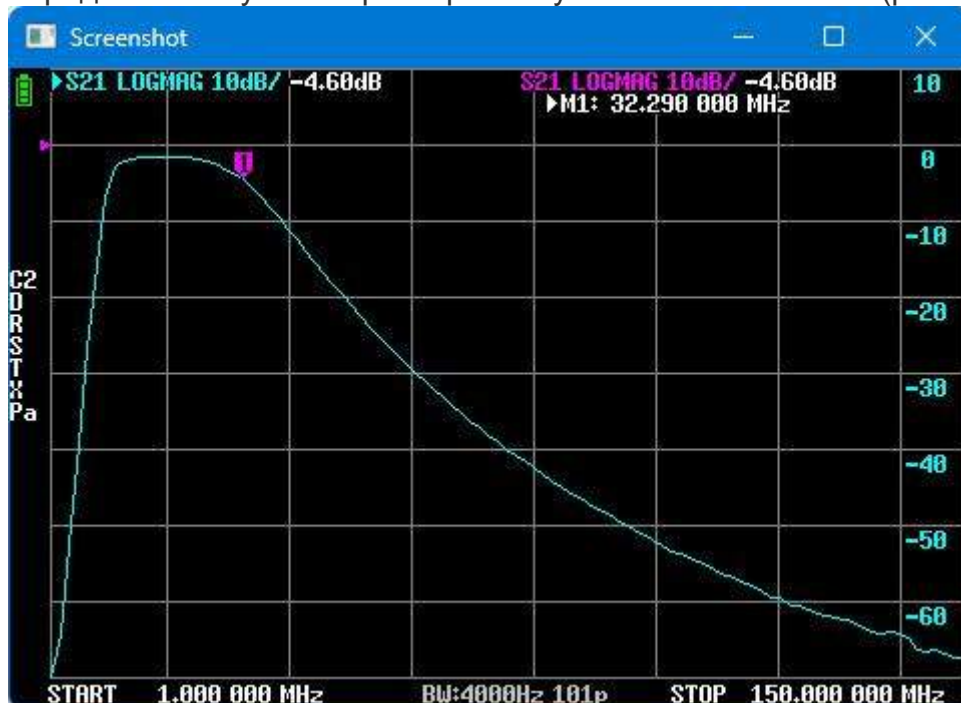


Рис. 26. Определение затухания фильтра в заданной точке

С помощью кнопки **FORMAT** выбирайте тип отображения. Ниже представлены некоторые форматы, доступные в моей версии прошивки NanoVNA-H 4:

- LOGMAG: логарифм абсолютного значения результатов измерений;
- PHASE: фаза сигнала в диапазоне от  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ ;

- DELAY: задержка в ns;
  - SMITH: диаграмма Смита;
  - POLAR: полярная система координат;
  - LINEAR: абсолютные значения результатов измерений;
  - REAL: действительная часть S-параметра;
  - IMAG: мнимая часть S-параметра.
- Строка **CHANNEL** меню **DISPLAY** нужна для указания, что именно измерять:
- CH0 = S11 (отражение);
  - CH1 = S21 (передача).

## Исследование с помощью программы NanoVNA-Saver

Подключитесь из программы NanoVNA-Saver к устройству NanoVNA, как я описывал ранее в этой статье, и выполните калибровку в интересующем вас диапазоне с помощью NanoVNA-Saver. Главное окно этой программы показано на рис. 27.

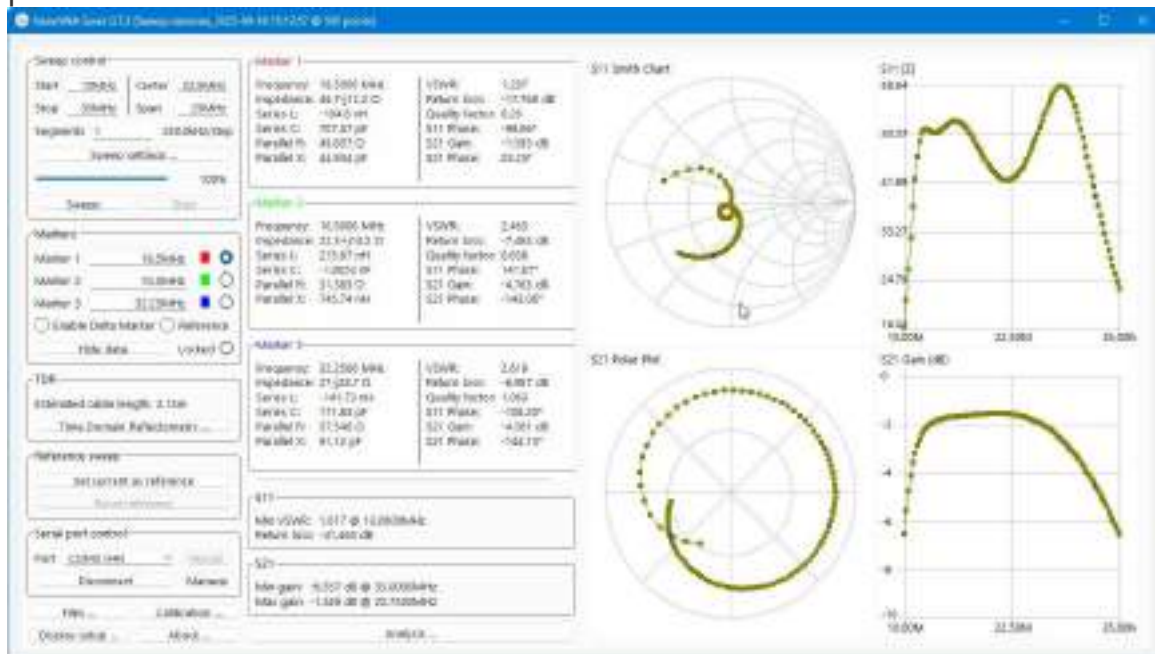


Рис. 27. Главное окно программы NanoVNA-Saver

Чтобы настроить правую часть окна с графиками, щёлкните кнопку **Display setup** и в блоке **Displayed chars** укажите, какие графики нужно показать. На рис. 28 отображается только график **S21 Gain**.

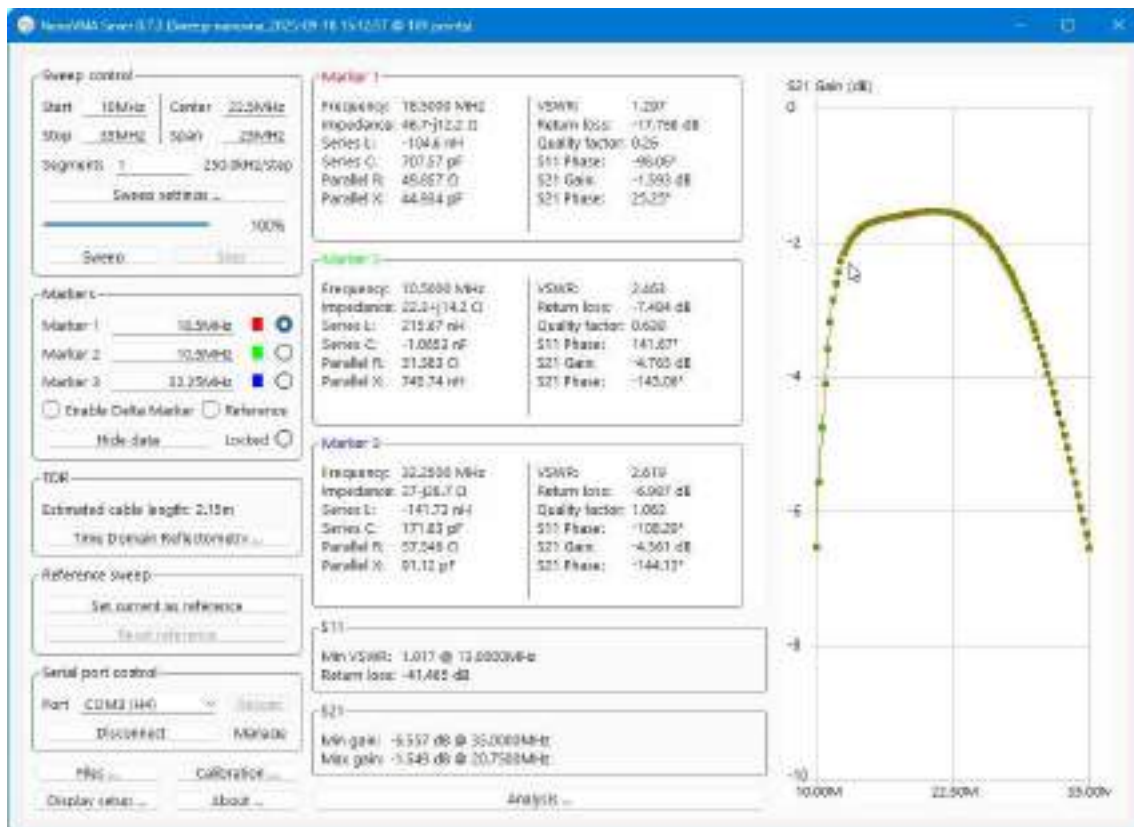


Рис. 28. Выбран только график S21 Gain

Большой интерес представляет анализатор, встроенный в программу NanoVNA-Saver. Запустив сканирование кнопкой **Sweep**, щелкните кнопку **Analysis**, расположенную в самом низу окна программы. Появится окно анализатора (рис. 29).

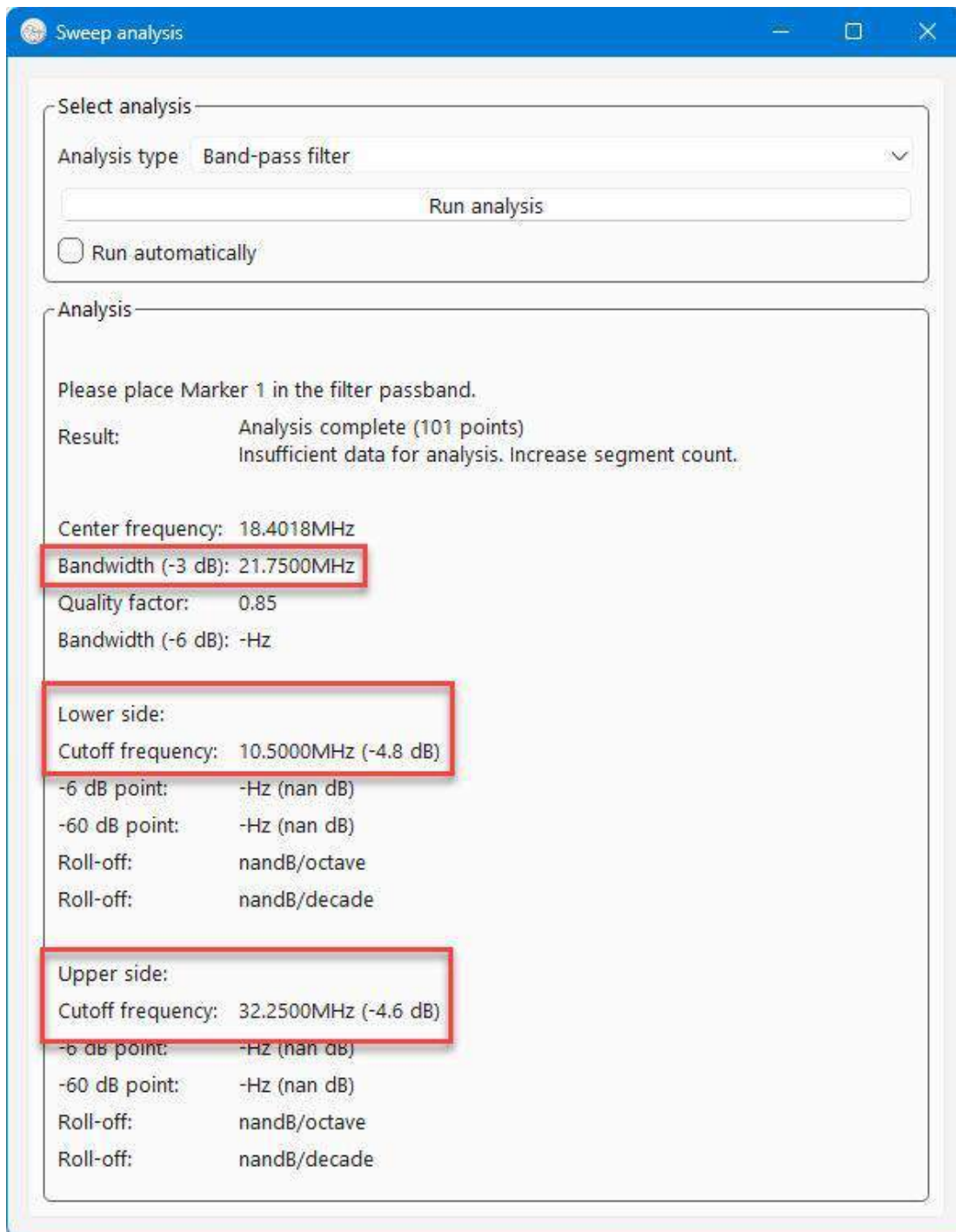


Рис. 29. Окно анализатора

Выберите в списке **Analysis type** тип анализа. В нашем случае мы исследуем полосовой фильтр, поэтому я выбрал **Band-pass filter**. Далее щёлкните кнопку **Run analysis**, и в блоке **Analysis** будут показаны результаты.

В окне анализатора видно, что нижняя и верхняя частота среза по уровню -3dB составила 10.5 МГц и 32.25 МГц, соответственно. При этом измеренная ширина полосы пропускания равна 21.75 МГц.

Тестирование малошумящего антенного усилителя

Для тестирования малошумящего усилителя (Low-Noise Amplifier, LNA), показанного на рис. 30, я подключил его вход к разъёму **PORT1** анализатора, а выход — к разъёму **PORT2**.



**Рис. 30. Тестируемый LNA**

Диаграмма **S21 Gain**, показанная на рис. 31, снята в диапазоне частот от 0.1 МГц до 1.5 ГГц.



**Рис. 31. Диаграмма S21 Gain для тестируемого LNA**

Видно, что АЧХ этого усилителя в заявленном диапазоне частот далека от линейной.

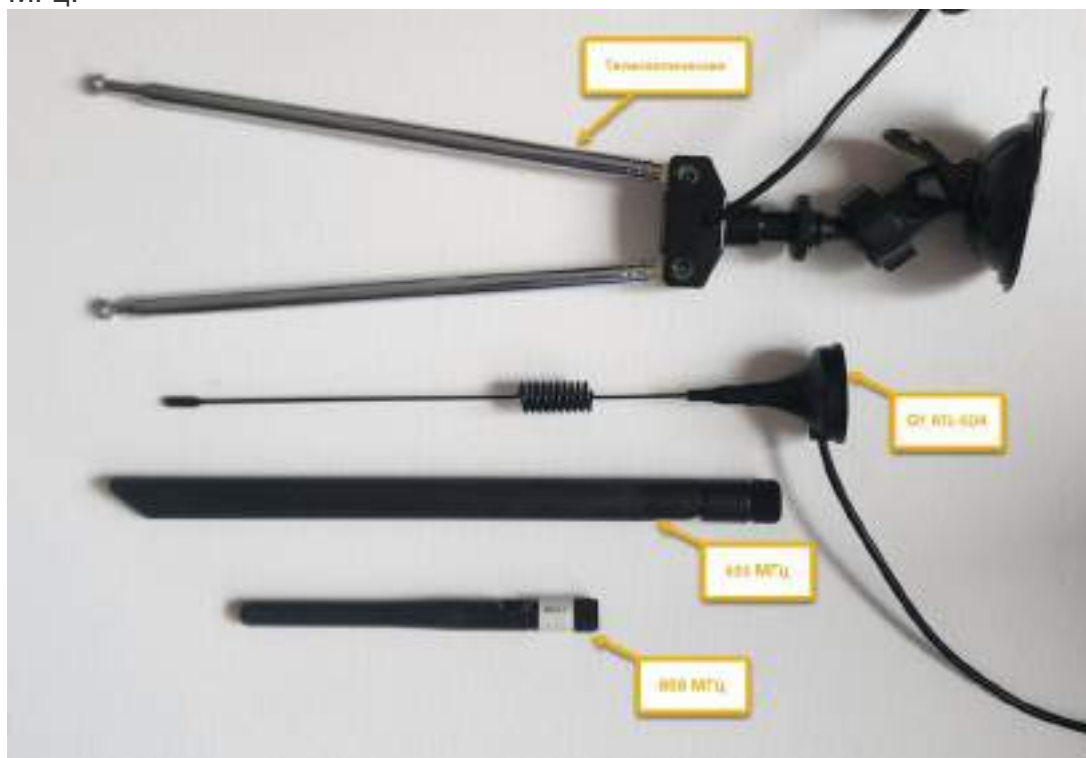
Здесь я открыл диаграмму в отдельном окне, щелкнув правой клавишей мыши график в главном окне программы и выбрав из контекстного меню строку **Popout chart**.

Исследуя усилители подобным образом, вы можете определить, в каком диапазоне частот они пригодны для работы и какое при этом обеспечат усиление сигнала.

## Тестирование антенн

С помощью NanoVNA очень удобно определять параметры антенн, такие как КСВ для нужных вам частот, возвратные потери, полное сопротивление, необходимость и способы согласования.

В качестве примера проведём тестирование антенн — нескольких штыревых и одной телескопической (рис. 32). Сначала займёмся штыревой антенной на 433 МГц.



**Рис. 32. Антенны для тестирования**

Тестирование штыревой антенны на 433 МГц

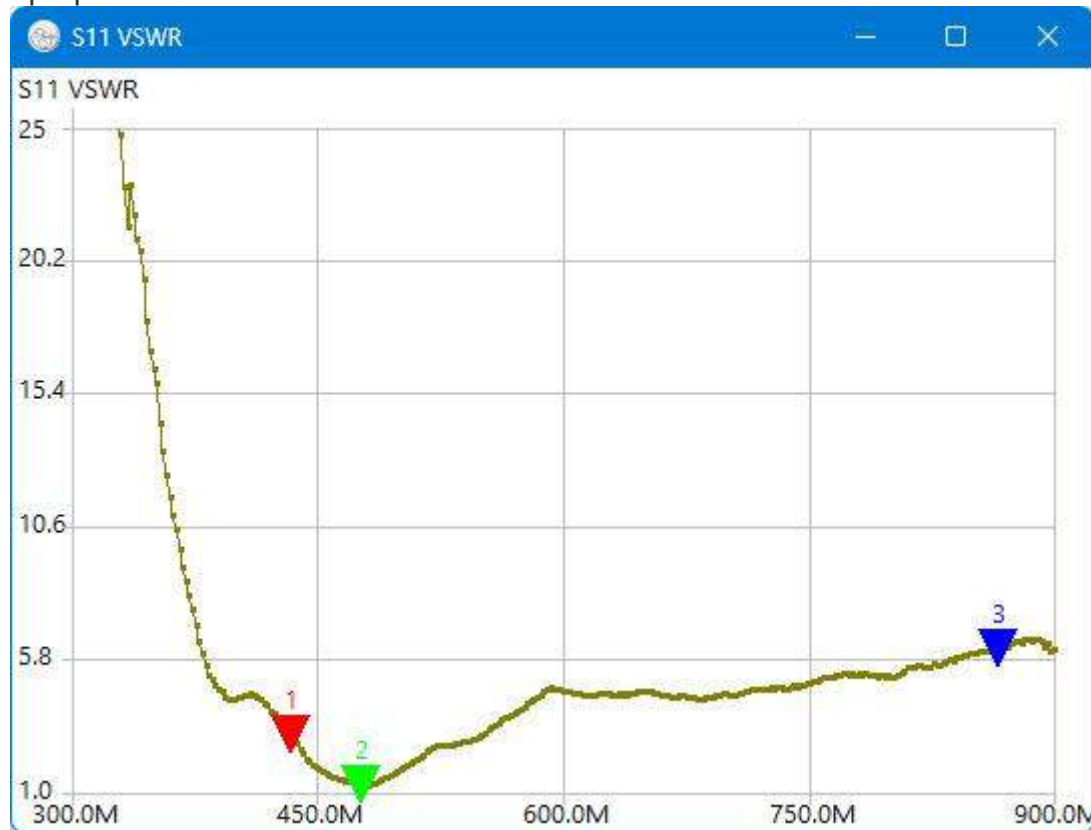
Выполняем калибровку NanoVNA для диапазона от 1 МГц до 1.5 ГГц, затем подключаем антенну к разъёму **PORT1**.

В разделе **Display setup** включаем отображение графиков **S11 VSWR** и **S11 Return Loss**. В блоке **Sweep Control** задаём диапазон частот от 300 МГц до 1.5

ГГц и увеличиваем параметр **Segments** до 3 чтобы увеличить количество точек на графике.

Далее запускаем сканирование кнопкой **Sweep**.

График **S11 VSWR** показывает изменения КСВ в зависимости от частоты (рис. 33).



**Рис. 33. Изменение КСВ в зависимости от частоты**

На рис. 34 показаны значения частот трёх меток, а также значения параметров, измеренные для соответствующих этим меткам частот.



**Рис. 34. Результаты измерений для частот в контрольных точках**

Как видите, минимальный КСВ, равный 1.265, получился при частоте 476.821 МГц. Для частоты 433 МГц значение КСВ получилось хуже, и оно равно 3.08. А вот на частоте 866 МГц параметр КСВ составил целых 6.158.

Если для приёмника КСВ порядка 2-3 ещё допустим, то для передатчика большой КСВ приведёт к существенным потерям. Вы можете узнать к каким из статьи [“Таблица потерь мощности в зависимости от КСВ”](#).

Что касается частоты 433 МГц, то для неё измеренный импеданс равен  $24.9 - j33.5$  Ом. Это означает, что реальная часть сопротивления равна 24.9 Ом, а реактивная отрицательная (ёмкостная) и равна 33.5 Ом.

В данном случае наличие ёмкостной составляющей означает, что для частоты 433 МГц антенна короче, чем нужно. При этом идеальный импеданс равен  $50 + j0$  Ом.

Для частоты 476.8 МГц импеданс равен  $39.9 + j3.11$  Ом. Измеренный КСВ равен 1.265, что уже лучше. В данном случае антенна имеет избыточную индуктивность 3.11 Ом. Для её компенсации последовательно с антенной можно включить

конденсатор. Помимо конденсатора, нужно увеличить сопротивление с 39.9 Ом до 50 Ом, так как такое сопротивление обычно имеют коаксиальные фидеры.

Анализируя параметры антенны на частоте 866 МГц видим, что тут всё плохо.

На рис. 35 показан график возвратных потерь.



**Рис. 35. График возвратных потерь**

Из него видно, что минимальные возвратные потери будут на частоте метки 2 при частоте 476.8 МГц.

Тестирование штыревой антенны на 866 МГц

Подключим к NanoVNA короткую антенну на 866 МГц и выполним сканирование в диапазоне от 400 МГц до 1.5 ГГц. На рис. 36 показан график КСВ, а на рис. 37 — результаты измерений.

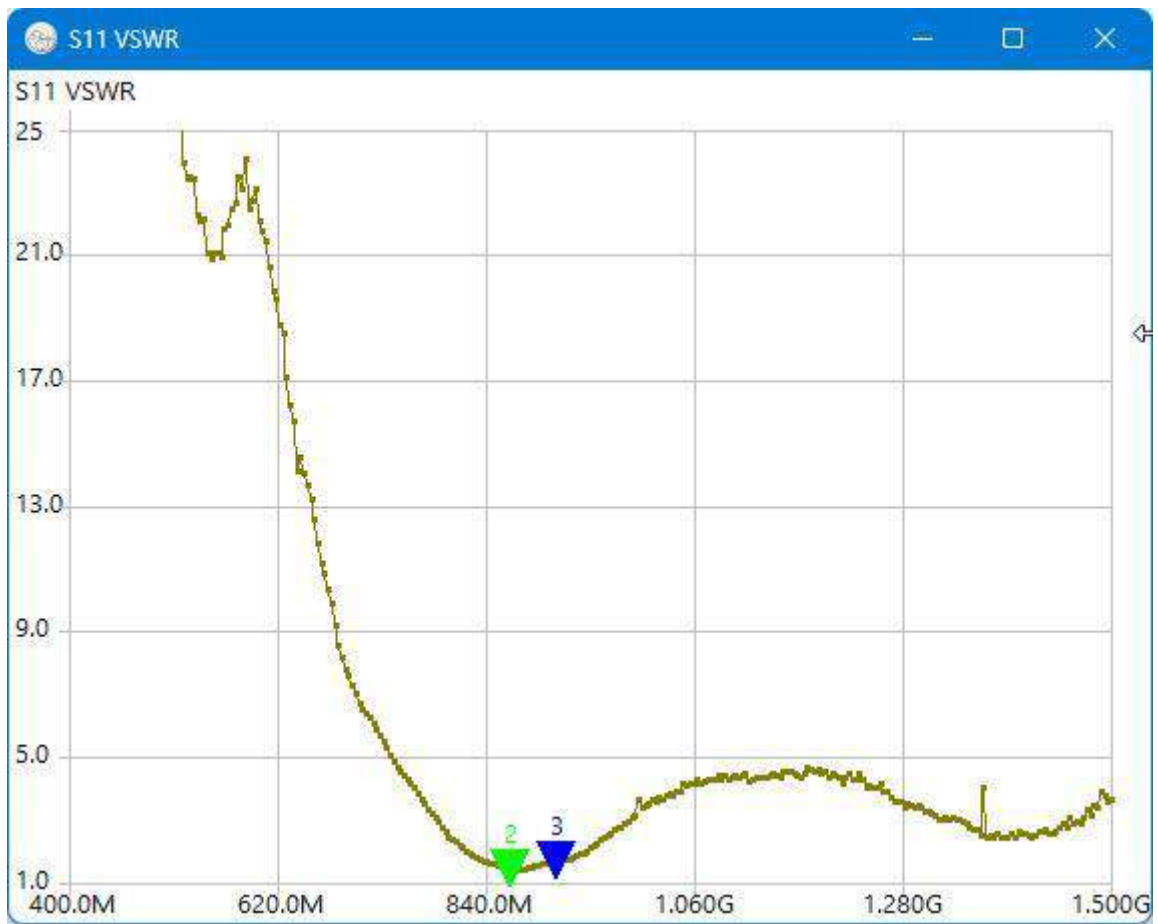


Рис. 36. График КСВ



Рис. 37. Результаты измерений для антенны на 866 МГц

Как видите, антенна неплохо подходит для частот 866 МГц и 915 МГц, однако у неё очень плохие параметры на частоте 433 МГц.

#### Телескопическая антенна

Для телескопической антенны в полностью раскрытом виде минимальный КСВ получился при частоте 68.87 МГц (рис. 38).



**Рис. 38. График КСВ для полностью раскрытой телескопической антенны**

На рис. 39 показаны результаты измерений параметров полностью раскрытой телескопической антенны.



**Рис. 39. Параметры полностью раскрытой телескопической антенны**

Как видите, на частоте 29.9934 МГц у этой антенны очень большой КСВ, равный 10.229. Укорачивая телескопическую антенну, можно увеличить частоту, на которой КСВ будет минимальный.

#### Штатная антенна от RTL-SDR Blog V4

В комплекте с приёмником RTL-SDR Blog V4 поставляется штыревая антенна с удлиняющей катушкой. На рис. 40 показан график изменения КСВ такой антенны при сканировании в диапазоне частот от 90 МГц до 1500 МГц.



**Рис. 40. График КСВ для штатной антенны RTL-SDR Blog V4**

Из этого графика видно, что минимальный КСВ соответствует частотам 225.397 МГц, 1 ГГц и частотам, примерно равным 1.4 ГГц (рис. 41).



**Рис. 41. Параметры штатной антенны приёмника RTL-SDR Blog V4**

Далее в статье я расскажу на примере этой антенны применение диаграммы Смита.

Диаграмма Смита

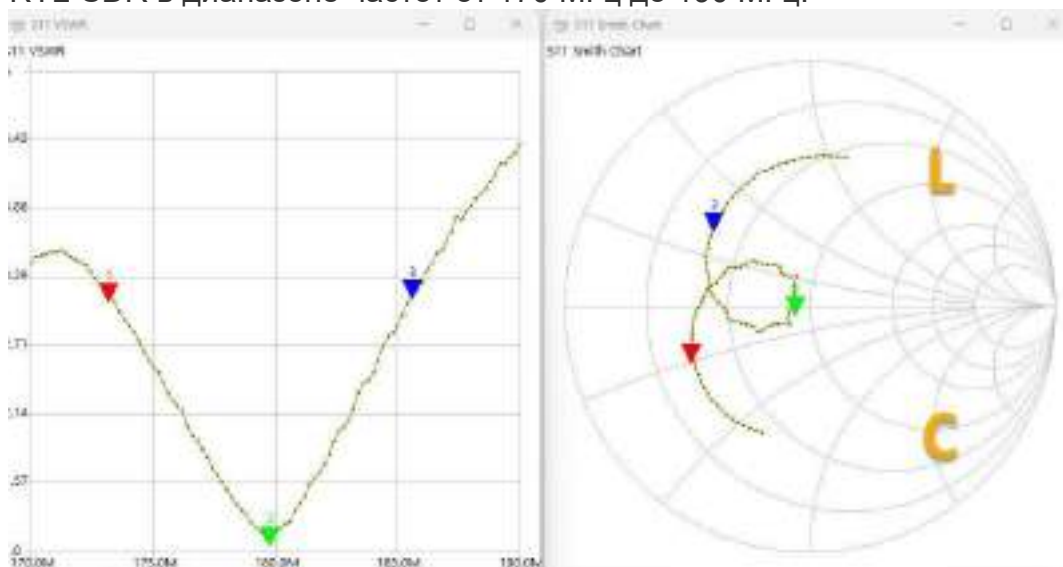
Диаграмма Смита полезна для визуального представления полных сопротивлений (импедансов) в зависимости от частоты. Она удобна для проверки согласования цепей при использовании одного порта анализатора.

Диаграмма построена так, что на ней могут быть представлены любые значения импедансов от нуля до бесконечности. Верхняя половина диаграммы представляет индуктивную часть, а нижняя половина — емкостную. Горизонтальная ось сопротивлений разграничивает эти две части.

Геометрический центр соответствует активному сопротивлению 50 Ом. Левый конец горизонтальной оси представляет нулевое значение импеданса (короткое замыкание), а правый — бесконечное (разомкнутая цепь).

Цель согласования — переместить точку, соответствующую импедансу согласуемого устройства, к геометрическому центру диаграммы Смита. Этой точке соответствует значение КСВ, равное единице.

На рис. 42 показаны результаты тестирования штатной антенны от приёмника RTL-SDR в диапазоне частот от 170 МГц до 190 МГц.



**Рис. 42. Диаграмма Смита для штатной антенны RTL-SDR Blog V4**

Видно, что минимальное КСВ, равное 1.125, достигается на частоте 179.8 МГц (рис. 43).



Рис. 43. Результаты тестирования антенны RTL-SDR Blog V4

Этой частоте соответствует метка 2 зелёного цвета, расположенная на горизонтальной оси сопротивления. Метка 3 синего цвета находится в верхней, индуктивной части диаграммы Смита, а красная метка 1 — в нижней ёмкостной части диаграммы.

Ниже представлены результаты измерений:

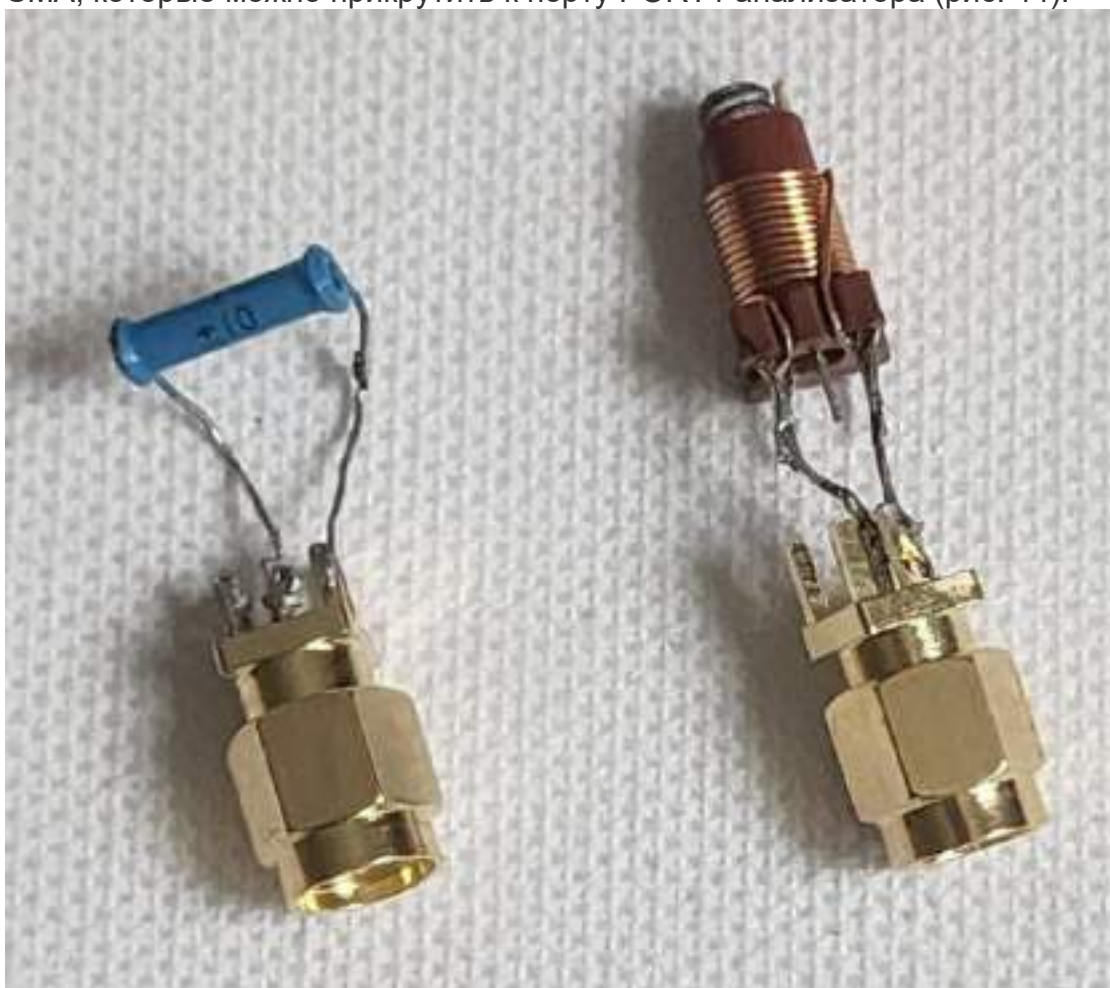
- На частоте **метки 1** импеданс  $16.4 - j8.67$  ёмкостной и равен  $-8.67 \Omega$ . Значение R равно  $16.4 \Omega$ , что значительно ниже  $50 \Omega$ . Для согласования нужно добавить последовательно **ИНДУКТИВНОСТЬ**, чтобы компенсировать ёмкость, а также трансформировать сопротивление (например, LC-цепью или четвертьволновым отрезком линии).
- Для **метки 2** импеданс  $44.4 + j0.307$ . При этом  $R = 44.4 \Omega$ , а индуктивность  $0.307 \Omega$  очень мала. В этой точке антенна резонансная, и дополнительная компенсация для согласования не нужна. Для идеального согласования можно использовать трансформатор или цепь LC.
- **Метке 3** соответствует индуктивный импеданс  $17.8 + j16.8$ . Значение R также ниже  $50 \Omega$ . Здесь для согласования нужно добавить последовательно **ЁМКОСТЬ**, чтобы компенсировать индуктивность, и трансформировать сопротивление до  $50 \Omega$ . Параметры **Series** на рис. X показывают, что нужно добавить последовательно, а параметры **Parallel** — что нужно добавить параллельно, чтобы получить чистые  $50 \Omega$  без реактивности.

Подробное описание диаграммы Смита читайте в статье «[Основы диаграммы Вольперта-Смита](#)», а также в статье «[Диаграмма Смита](#)». Также вам будет полезна статья «[Согласование импеданса с помощью LC-схем](#)».

## Измерение индуктивности и ёмкости

Помимо настройки антенн и фильтров NanoVNA можно с успехом использовать для измерения индуктивностей и ёмкостей. Доступные измерители RCL не всегда могут справиться с малыми ёмкостями и индуктивностями. Кроме того, NanoVNA позволит проводить измерения в широком диапазоне частот, обнаруживая паразитные индуктивности и ёмкости в исследуемых компонентах.

Я подготовился к измерениям, припаяв индуктивность и конденсатор к разъемам SMA, которые можно прикрутить к порту PORT1 анализатора (рис. 44).



**Рис. 44. Индуктивность и конденсатор для измерений**

Выполните калибровку NanoVNA в диапазоне от 1 МГц до 50 МГц и подключите к разъему PORT1 анализатора индуктивность. С помощью меню **Display Setup** включите диаграммы **S11 Serial L** и **S11 Smith Chart**. Запустите сканирование кнопкой **Sweep** и наблюдайте результаты измерения (рис. 45).

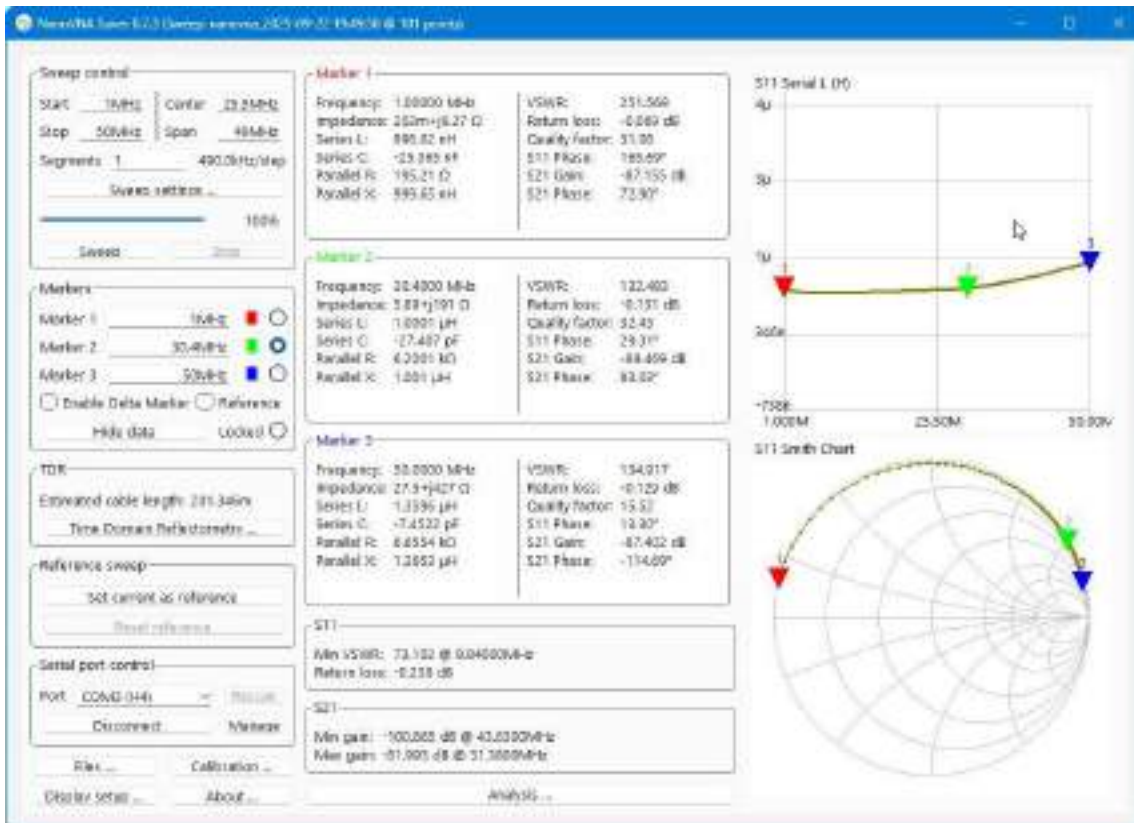


Рис. 45. Результаты измерения индуктивности

Как видите, результаты измерений зависят от частоты. Для диапазона сканирования от 1 МГц до 50 МГц измеренное значение индуктивности составило примерно 1 микрогенри. Небольшой разброс объясняется влиянием паразитных ёмкостей и погрешностей прибора.

График изменений виден на диаграмме **S11 Serial L**. Диаграмма Смита показывает, что к анализатору была подключена индуктивность — все метки находятся в верхней части диаграммы.

Теперь отсоедините катушку, подключите к **PORT1** разъём с конденсатором и запустите сканирование. На рис. 46 показаны результаты изменения ёмкости (была добавлена диаграмма **S11 Serial C**).

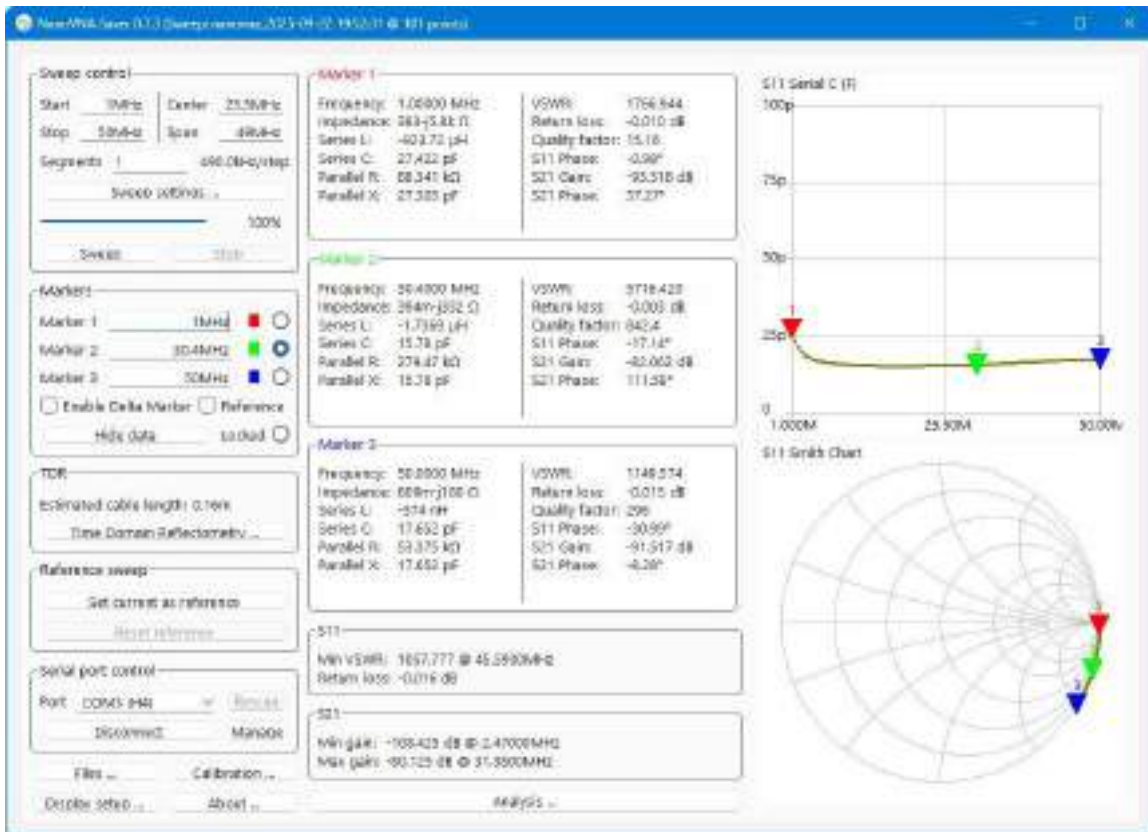


Рис. 46. Результаты измерений ёмкости

Как видно из этого рисунка, измеренная ёмкость в зависимости от частоты изменялась от 15.78 пФ до 27.42 пФ при номинале конденсатора 15 пФ.

Обратите внимание, что теперь все метки расположены в нижней части диаграммы Смита, так как мы подключили к анализатору ёмкость.

Измеряя параметры катушек и конденсаторов с помощью NanoVNA, вы сможете определить диапазоны частот, где в этих устройствах не проявляются паразитные эффекты. Попробуйте проверить подобным образом резисторы различных типов, проволочные, например и вы сможете измерить присущие им паразитные индуктивности и ёмкости.

### Измерение резонансной частоты LC-контура

При измерении резонансной частоты колебательного LC-контура для исключения паразитной индуктивности выводов я припаял этот контур прямо к выводам разъёма SMA (рис. 47).



Рис. 47. Колебательный LC-контур для измерения резонансной частоты

Эта схема была подключена через короткий переходник к порту PORT1 анализатора.

Для определения резонансной частоты я выполнил сканирование в диапазоне от 10 МГц до 50 МГц (рис. 48), включив диаграмму  $S_{11} |Z|$ , показывающей модуль полного импеданса нагрузки.

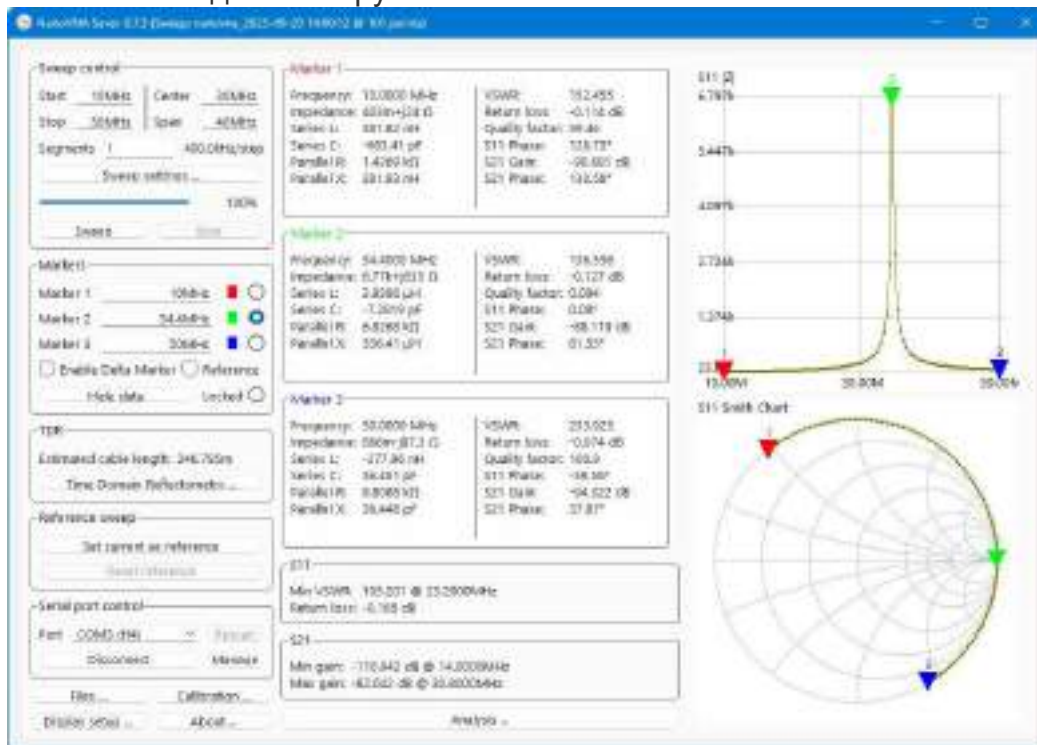


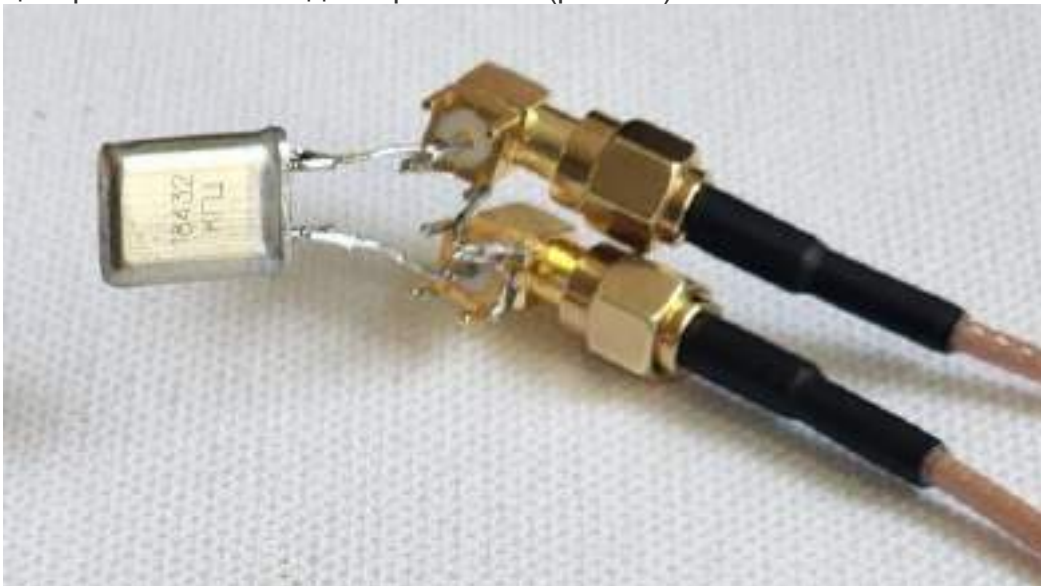
Рис. 48. Определение резонансной частоты LC-контура

В момент резонанса модуль полного импеданса максимален (метка 2), как это и должно быть для параллельного колебательного контура при резонансе. Измеренная частота резонанса составила 34.4 МГц. Также обратите внимание, что метка 2 находится в правой части диаграммы Смита в точке, соответствующей обрыву.

Если схему с колебательным контуром подключить к порту **PORT1** через кабель небольшой длины, используемый для калибровки, то измеренная резонансная частота понизится за счет ёмкости кабеля и составит 31.2 МГц.

### Тестирование кварцевого резонатора

Анализатор NanoVNA поможет вам проверить исправность кварцевых резонаторов и измерить их резонансную частоту. Для тестирования я собрал небольшую схему из двух разъёмов SMA, соединив их земли. Кварц впаян между центральными выводами разъёмов (рис. 49).



**Рис. 49.** Схема для тестирования кварцевого резонатора

В поле **Center** я указал частоту, примерно равную написанной на корпусе резонатора, а общую полосу частот сканирования выбрал равной 1 МГц (рис. 50).

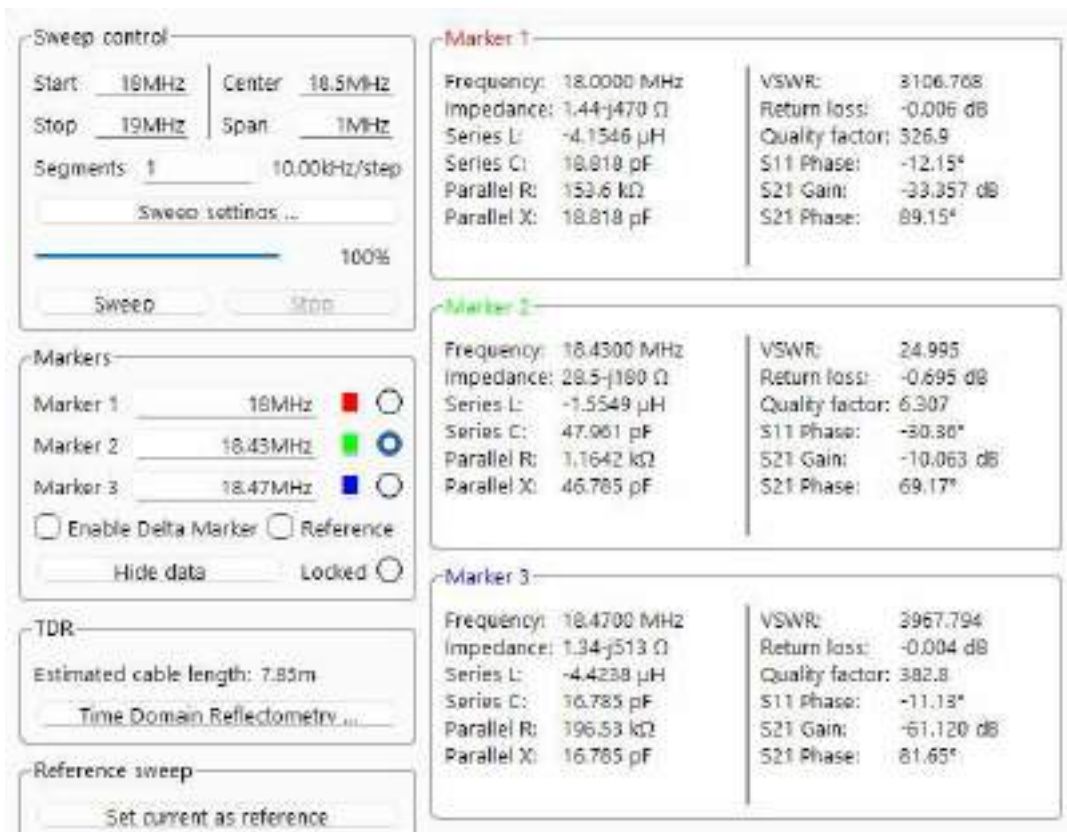
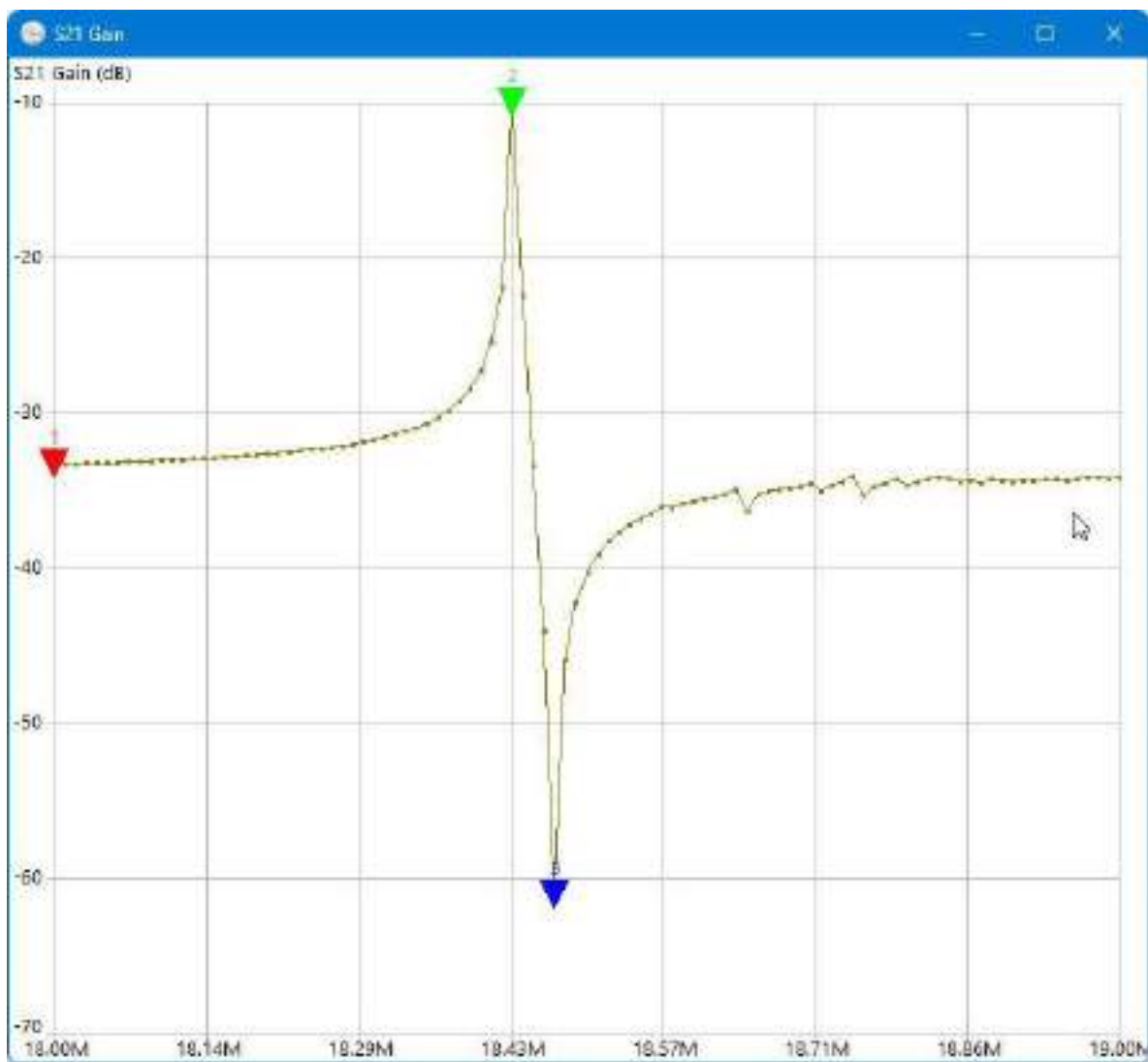


Рис. 50. Установка параметров сканирования для проверки кварцевого резонатора

Результаты сканирования представлены на рис. 51.



**Рис. 51. Результаты сканирования кварцевого резонатора**

Измеренная частота основного резонанса составила 18.43 МГц, что соответствует значению, написанному на корпусе кварца. Частота паразитного резонанса — 18.47 МГц.

### Гетеродинный индикатор резонанса на базе NanoVNA

В радиолюбительской практике для определения резонансной частоты колебательных контуров применялся [гетеродинный индикатор резонанса](#) (ГИР). В этом приборе имеется генератор высокой частоты (гетеродин), частоту которого можно плавно изменять.

Если катушку колебательного контура ГИР поднести к катушке тестируемого колебательного контура гетеродина, то на резонансной частоте будет наблюдаться максимальная отдача энергии из гетеродина. Этот момент фиксируется стрелочным микроамперметром. По градуированной шкале ГИР можно определить резонансную частоту колебательного контура.

В комплекте с ГИР поставляются сменные катушки, позволяющие покрывать относительно широкий диапазон частот (рис. 52).



**Рис. 52.** Современный ГИР с цифровым частотомером и набором сменных катушек (источник)

Но у вас нет необходимости приобретать такой прибор — функцию ГИР можно реализовать с помощью анализатора NanoVNA. Чтобы это сделать, я припаял катушку из трёх витков провода с диаметром намотки 8 мм к разъёму SMA. Далее через короткий кабель я подключил эту катушку к порту **PORT1** анализатора (рис. 53).



**Рис. 53. Катушка для гетеродинного индикатора резонанса**

Для измерения резонансной частоты колебательного контура нужно поднести катушку нашего «ГИР» к колебательному контуру (рис. 54) и запустить сканирование, включив диаграмму **Return Loss**.



**Рис. 54. Измеряем резонансную частоту колебательного контура с помощью ГИР**

На этой диаграмме передвигайте метку до тех пор, пока она не окажется в самой нижней точке (рис. 55).

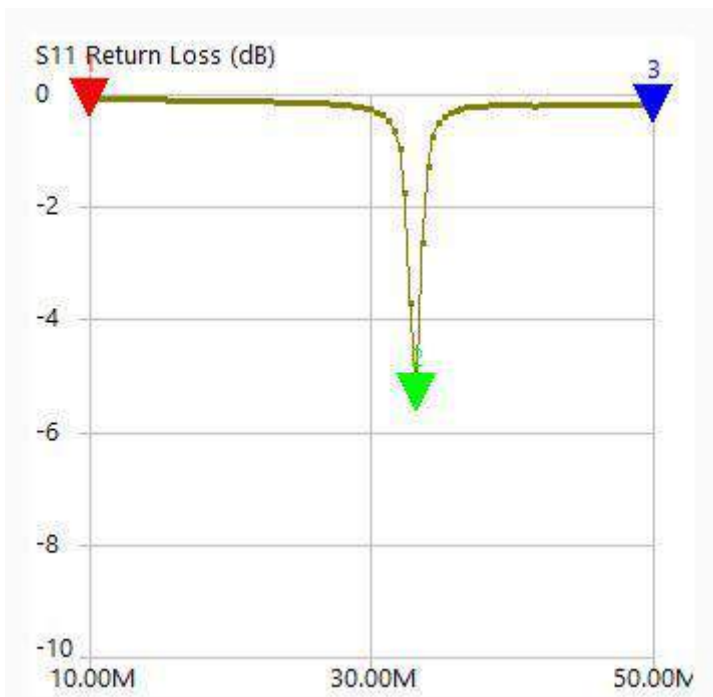


Рис. 55. Метка в нижней точке диаграммы

Эта точка соответствует резонансной частоте контура. В данном случае эта частота оказалась равной 33.2 МГц (рис. 56).

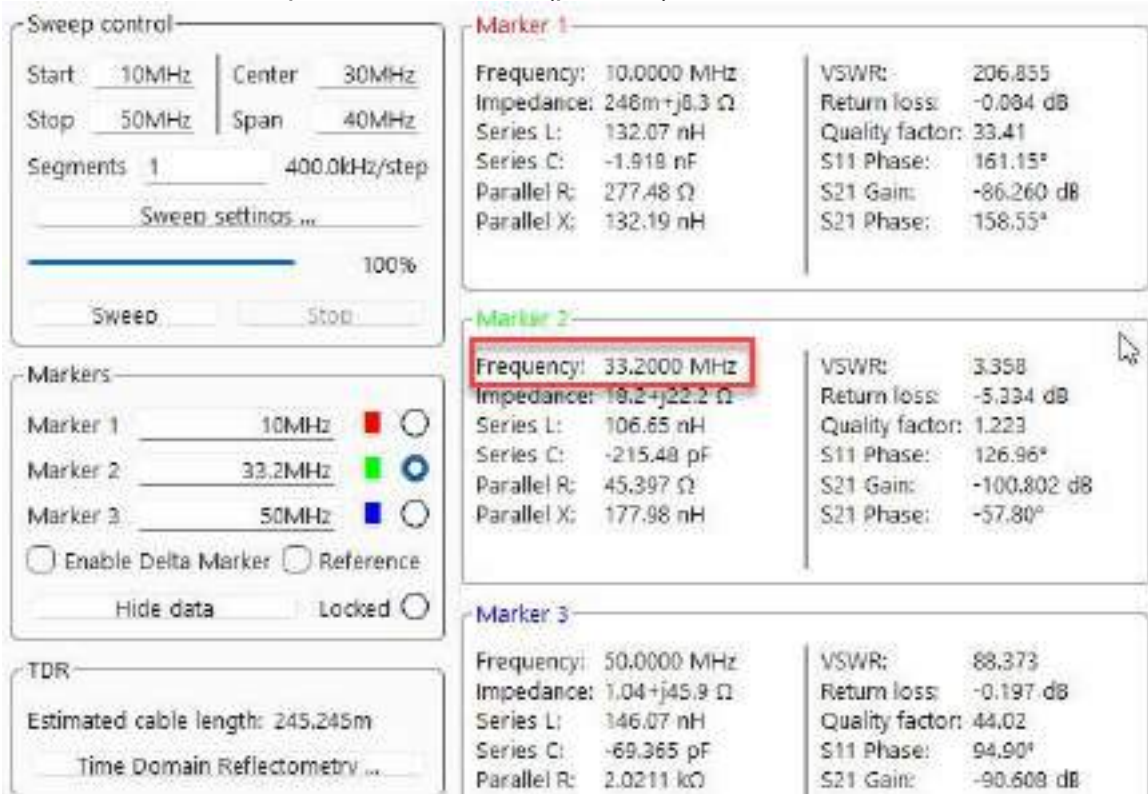


Рис. 56. Измеренная резонансная частота контура

С помощью описанного метода вы сможете определять резонансную частоту колебательных контуров прямо в смонтированной схеме. На рис. 57 показано измерение резонансной частоты выходного П-контура в передатчике 10-метрового диапазона.

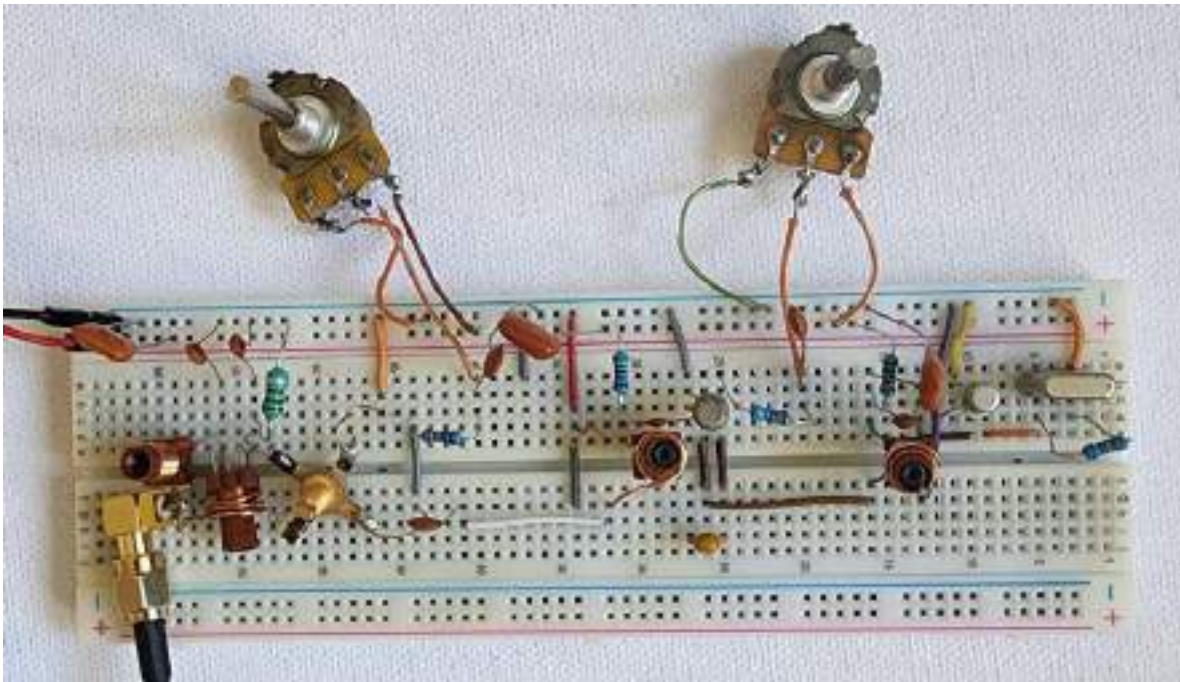


Рис. 57. Измерение резонансной частоты  $\Pi$ -контура в передатчике

По результатам измерений она составила 27.6 МГц (рис. 58).

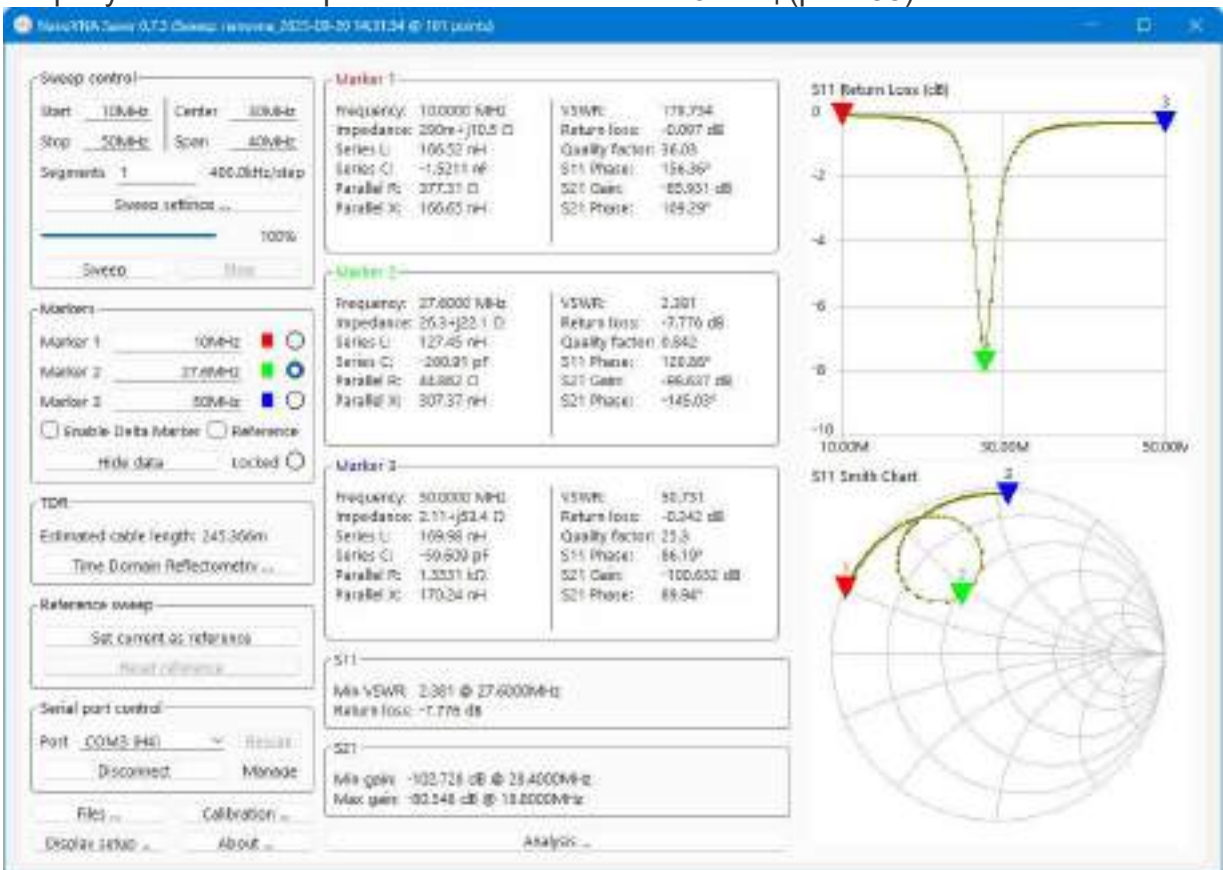


Рис. 58. Результаты изменения резонансной частоты выходного  $\Pi$ -контура передатчика

Тестирование фидера

Когда встает задача тестирования кабеля на обрыв и неоднородности, а также определения его длины, используются такие приборы, как [рефлектометры](#) (рис. 59).

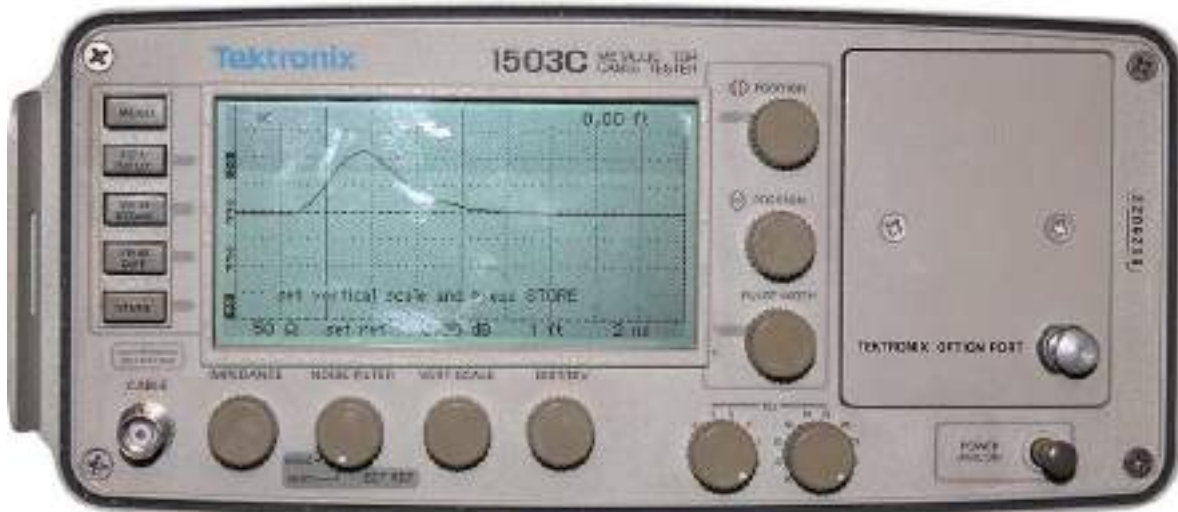


Рис. 59. Рефлектометр Tektronix 1503C (источник)

Принцип действия рефлектометра заключается в генерации импульса на конце кабеля и замер времени до возврата эхоимпульса.

Вы можете использовать NanoVNA в роли такого рефлектометра.

Подключите тестируемый фидер к портам **PORT1** и **PORT2**. Я взял для теста кабель RG174, который идет в комплекте с телескопической антенной. После калибровки в диапазоне от 10 МГц до 1500 МГц я включил диаграмму **S21 Gain** и запустил сканирование (рис. 60).



Рис. 60. Потери в кабеле в диапазоне частот от 10 МГц до 1.5 ГГц

Эта диаграмма позволила мне определить потери в кабеле. Как видно из диаграммы, потери возрастают с ростом частоты и становятся большими на частоте 1.5 ГГц.

На диаграмме  $S_{11} |Z|$  видно значение модуля импеданса, который изменяется от примерно 24 Ом для частоты 1.5 ГГц до 60 Ом для частоты 10 МГц (рис. 61).

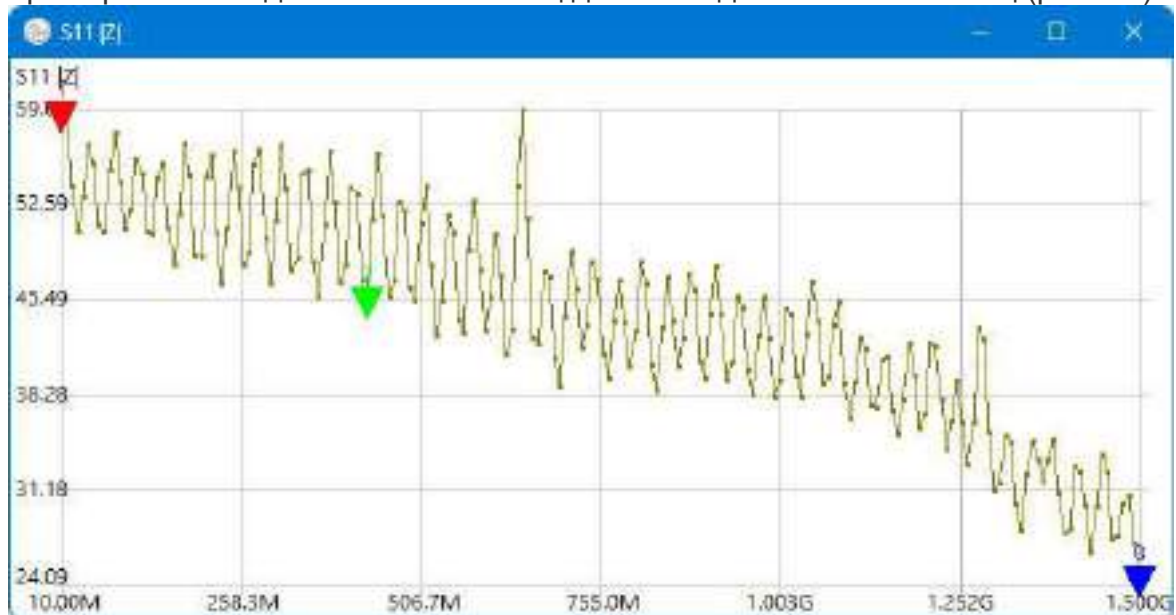


Рис. 61. Диаграмма изменения импеданса

Чтобы определить длину кабеля по отражению сигнала от его конца, подключите один конец кабеля к порту **PORT1**, а на другой поставьте эталон **SHORT** для лучшего отражения сигнала.

Найдите слева в главном окне NanoVNA Saver блок **TDR** и щёлкните в нём кнопку **Time Domain Reflectometry**. На экране появится окно **TDR** (рис. 62).

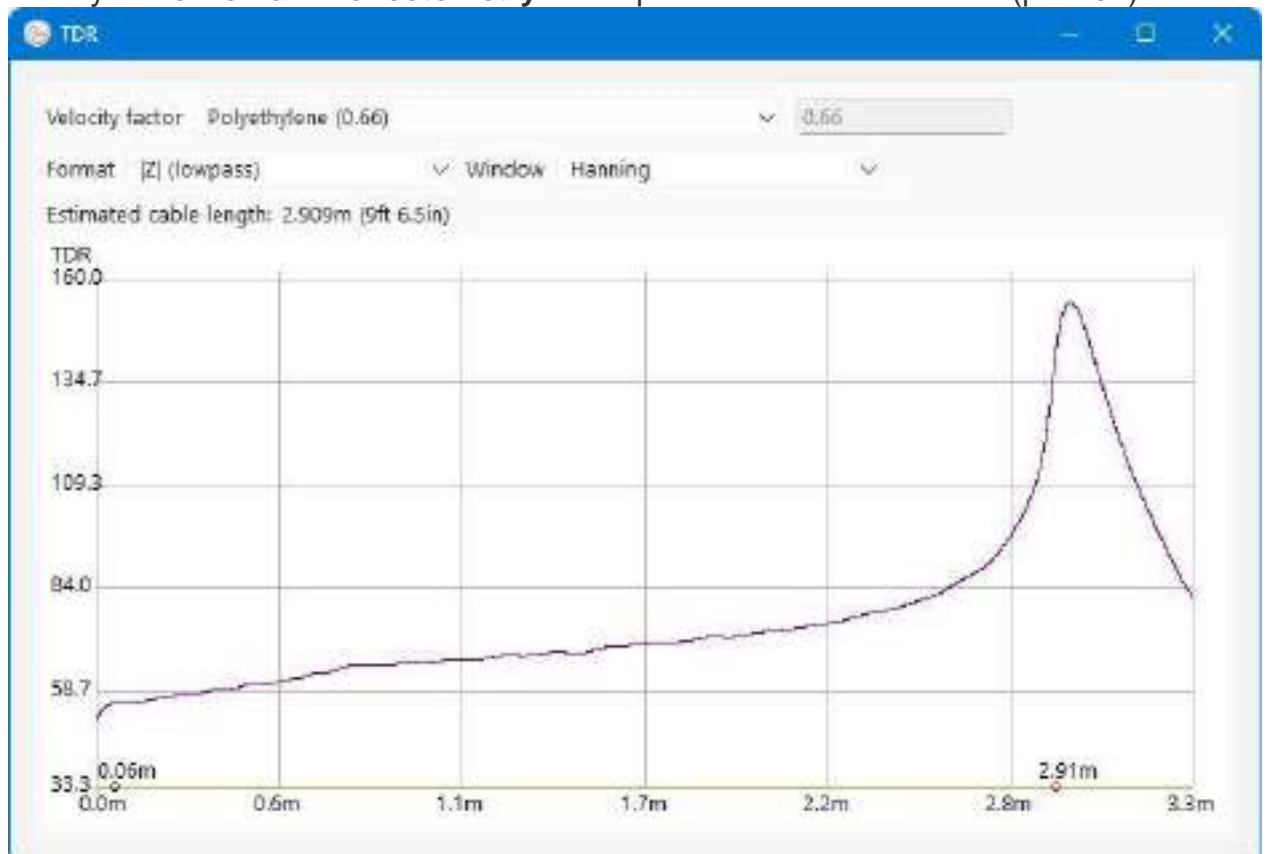


Рис. 62. Диаграмма TDR позволяет определить длину фидера

Щёлкните в этом окне точку максимального значения TDR. На оси X появится маркер, который будет указывать на длину кабеля. В данном случае измеренная длина кабеля составила 2.91 м.

Теперь подключите к концу кабеля два кабеля небольшой длины, а к концу второго кабеля — эталон **SHORT**. На диаграмме TDA (рис. 63) будет видно два отражения — от конца кабеля (3.2 м) и от конца удлинителя (2.97 м).

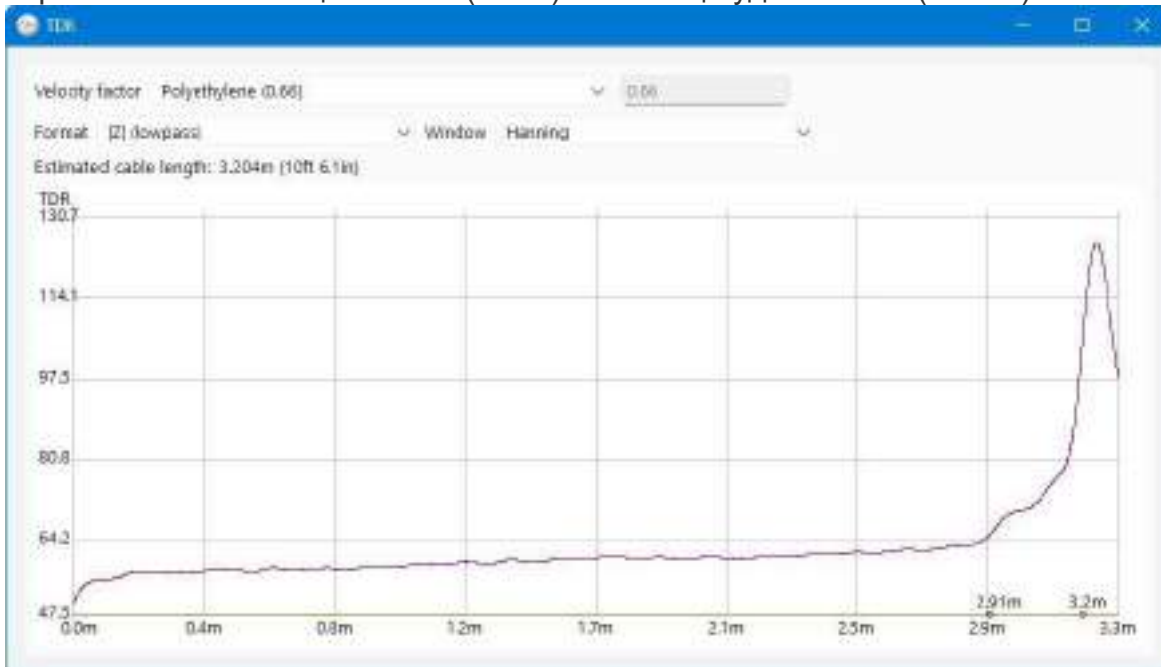


Рис. 63. Результат удлинения кабеля

На рис. 64 показана имитация обрыва кабеля — я снял эталон **SHORT** и оставил конец кабеля открытым.

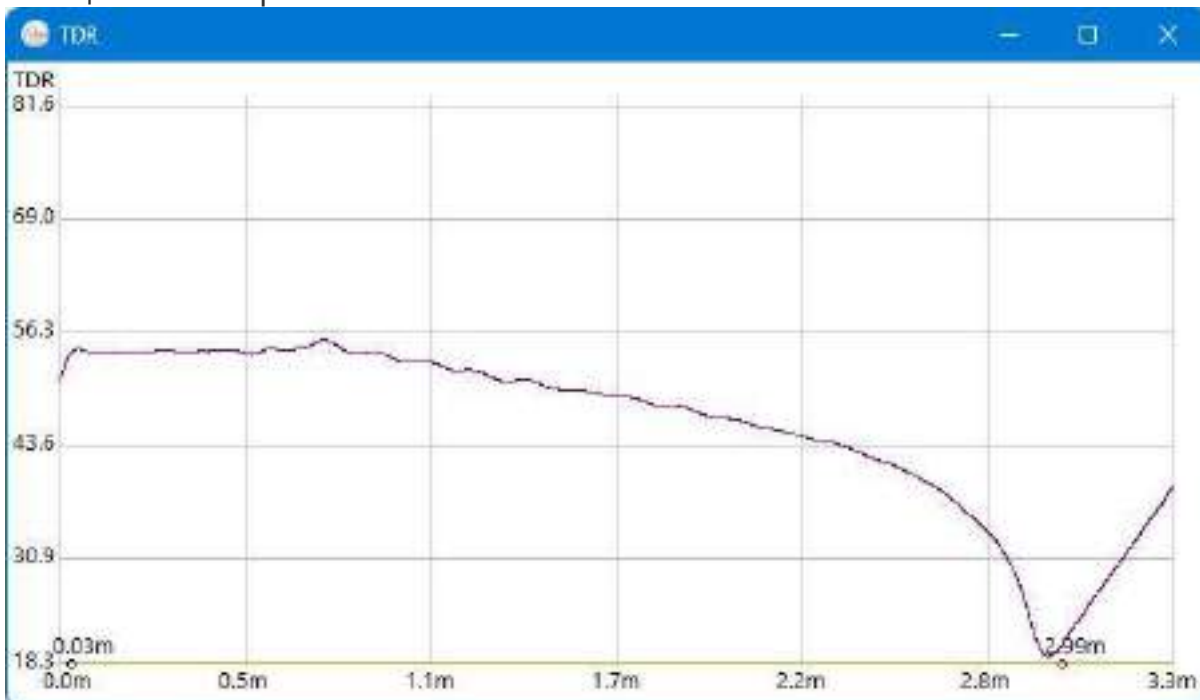


Рис. 64. Имитация обрыва кабеля

Теперь в точке, соответствующей длине кабеля, показывается не максимум, а минимум значения TDR.

Про измерение длины кабеля читайте также в статье [«Измерение длины кабеля»](#).

## Итоги

На этом я заканчиваю рассказ о том, как работать с NanoVNA и NanoVNA-Saver. Статья получилась большая, потому что векторный анализатор может многое. Надеюсь, вам доставили удовольствие эксперименты с NanoVNA, и вы научились определять параметры устройств, имеющие отношение к согласованию импедансов.