

Building an S-Parameter Test Set for the VNWA-3E

Erstellen eines S-Parameter-Test-Sets für den VNWA-3E

Whitham D. Reeve, Anchorage, Alaska USA (© 2013 W. Reeve)

1. Einführung

Der Vektornetzwerkanalysator (VNA) ist ein großer Fortschritt gegenüber den relativ einfachen Antennenanalysatoren, die häufig von Amateurfunkamateuren verwendet werden. Im Vergleich zu Antennenanalysatoren verfügen VNAs über viel mehr Messfunktionen und eine bessere Genauigkeit und decken einen größeren Frequenzbereich ab. VNAs können verwendet werden, um die elektrischen Eigenschaften von Geräten wie Filtern, Verstärkern, passiven und aktiven Komponenten, Kabeln und Antennen zu messen. Bis vor einigen Jahren waren sie jedoch aufgrund der hohen Kosten kommerzieller VNAs für die meisten Menschen unerreichbar.

Der in diesem Artikel verwendete DG8SAQ VNWA-3E (Abbildung 1) ist zusammen mit der zugehörigen Software (Abbildung 2) ein semiprofessioneller 2-Port-Vektor-Netzwerkanalysator, der etwa 700 US-Dollar kostet (kostengünstigere und weniger leistungsfähige Versionen sind vom Hersteller erhältlich) : <http://www.sdr-kits.net/>). Die VNWA-3E-Software enthält Bestimmungen für bidirektionale Messungen, die Hardware-Übertragungsports sind jedoch unidirektional. Dies bedeutet, dass ein zu testendes 2-Port-Gerät (z. B. ein Verstärker) für Vorwärtsmessungen in eine Richtung angeschlossen und für Rückwärtsmessungen manuell umgedreht wieder angeschlossen werden muss (Abbildung 3). Die Unannehmlichkeit, die Verbindung für den zweiten Messsatz manuell wiederherzustellen, kann durch Hinzufügen eines S-Parameter-Testsets unter Kontrolle der Analysesoftware beseitigt werden. Dieser Artikel beschreibt meine Implementierung eines solchen Testsets zu einem Preis von rund 140 US-Dollar (Abbildung 4).

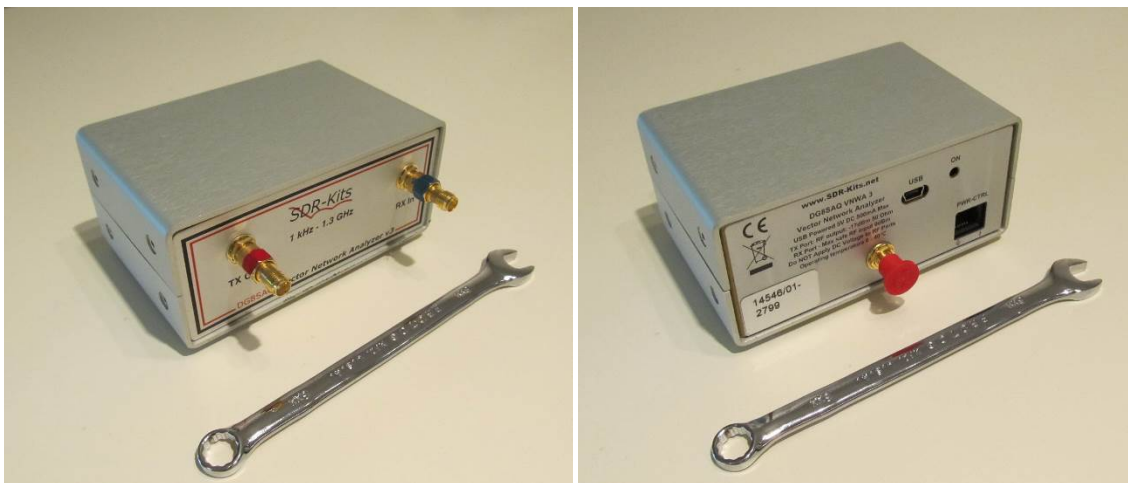


Abbildung 1 ~ Vorderansicht (links) und Rückansicht der VNWA-3E-Hardware neben einem 8-mm-Schraubenschlüssel. Die Vorderseite zeigt die Sende- und Empfangsports. Die Rückansicht zeigt den USB-Steuerver-/ Stromanschluss oben rechts. Der Steueranschluss des S-Parameter Test Set befindet sich unten rechts und eine rote Kunststoffkappe schützt den externen Referenzoszillatoranschluss. Die Gehäuseabmessungen einschließlich der Anschlüsse sind 104 mm breit x 50 mm hoch x 85 mm tief (4,1 Zoll x 2 Zoll x 3,3 Zoll).

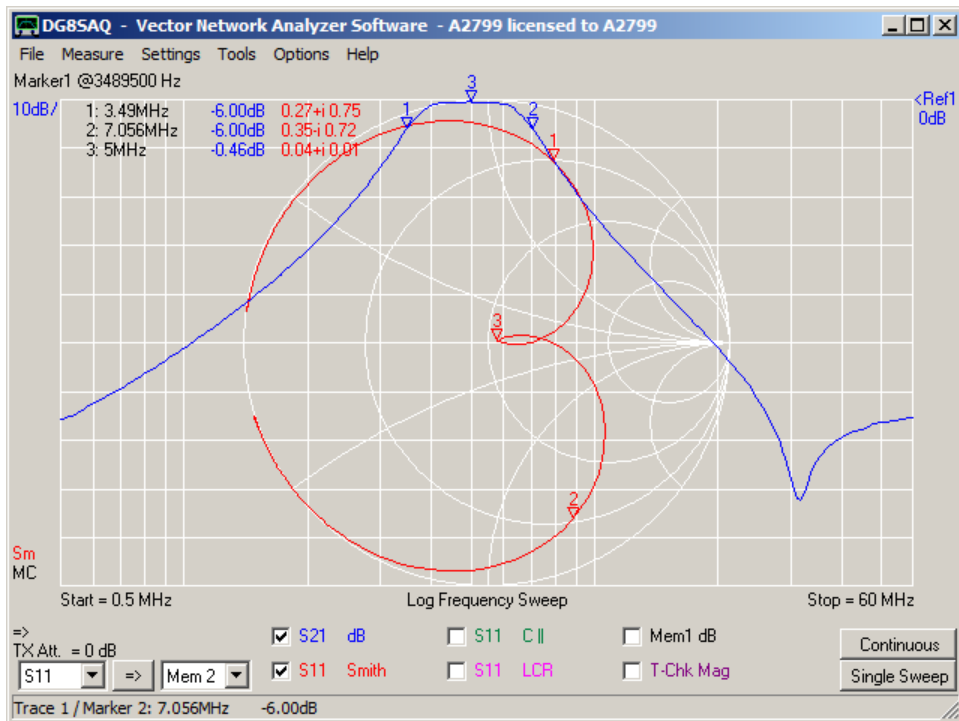


Abbildung 2 ~ Der Screenshot der VNWA-3E-Software ist repräsentativ für eine 2-Port-Messung. Es zeigt das Response eines einfachen Butterworth-Pi-Filters von 0,5 bis 60 MHz mit Markern in der Mitte und -6 dB Frequenzen. Die blaue Kurve zeigt das Filterresponse (s_{21}) und die rote Kurve zeigt die Eingangsimpedanz auf einem Smith Chart-Overlay. Die Markierungen, Spuren und vertikalen Skalen sind benutzerdefiniert. Die Smith Chart-Skalenüberlagerung kann ein- oder ausgeschaltet werden.

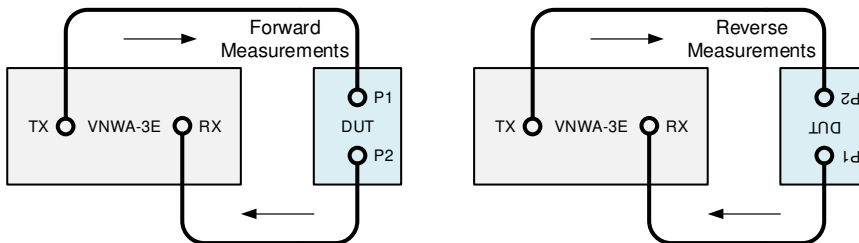


Abbildung 3 ~ Blockdiagramm der manuellen VNA-Vorwärts- (links) und Rückwärts- (rechts) Verbindungen.

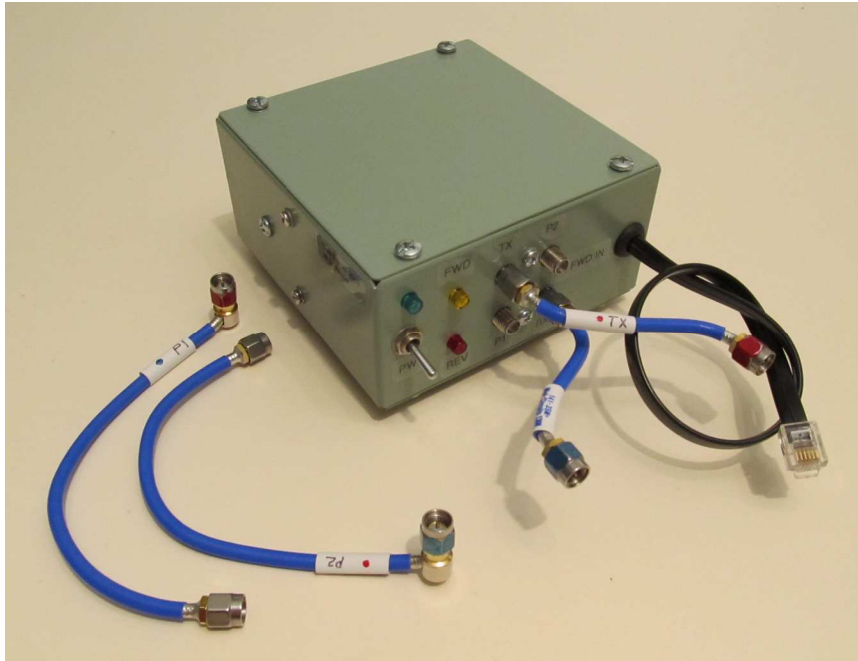


Abbildung 4 ~ In diesem Artikel beschriebener S-Parameter-Testset. Die Kosten für alle Teile außer Koaxialkabeln betragen rund 100 US-Dollar. Kabel kosten ca. 40 US-Dollar. Die Abmessungen des Testsatzes betragen 102 mm breit x 50 mm hoch x 102 mm tief. Das schwarze Kabel rechts ist das Steuerkabel, das das Testgerät mit dem VNWA-3E-Steueranschluss verbindet. Die beiden blauen Koaxialkabel, die an den Übertragungsschalter in der Mitte des Testgeräts angeschlossen sind, werden mit den Sende- und Empfangsports des VNWA-3E verbunden. Mit den beiden losen blauen Kabeln links wird das Testgerät an das zu testende Gerät angeschlossen.

2. VNA Messungen

Bei Anschluss an ein 2-Port-Gerät für Reflexionsmessungen vergleicht der VNA sein einfallendes Signal mit dem vom Eingangs- oder Ausgangsport des Geräts reflektierten Signal (Abbildung 5). Für Übertragungsmessungen über ein Gerät vergleicht der VNWA-3E das einfallende Signal mit dem Signal, das aus dem gegenüberliegenden Port kommt. Viele unidirektionale Geräte, wie z. B. Verstärker, haben tatsächlich Leckpfade in umgekehrter Richtung, und es ist erforderlich, sie in beide Richtungen zu testen. Typische Ergebnisse aus bidirektionalen Messungen sind

- ⊗ Reflection coefficients (s_{11} , s_{22}) – Vorwärts- und Rückwärtspfadreflexion
- ⊗ Transmission coefficients (s_{21} , s_{12}) – Vorwärts- und Rückwärtsübertragung (Isolation)
- ⊗ Return loss (dB)
- ⊗ Insertion gain oder loss (dB)
- ⊗ Complex impedance ($R + jX$ ohms) , einschließlich magnitude ($|Z|$)
- ⊗ Voltage standing wave ratio, VSWR

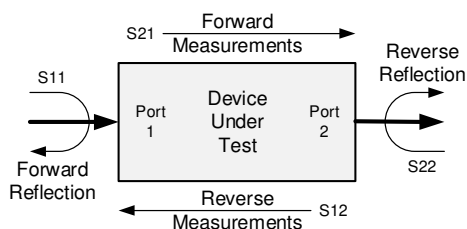


Figure 5 ~ Block diagram showing incident, reflection, transmission directions.

Die oben genannten Streuparameter (s-Parameter s_{11} , s_{12} , s_{21} und s_{22}) basieren auf Verhältnissen, die die Eingabe- und Ausgabebeziehungen eines Geräts definieren. S-Parameter werden am häufigsten beim Entwurf und Testen von Hochfrequenzen verwendet, da sie einfacher zu messen und zu verwenden sind als andere Arten von Netzwerkanalyseparametern. Die meisten HF-Schaltkreise funktionieren nur dann ordnungsgemäß, wenn ihre Ein- und Ausgänge ordnungsgemäß abgeschlossen sind. Daher verwenden S-Parameter-Messungen abgestimmte Lasten für Abschlüsse anstelle von Kurzschlüssen oder Unterbrechungen wie bei anderen Parametern. Für eine ausführlichere Diskussion der S-Parameter siehe [HP] und für eine Diskussion der Vektornetzwerkanalysatoren siehe [Agilent] und [Anritsu]. Eine ursprüngliche Beschreibung der mathematischen Basis für S-Parameter finden Sie in [RadLab8].

Vektornetzwerkanalysatoren sind am besten für die Messung von S-Parametern bekannt. Der VNWA-3E verfügt jedoch über erheblich mehr Funktionen und kann als verwendet werden

- ⊗ Spektrumanalysator
- ⊗ Signalgenerator mit CW-, AM- und FM-Modulation
- ⊗ LCR (inductance, capacitance, resistance) Meter bei benutzerdefinierter Messfrequenz
- ⊗ Hochpräzises Frequenzmessgerät mit μHz Auflösung
- ⊗ Messungen des Antennenstrahlungsmusters

Der VNWA-3E verfügt über keine Bedienelemente an der Vorderseite und für den Betrieb ist ein Personal Computer (PC) erforderlich, auf dem die mitgelieferte Software ausgeführt wird. Die Software befiehlt der Hardware, digitalisierte elektrische Messungen durchzuführen und verwendet dann die Daten, um die benutzerdefinierten Parameter zu berechnen und anzuzeigen. Die Software ist sehr flexibel und ermöglicht eine Vielzahl von Messungen und die Anpassung der Anzeige. Eine erweiterte Softwarefunktion ermöglicht die Speicherung des gesamten Gerätezustands - Kalibrierungsdaten, Trace-Einstellungen, Konfigurationen usw. -, sodass später alles problemlos abgerufen werden kann.

Ein wichtiges Verfahren bei der Verwendung eines VNA ist die ordnungsgemäße Kalibrierung, die normalerweise vor jedem Messsatz durchgeführt wird. Die gebräuchlichste Art der Kalibrierung verwendet Kurzschluss-, Unterbrechungs-, Festanschluss- (Last) und Durchgangsschaltungen, die als SOLT bezeichnet werden. Hierbei handelt es sich um Präzisionskomponenten, die während der Kalibrierung wiederum an den VNA-Ports platziert und dann beiseite gelegt werden. Die Kalibrierungsdaten werden in einer Datei gespeichert und die Kalibrierungskomponenten werden während der Messungen eines Geräts nicht verwendet.

Kalibrierungskits mit den SOLT-Komponenten für professionelle VNAs kosten je nach Steckertyp, Frequenzbereich und Optionen zwischen 5.000 und 35.000 US-Dollar. Geeignete Kalibrierungskits (Abbildung 5) für den VNWA-3E sind viel günstiger und kosten etwa 25 bis 125 US-Dollar. Der VNWA-3E-Hersteller verkauft ein Kit am unteren Ende der Preisspanne. Ein Kit am oberen Ende dieser Preisklasse, Modell NA-EC1, ist bei Heuermann HF-Technik in Deutschland erhältlich:

http://www.hhft.de/index.php?page=vna&subpage=network_analysis_p2b. Natürlich können Benutzer aus einzelnen Komponenten ihr eigenes Kalibrierungskit zusammenstellen, aber es ist erforderlich, detaillierte und genaue Maßinformationen über sie zu kennen (die Erstellung eines Kalibrierungskits ist ein interessantes Projekt für sich).



Abbildung 5 ~ Kalibrierungskit für den VNWA-3E, bestehend aus Short-, Open-, Load- und Thru-Komponenten, die SMA-Steckverbinder verwenden. Open und Thru sind die gleichen Zylinderanschlüsse, die oben links dargestellt sind. Die leicht unterschiedlichen Positionen der Referenzebene von Open und Short wirken sich auf die Kalibrierung aus, sodass zur Kompensation manuell eine Phasendelay in die Softwarekonfiguration eingegeben wird. Die Short- und Loadkomponenten sind mechanisch ähnlich und wurden zur einfachen Identifizierung farblich gekennzeichnet (rot für den Short und blau für den Load). Ein koaxialer T-Anschluss, der für den später beschriebenen T-Check-Genauigkeitstest verwendet wird, ist unten links dargestellt.

Für normale Labormessungen bereite ich Kalibrierungsdateien für verschiedene Frequenzbereiche und Geräteeinstellungen vor. Abhängig vom Setup kann ich die Kalibrierungen vor jedem Messsatz erneuern. Bei bidirektionalen Messungen an einem 2-Port-Gerät erfordert der Kalibrierungsprozess zehn separate Schritte, fünf in Vorwärtsrichtung (FWD) und fünf in Rückwärtsrichtung (REV):

- ⚙ Short, FWD und REV
- ⚙ Open, FWD und REV
- ⚙ Load, FWD und REV
- ⚙ Thru, FWD und REV
- ⚙ Thru Match, FWD und REV

Hinweis: Die von der VNWA-3E-Software durchgeführten Kalibrierungsberechnungen umfassen auch eine Crosstalkkopplung zwischen den Sende- und Empfangsports, sodass tatsächlich insgesamt 12 Parameter vorhanden sind. Normalerweise erlaubt der VNWA-3E-Benutzer der Software jedoch, angenommene Crosstalkwerte anstelle von Messwerten zu verwenden.

3. S-Parameter Test Set Circuit Beschreibung

Die Einfachheit des S-Parameter-Test-Sets wird durch sein Blockdiagramm angezeigt (Abbildung 7). Die Hauptkomponenten sind ein koaxialer Übertragungsschalter und eine Relaischnittstelle. Die Relaischnittstelle verwendet den 0- und 3,3-V-Logikausgang vom Steueranschluss des VNWA-3E, um ein 28-VDC-Relais zu betreiben. Das Relais betätigt wiederum den Übertragungsschalter, der Port 1 und Port 2 des Prüflings (DUT) für Vorwärts- und Rückwärtsmessungen konfiguriert. Ich habe die VNWA-3E-Software für den aktiven Hochbetrieb eingerichtet. Das heißt, 0 V (logisch niedrig) gibt den Übertragungsschalter für Vorwärtsmessungen frei und 3,3 V (logisch hoch) betätigt den Übertragungsschalter für Rückwärtsmessungen.

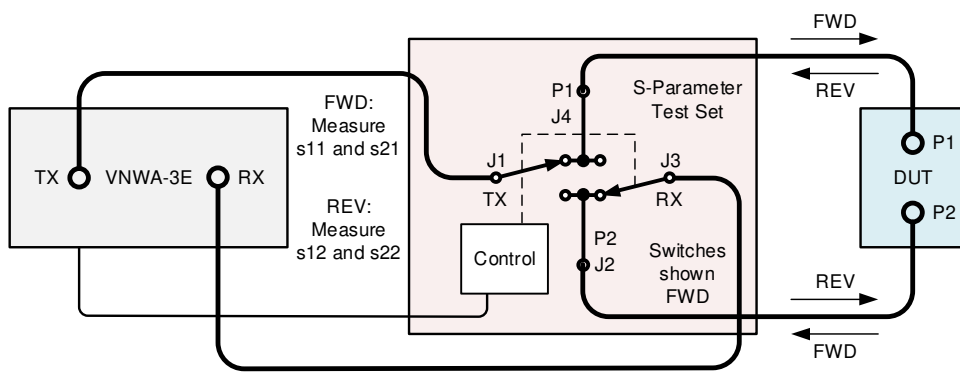


Abbildung 7 ~ Blockdiagramm des S-Parameter-Test-Sets (Mitte) einschließlich seiner Verbindungen zum VNWA-3E (links) und zum zu testenden Gerät. Key: P1 = Port 1, P2 = Port 2, TX = Transmit, RX = Receive, DUT = Device Under Test, FWD = Forward, REV = Reverse.

Das Schema zeigt mehr Details (Abbildung 8). Die 5,1-V-Zenerdiode D1 über dem Relaischnittstelleneingang verhindert eine Überspannung am Steuerausgang VNWA-3E, wenn der Relaissteuertransistor Q1 mit einem Kurzschluss zwischen Kollektor und Basis ausfällt. Um eine induktive Rückschlagschädigung des Steuertransistors zu verringern, ist eine gewöhnliche Leistungsdiode D2 über die Relaispule in umgekehrter Reihenfolge geschaltet. Der Widerstand R1 begrenzt den Eingangsstrom und R2 verhindert einen Fehlbetrieb aufgrund eines Leckstroms über den Basis-Emitter-Übergang des NPN-Darlington-Transistors.

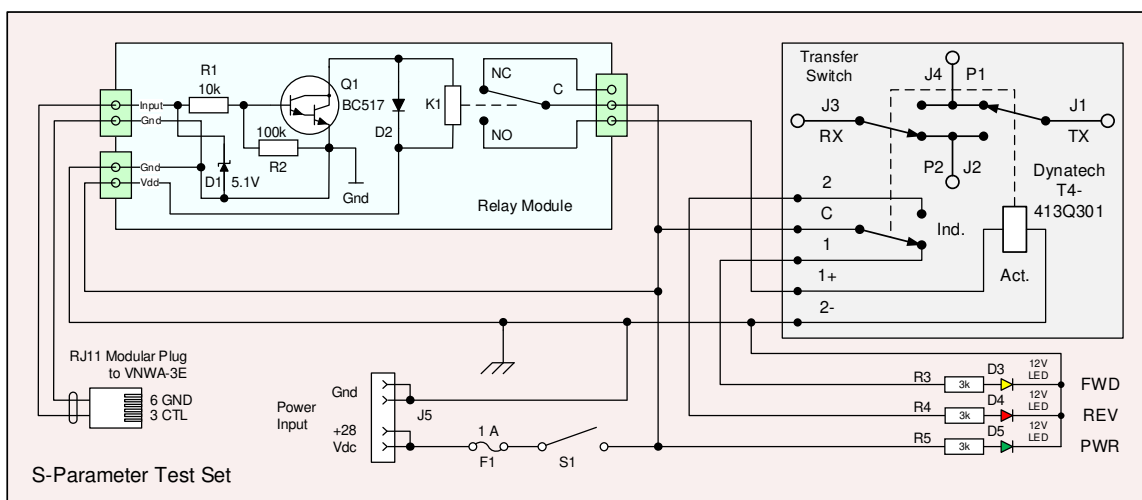


Abb. 8 ~ S-Parameter Test Set schematic

Auf den ersten Blick scheint das 28-V-Steuersrelais K1 redundant zu sein. Der in meiner Schaltung verwendete BC517-Transistor hat jedoch einen maximalen Kollektorstrom von 500 mA und der Betriebsstrom des Übertragungsschalters TS1 beträgt etwa 300 mA. Ich hatte das Gefühl, dass es zu wenig Spielraum geben würde, also habe ich ein Relais K1 am Schnittstellenmodul verwendet, um den Betriebsstrom des Übertragungsschalters vom Steuertransistor zu isolieren. K1 benötigt nur 15 mA Betriebsstrom.

Der Übertragungsschalter ist ausfallsicher. Dies bedeutet, dass der Schalter beim Entfernen der Stromversorgung in seine normalerweise geschlossene Position freigegeben wird, wenn er nicht bereits vorhanden ist. Der Schalter hat Positionsanzeigekontakte, und ich habe sie über die Strombegrenzung- / Spannungsabfallwiderstände R3 und R4 mit den Leuchtdioden (LED) D3 und D4 verdrahtet. Die im Schaltplan gezeigten 3k-Ohm-Widerstände werden mit vorverdrahteten LEDs verwendet, die bereits Spannungsabfallwiderstände für den Nennbetrieb von 12 V aufweisen. Die zusätzlichen 3 kOhm liefern einen 7 mA LED-Strom mit 28 V Eingang (bestimmt durch Testen). Die Stromkreise werden über die Strombuchse J5, den

SPST-Schalter S1 und die 1 A-Sicherung F1 mit Strom versorgt und durch eine weitere 12-V-LED D5 mit einem Spannungsabfallwiderstand R5 von 3 kOhm angezeigt. Die Betriebsanzeige-LED könnte entfernt werden, da eine der Positionsanzeige-LEDs immer an ist, wenn Strom angelegt wird. Für die Stromversorgung habe ich die Anderson PowerPole-Anschlüsse verwendet. Hersteller können problemlos einen anderen Steckertyp ersetzen, z. B. eine koaxiale Gleichstrombuchse mit 2,1 x 5,5 mm oder einen DIN-Steckverbinder.

4. Konstruktion

In der Stückliste (Stückliste, Tabelle 1) sind alle Teile aufgeführt, die in meiner Version des S-Parameter-Testsatzes verwendet wurden. Die kritischste Komponente ist der koaxiale Übertragungsschalter, und er sollte von höchster Qualität sein. Gebrauchte hochwertige Schalter sind bei Online-Auktionen und Verkäufern gebrauchter Mikrowellengeräte zu einem Preis von etwa 50 US-Dollar und mehr erhältlich. Es stehen zwei Arten von Schaltern zur Verfügung - ausfallsicher und verriegelnd. Ich habe mich für den ausfallsicheren Typ entschieden, da sich der Übertragungsschalter immer in einer bekannten Position befindet (freigegeben), ohne dass das Testgerät mit Strom versorgt wird. Ein Verriegelungsschalter bleibt in seiner letzten Position, wenn die Betätigungsspule von der Stromversorgung getrennt wird. Wenn die hier beschriebene Relaischnittstelle mit dem Verriegelungstyp verwendet wird, sind nur geringfügige Schaltkreisänderungen erforderlich.

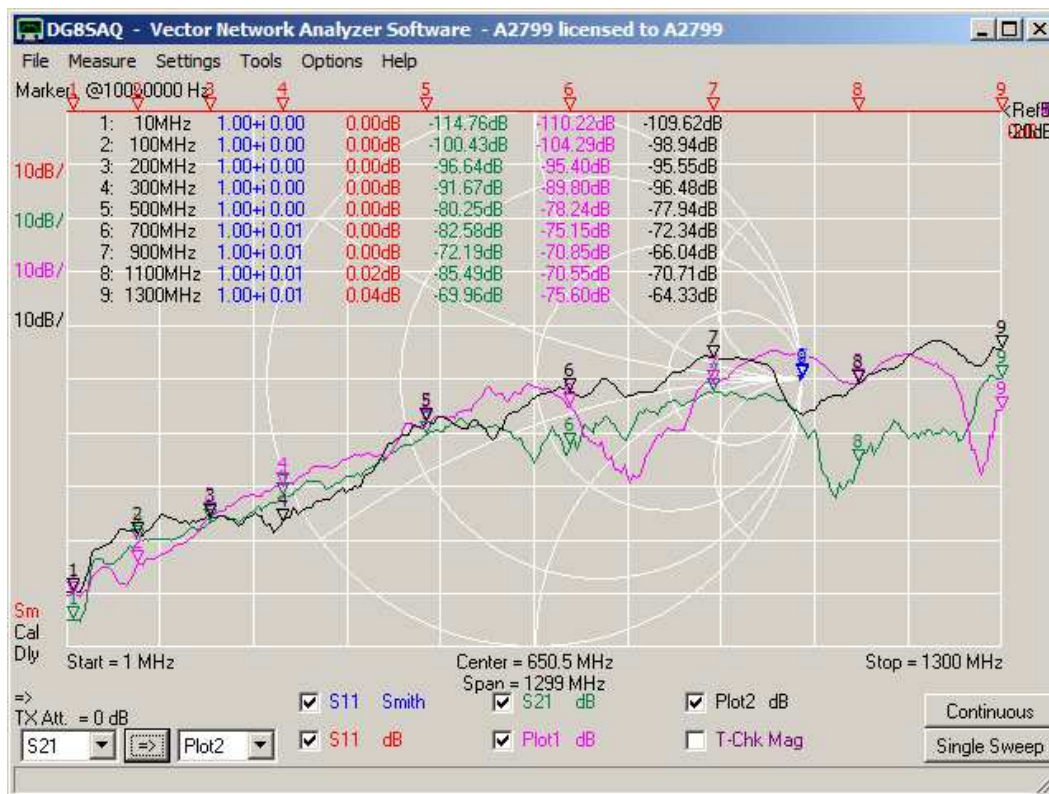
Neben der Betriebsart (ausfallsicher oder verriegelnd) sind die wichtigen Attribute des Übertragungsschalters Frequenzbereich, Betriebsspannung und Portisolation. Der VNWA-3E-Frequenzbereich liegt zwischen 100 kHz und 1,3 GHz, kann jedoch für Frequenzen unter 100 kHz konfiguriert werden. Um diesen Bereich mit einem gewissen Spielraum zu berücksichtigen, sollte der Übertragungsschalter einen Frequenzbereich von mindestens Gleichstrom bis 2 GHz haben. Die meisten mir bekannten Schalter arbeiten mit 28 VDC, und das ist die Spannung, die ich verwendet habe. Andere Spannungen sind verfügbar und können problemlos an diesen Testsatz angepasst werden.

Tabelle 1 ~ Stückliste für S-Parameter-Testsatz (mit „Allgemein“ gekennzeichnete Elemente sind nicht kritisch)

Item	Qty	P/N	Mfr or Vendor	Beschreibung
1	1	T4-413Q301	Dynatech	Koaxialer Übertragungsschalter, ausfallsicher, 28 VDC (siehe Text)
2	1	SRD-S-124D	Sanyou	Relay, 24 Vdc, Form C
3	1	AU-1083	Bud Industries	Gehäuse (utility cabinet), Aluminum, 4 x 4 x 2 in
4	1	TE-5-1	Littelfuse	MiniaturSicherung, 1 A, 250 V
5	1	HS4	Anderson	PowerPole, Dual-Set, Gehäusemontage
6	1	BC517	Generic	Darlington transistor
9	1	1N5338	Generic	Zenerdiode, 5,1 V, 5 W (Ersatz 1/2 W)
10	1	1N4002	Generic	Diode, 1 A, 100 V (Ersatz höhere Spannung)
11	1	Generic	Generic	LED, grün, vorverdrahtet 12 V, 3 mm (siehe Text)
12	1	Generic	Generic	LED, amber, vorverdrahtet 12 V, 3 mm
13	1	Generic	Generic	LED, red, prewired 12 V, 3 mm
14	1	SML-190-GTP	VCC	LED-Halterung und Linse, grün, 3 mm (siehe Text)
15	1	SML-190-ATP	VCC	LED Halterung und Linse, amber, 3 mm
16	1	SML-190-RTP	VCC	LED Halterung und Linse, rot, 3 mm
17	1	Generic	Generic	10k ohm, 5%, 1/4 W Widerstand
18	1	Generic	Generic	100k ohm, 5%, 1/4 Widerstand
19	3	Generic	Generic	3k ohm, 5%, 1/2 W Widerstand

20	2	Generic	Generic	Prototyp einer Leiterplatte, nach Bedarf zugeschnitten
21	6	Generic	Generic	Abstandshalter, Stecker-Buchse, 6 x 6 mm, 3 mm Gewinde (Leiterplattenbefestigung)
22	6	Generic	Generic	Maschinenschraube, 3 x 3 mm
23	6	Generic	Generic	Sechskantmutter, 3 mm
24	12	Generic	Generic	Sicherungsscheibe, geteilt, 3 mm
25	2	Generic	Generic	Maschinenschraube, 4-40 x 0,188 Zoll (bei Bedarf für die Montage des Transferschalters ändern)
26	2	Generic	Generic	Sicherungsscheibe, geteilt, Nr. 4
27	1	Generic	Generic	Erdungsöse, interner Stern, Nr. 6
28	1	Generic	Generic	Maschinenschraube, 6-32 x 3/8 Zoll
29	1	Generic	Generic	Sechskantmutter, 6-32
30	30 cm	Generic	Generic	Litzenanschlussdraht, 24 AWG, 300 V.
31	30 cm	Generic	Generic	Litzenanschlussdraht, 22 AWG, 300V
32	2	141-3SM+	Mini-Circuits	Hand-Flex-Verbindungskabel, SMA-M: SMA-M, Durchmesser 0,141 in, Länge 3 in
33	2	141-6SMRSM+	Mini-Circuits	Hand-Flex-Verbindungskabel, SMA-RA-M: SMA-M, Durchm. 0,141in, Länge 6in

Die Isolation der Übertragungsschalterports ist wichtig, da sie die Interaktion zwischen den Sende- und Empfangsports des VNWA-3E während der Kalibrierung und Messungen verringert. Die Isolation ist das Verhältnis der Sendeleistung zur Empfangsleistung, gemessen in dB, ohne direkte Verbindung zwischen den Sende- und Empfangsports. Aufgrund von Leckagen kommt es zu einer Crosstalkkopplung zwischen den Sende- und Empfangsports. Meine Messungen des VNWA-3E zeigen, dass das Ausmaß der Kopplung von der Art und Weise abhängt, wie der Empfangsport abgeschlossen wird - offener Stromkreis, Kurzschluss, 50 Ohm oder etwas anderes. Die gemessene Isolation übersteigt 100 dB unter ungefähr 100 MHz (höchstwahrscheinlich begrenzt durch das VNWA-3E-Grundrauschen), fällt bei 900 MHz auf ungefähr 70 dB und fällt weiter auf ungefähr 65 dB über 900 MHz ab. Diese Messungen können mit Messungen der Kombination VNWA-3E und des S-Parameter-Testsatzes verglichen werden (Abbildung 9)).



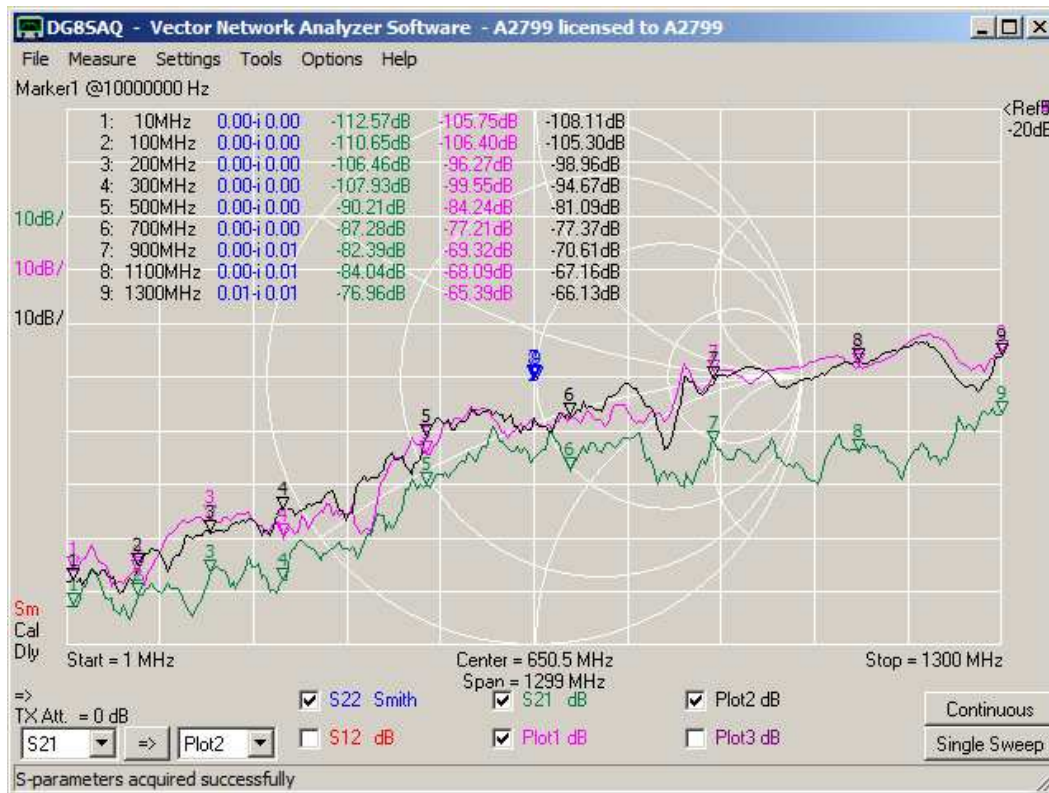


Abbildung 9 ~ Messungen des Übersprechkopplungsverlusts des VNWA-3E für sich (oben) und der Kombination aus VNWA-3E und S-Parameter-Testset (unten). Die Messungen reichen von 1 bis 1300 MHz. Für die VNWA-3E-Messungen wurde das für die Thru-Kalibrierung verwendete kurze Kabel an den Empfangsport angeschlossen und mit den Anschlüssen Open (violette Spur), Short (schwarze Spur) und 50 Ohm (grüne Spur) abgeschlossen. Das Übersprechen wurde mit den Anschlüssen Open (violette Spur), Short (schwarze Spur) und 50 Ohm (grüne Spur) an beiden Test-Set-Ports (P1 und P2) gemessen. Das untere Diagramm zeigt nur die Vorwärtsrichtung; Messungen der umgekehrten Richtung waren ähnlich. Alle Messungen liegen in dB unter dem Sendeleistungspegel. Beispielsweise zeigt eine Messung von -80 dB eine Isolation von $+80$ dB zwischen den Ports an. Die Plotreferenz wurde bei Division 10 (oben in den Plots) auf -20 dB und die vertikale Skala auf 10 dB / Division eingestellt. Die Markierungen zeigen die Kopplung bei ausgewählten Frequenzen an. Ein Vergleich des Kombinationsplots mit dem VNWA-3E allein zeigt, dass der Übertragungsschalter die Gesamtisolation unter vielen Bedingungen verbessert und, was noch wichtiger ist, nicht wesentlich verschlechtert hat.

Im Idealfall übersteigt die Isolation des Übertragungsschalters die inhärente Isolation des VNWA-3E um mindestens 10 dB. Diese Anforderung ist sehr anspruchsvoll und bei vielen Übertragungsschaltern nicht verfügbar. Die Datenblätter für den in der Stückliste aufgeführten Dyntech-Übertragungsschalter sowie die in meinem Bestand befindlichen Teledyne Microwave-, Transco Dow-Key- und Narda-Schalter zeigen alle eine Isolation von 80 dB von Gleichstrom bis 3 GHz. Die auf den Datenblättern angegebene Isolation ist der schlimmste Fall. Es ist verlockend anzunehmen, dass die Isolation beispielsweise bei niedrigeren Frequenzen besser ist. Es mag sein, aber es gibt keine Grundlage für diese Annahme ohne Messungen.

Aus den oben genannten Gründen empfehle ich den Erbauer, keinen gebrauchten Transferschalter zu kaufen, es sei denn, ein Datenblatt für das jeweilige Modell kann vorher angefordert werden. Dies kann eine beträchtliche Online-Suche erfordern, da viele Auktionsverkäufer nicht wissen, was sie verkaufen. Vergleichsmessungen

sollten durchgeführt werden, um den ordnungsgemäßen Betrieb und die Isolierung zu bestätigen. Abgesehen davon ist es möglich, eine Schaltungs-Isolation von mehr als 100 dB zu erreichen, indem vier einpolige SPDT-Koaxialrelais (Double Throw) und sorgfältig hergestellte Verbindungen verwendet werden. Diese Anordnung erfordert jedoch eine beträchtliche mechanische Neugestaltung und eine gewisse elektrische Neugestaltung des hier beschriebenen Testsets.

Die Stückliste zeigt metrische und nicht metrische Hardware und Verbindungselemente, da ich das verwendet habe, was ich zur Verfügung hatte oder für die Kompatibilität mit anderen Teilen benötigte. Der Erbauer sollte seine eigenen Ressourcen verwenden und die Stückliste entsprechend ändern. Steuerungs- und Stromkabel sind Punkt-zu-Punkt und nicht kritisch. Ich habe für alle Verkabelungen 24-AWG-Litzen verwendet, mit Ausnahme des Stromeingangs (22 AWG) und der vorverdrahteten LEDs mit 26 AWG-Kabeln.

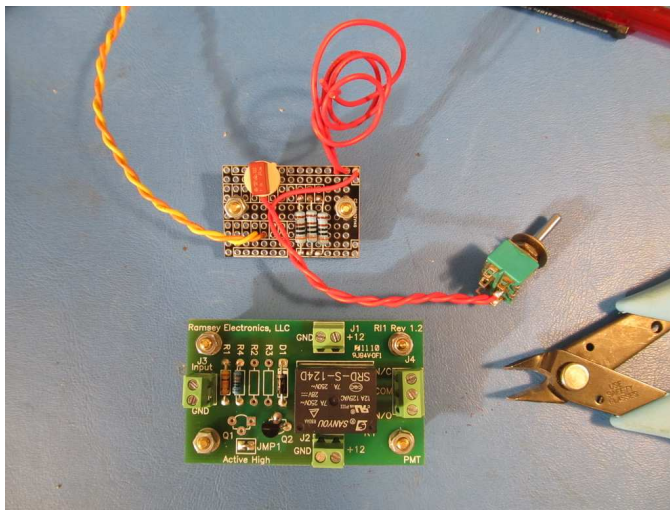


Abbildung 10 ~ Leiterplatten für die Kabelverbindungen, Sicherungen und Widerstände (oben) und die Relaischnittstelle. Die obere Leiterplatte wurde vor der Installation vorverdrahtet. Die Relaischnittstellenplatte wurde aus einem Ramsey Electronics-Kit (<http://www.ramseyelectronics.com/>) entnommen, jedoch mit Komponenten speziell für das S-Parameter-Test-Set bestückt.

Ich habe ein kleines Stück Prototyp einer Leiterplatte für Strom- und Erdungsverbindungen sowie zum Halten der 3k-LED-Widerstände und der Sicherung verwendet und die Relaischnittstellenkomponenten auf einer Ramsey RI1-Relaischnittstellenplatte installiert, da ich eine zur Hand hatte (Abbildung 10). . Alle Komponenten könnten auf einem Stück Prototyp-Leiterplatte anstatt auf zwei separaten Leiterplatten wie in meinem Testset installiert werden. Die Gehäusebuchse in meinem Test-Set verfügt über zwei Steckverbindersätze. Ich habe sie parallel verdrahtet, sodass ein Paar als Stromeingang verwendet wird und das andere Paar zur Stromversorgung eines externen 28-VDC-Zubehörs wie einer Rauschquelle oder eines zu testenden Geräts verwendet werden kann.

Metallgehäuse sind für HF-Geräte obligatorisch. Für dieses Projekt habe ich ein 4 x 4 x 2-Aluminiumgehäuse von Bud Industries verwendet, das perfekt zu allen Teilen passt (Abbildungen 11 und 12). Für die PowerPole-Steckdose ist ein rechteckiges Loch von 1 x 1,25 Zoll erforderlich, das ich mit einem quadratischen 1-Zoll-Gehäuse und einem Knabber geschnitten habe. Alle anderen Löcher wurden mit gewöhnlichen Bohrern oder einem Stufenbohrer geschnitten. Das Gehäuse wurde nach der Vorbereitung mit selbstätzender Grundierung und Satin-Salbei-Sprühfarbe gestrichen (Abwaschen des Schneidöls mit Lackverdünner, Schruppen der Oberfläche mit nass-trockenem Sandpapier, erneutes Reinigen mit Lackverdünner und abschließendes

Schrubben in heißem Wasser mit Flüssigseife). Nachdem der Lack 48 Stunden lang ausgehärtet war, installierte ich die LED-Linsenhalterungen und LEDs mit einem Tupper 5-Minuten-Epoxidharz, um zu verhindern, dass sich die LEDs während der Installation der anderen Teile von den Halterungen lösen. Die selbstklebenden Etiketten auf dem Gehäuse werden mit einer Etikettiermaschine mit schwarzer Beschriftung auf klarem Hintergrund hergestellt.

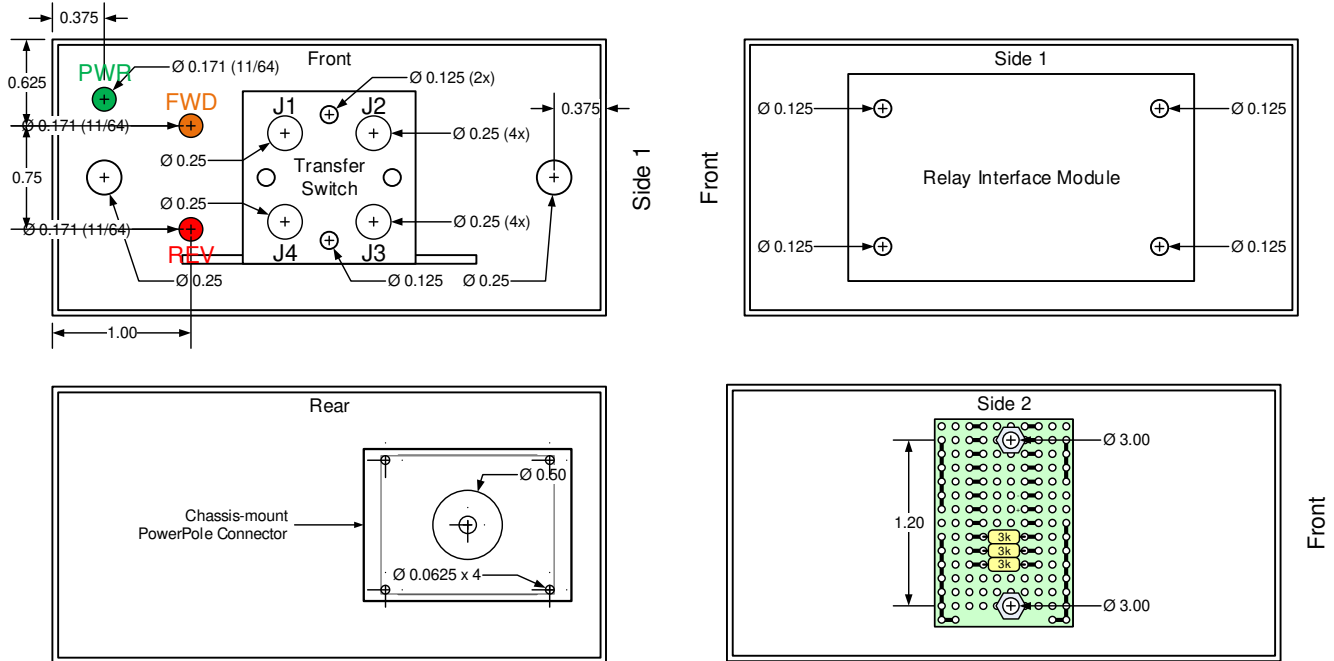


Abbildung 11 ~ Die Layoutzeichnung des Gehäuses zeigt die Schnitt- und Bohrabmessungen. Alle Maße sind in Zoll angegeben, sofern nicht anders angegeben. Die Montageabmessungen des Übertragungsschalters hängen vom tatsächlich verwendeten Schalter ab. Wie im Text erwähnt, kann die PWR-LED entfernt werden.

Für Koaxialkabelverbindungen verwende ich Hand-Flex-Kabel der Serie 141 von Mini-Circuits mit einem Durchmesser von 3,6 mm (0,141 Zoll) und SMA-Steckern (http://www.minicircuits.com/products/test_flex.shtml). Diese sind relativ kostengünstig und ihre elektrischen Parameter sind sehr stabil und gut dokumentiert (Abbildung 13). Die Längentoleranz dieser Kabelleitung beträgt 1,27 mm (0,05 Zoll). Einige Erbauer versuchen möglicherweise, ein paar Dollar zu sparen, indem sie ihre eigenen Kabel herstellen. Dies kann sich jedoch als falsche Wirtschaftlichkeit erweisen, wenn dies nicht sehr sorgfältig durchgeführt wird. Um die Kalibrierung und Messkonsistenz weiter zu gewährleisten, habe ich die Kabel eindeutig farbcodiert und immer an denselben Anschluss des VNWA-3E- und S-Parameter-Test-Sets angeschlossen. Ich verwende auch farbcodierte SMA-Stecker-Buchsen-Adapter an den VNWA-3E-Anschluss-steckern, um den Verschleiß zu verringern (die Adapter können leicht ausgetauscht werden, während die Anschlussstecker dies nicht können).

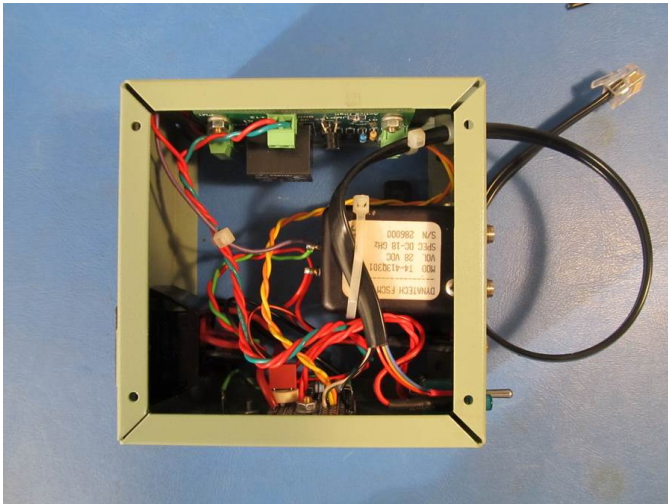


Abbildung 12 ~ Die Innenansicht des Testsets zeigt, dass er kompakt, aber nicht überfüllt ist. Der Übertragungsschalter befindet sich rechts und die Relaischnittstelle oben. Das schwarze Kabel mit modularem Stecker wird an den VNWA-3E-Steueranschluss angeschlossen.

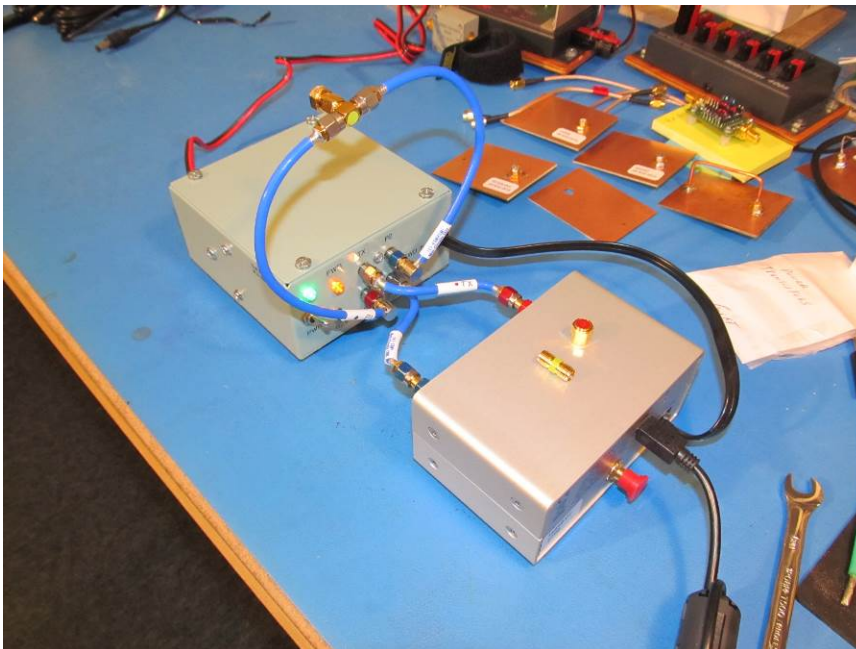


Abbildung 13 ~ S-Parameter Test Set und VNWA-3E-Verbindungskabel sind gewellte Abschirmung, halbstarre Mini-Circuits Hand-Flex-Kabel und haben einen blauen Mantel.

5. Einrichten und Testen des Test-Sets

Der vielleicht wichtigste Aspekt bei VNA-Messungen ist die Kalibrierung, die vor den eigentlichen Messungen durchgeführt wird. Aus Gründen der Konsistenz muss die Kalibrierung mit angeschlossenem Testgerät durchgeführt werden, wie dies für spätere Messungen der Fall wäre. Alle durch das Testgerät und die Verbindungskabel verursachten Mängel werden während des Kalibrierungsprozesses aufgehoben und werden somit Teil der Kalibrierungsdatei, die bei späteren Messungen verwendet wird. Der VNWA-3E darf vor der Kalibrierung und den Messungen mindestens 30 Minuten lang warmlaufen.

Um zu überprüfen, ob der S-Parameter-Testset und die hinzugefügten Verbindungskabel die Gerätemessungen nicht negativ beeinflussen, habe ich eine Reihe von Tests wie folgt durchgeführt.

- ⊗ Kalibrieren Sie den VNWA-3E selbst und messen Sie einige Geräte und Komponenten, schließen Sie das Testgerät an, kalibrieren Sie es neu, messen Sie es erneut und vergleichen Sie es.
- ⊗ Kalibrieren Sie den VNWA-3E selbst und führen Sie eine T-Check-Messung durch, schließen Sie das Testgerät an, kalibrieren Sie es neu, messen Sie es erneut und vergleichen Sie es.

Die Nützlichkeit der Vergleichsmessungen im ersten Punkt oben sollte offensichtlich sein. Der T-Check bedarf jedoch einer zusätzlichen Erläuterung, da es sich um eine wenig bekannte Methode handelt. Der T-Check ist ein VNA-Genauigkeitstest, der von Rhode & Schwarz in [R & S] beschrieben wurde. Es ist elektrisch und mechanisch sehr einfach und erfordert nur einen koaxialen T-Übergang und eine Last von 50 Ohm an dem Übergang (die Baugruppe wird als T-Adapter bezeichnet). Nach der normalen Kalibrierung wird der T-Adapter zwischen die beiden Testanschlüsse des VNA oder des Testsatzes (Abbildung 14) eingesetzt und eine Reihe von Messungen durchgeführt.

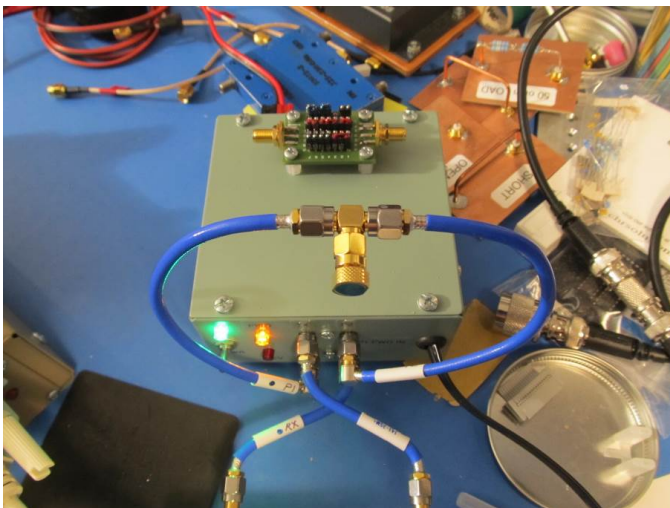


Abbildung 14 ~ T-Check-Verbindungen. Ein koaxialer T-Übergang (Bildmitte) mit 50 Ohm Last auf dem Zweig wird nach der Kalibrierung zwischen die beiden Anschlüsse des Testsatzes eingefügt. Die resultierenden S-Parameter-Messungen werden dann in der T-Check-Formel verwendet, um die Abweichung von der idealen parallelen 25-Ohm-Impedanz (50-Ohm-Last parallel zum 50-Ohm-Empfangsanschluss am VNWA-3E) zu berechnen).

Die externe Last von 50 Ohm ist parallel zur internen Impedanz von 50 Ohm des VNA-Empfangsports, was eine kombinierte Impedanz von 25 Ohm ergibt. Der VNA misst einen vollständigen Satz von Vorwärts- und Rückwärts-S-Parametern und die Software wendet sie an jedem Messpunkt auf die folgende T-Check-Formel an

$$\frac{|S_{11}S_{21}^* + S_{12}S_{22}^*|}{\sqrt{(1-|S_{11}|^2-|S_{12}|^2)(1-|S_{21}|^2-|S_{22}|^2)}}$$

wobei S_{21}^* and S_{22}^* komplexe Konjugate sind. Diese Formel wird vom Benutzer in der VNWA-3E-Software eingerichtet. Für eine perfekte Messung beträgt das Ergebnis an jedem Punkt 100% (1,0 oder keine Abweichung). Bei praktischen Messungen tritt eine gewisse Abweichung auf. Rhode & Schwarz verwendet ein einfaches Abweichungsbewertungssystem wie folgt

- ⊗ Grün: $100 \pm 10\%$ („geringfügig“).
- ⊗ Gelb: 100 ± 10 bis 15% ("Akzeptabel").
- ⊗ Rot: $100 \pm 15\%$ und höher ("Inakzeptabel" oder "Rotalarm").

Alle obigen Vergleichsmessungen zeigten eine sehr enge Korrelation. Insbesondere liegen die beiden T-Check-Messungen sehr nahe beieinander (Abbildung 15). Nach erfolgreichem Abschluss der Validierungstests hat sich das S-Parameter-Test-Set als transparent und vertrauenswürdig erwiesen. Normalerweise lasse ich es auch für 1-Port-Messungen mit dem VNWA-3E verbunden.

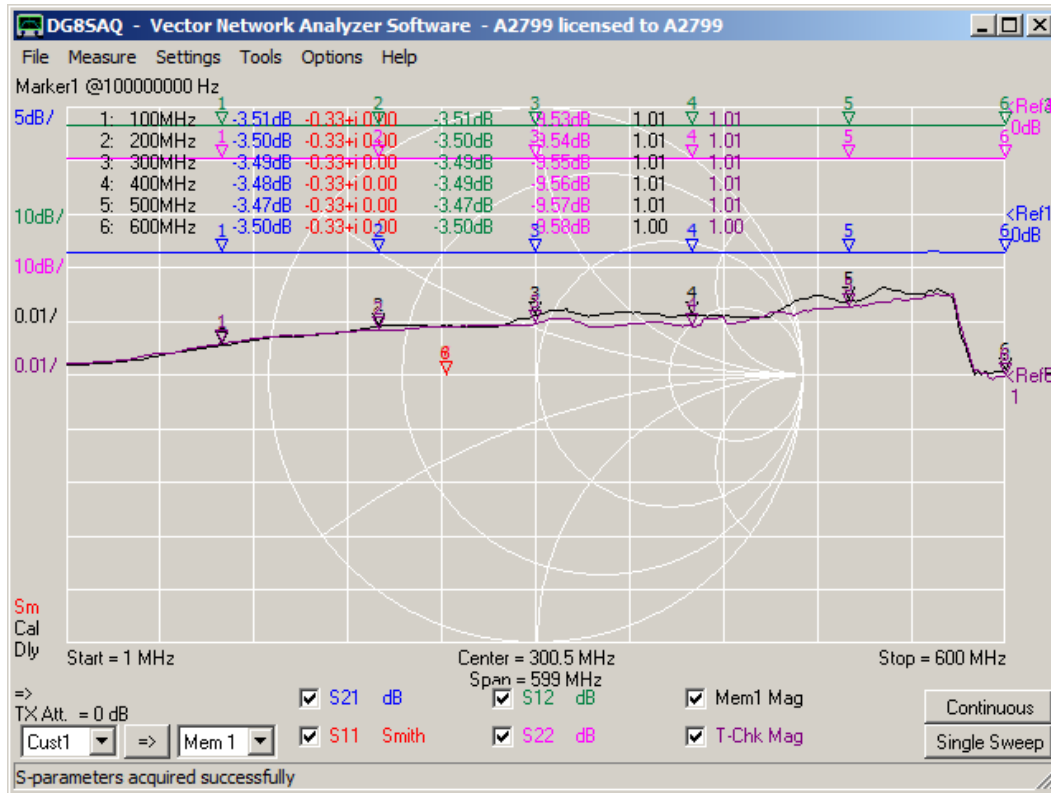


Abbildung 15 ~ Vergleich der T-Check-Ergebnisse für den VNWA-3E mit und ohne S-Parameter-Test über einen Frequenzbereich von 1 bis 600 MHz (magentafarbene bzw. schwarze Spuren nahe der Mitte des Diagramms). Die vertikale Skala für die beiden interessierenden Spuren wird so eingestellt, dass eine Abweichung von 1% / Teilung angezeigt wird. Idealerweise sind die Spuren horizontale Linien bei der 100% -Referenz (5. Gitterteilung für dieses Diagramm). Die beiden Spuren sind nahezu identisch und die gemessene Abweichung vom Ideal beträgt für beide Messreihen <1,5%. Das rote Dreieck in der Nähe der Mitte besteht aus sechs überlappenden Markierungspositionen bei 25 Ohm auf der Smith Chart-Überlagerung.

6. Schlussfolgerungen

Dieser Artikel beschreibt ein kostengünstiges und einfach zu erstellendes S-Parameter-Test-Set, das den VNWA-3E in einen automatischen bidirektionalen Vektornetzwerkanalysator verwandelt, der Komfort bietet und seine Nützlichkeit verbessert. Messungen zeigen, dass der Testsatz für alle praktischen Zwecke transparent ist, eine wichtige Voraussetzung für genaue Messungen.

7. Danksagung

Ich bin Kurt Poulsen für seine Unterstützung beim Einrichten der T-Check-Messungen sowie für seine technische Überprüfung und Kommentare zu diesem Artikel dankbar. Weitere detaillierte Informationen zur Verwendung des VNWA-3E finden Sie auf seiner Website: <http://www.hamcom.dk/VNWA-E.html>.

8. Referenzen und weiterführende Literatur

- [Agilent] Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis, 5965-7707E, Agilent Technologies, 2012
http://www.home.agilent.com/agilent/redirector.jsp?action=ref&cname=AGILENT_EDITORIAL&ckey=1000000359%3Aaepsg%3Aapn&lc=eng&cc=US&nfr=-11143.0.00
- [Anritsu] Understanding Vector Network Analysis, Anritsu, 2013
<http://www.anritsu.com/en-us/downloads/application-notes/application-note/dwl10055.aspx>
- [HP] S-Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design, Application Note 95-1, Hewlett-Packard Company, 1997
http://www.home.agilent.com/agilent/redirector.jsp?action=ref&cname=AGILENT_EDITORIAL&ckey=1112800&lc=eng&cc=US&nfr=-11143.0.00
- [RadLab8] Montgomery, C. G., Dicke, R. H., Purcell, E. M., Editors, Principles of Microwave Circuits, Radiation Laboratory Series, Vol. 8, Massachusetts Institute of Technology, McGraw-Hill Book Co., 1948
- [R&S] T-Check Accuracy Test for Vector Network Analyzers utilizing a Tee-junction, 1EZ43, Rhode & Schwarz, 1998
http://www.rohde-schwarz.com/en/applications/t-check-accuracy-test-for-vector-network-analyzers-utilizing-a-tee-junction-application-note_56280-15519.html

Dokumenten Information

Author: Whitham D. Reeve

Copyright: ©2013 W. Reeve

Deutsche Übersetzung:

18.04.2020 DG3OK, Manfred Zillmer