

Teste și Măsurători NanoVNA-F V2

FLORIN CREȚU
YO8CRZ

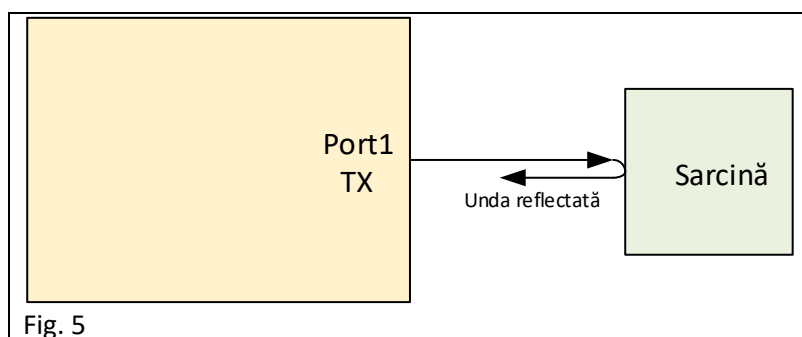
Sumar

Teorie elementară	2
Arhitectura internă NanoVNA	4
NanoVNA-F V2. Măsurători și rezultate	7
Evaluare sarcini de 50 Ohm.....	9
Inductanță 850nH T 50- 2 Amidon	12
Rezistență SMD 0805, 24.9Ohm, 1%	15
Rezistență SMD 0805, 75 Ohm, 1%.....	18
Inductanță SMD 1008, 47nH, 2%	20
Condensator SMD 1111, 100pF, 5% ATC 700B	23
Condensator SMD 1111, 39pF, 5% ATC 700B	25
Atenuator Mini-Circuits VAT-20 20dB	27
Atenuator Mini-Circuits BW-S3W2+ 3dB	28
Atenuator Weinschel 12dB	29
Atenuator Mini-Circuits VAT10 10dB	30
Antenna WiFi 2.4GHz	31
Cablul RG405, după calibrare.....	32
Filtru Cristal 21.4MHz, Span 50kHz, 201pt.	33
Condensator 1000pF, 1%, Mică	34
Detalii Calibrare.....	35
Concluzii.....	36
Addendum	38

Teorie elementară

Foarte pe scurt, există două tipuri de măsurători de bază ce pot fi efectuate cu un VNA:

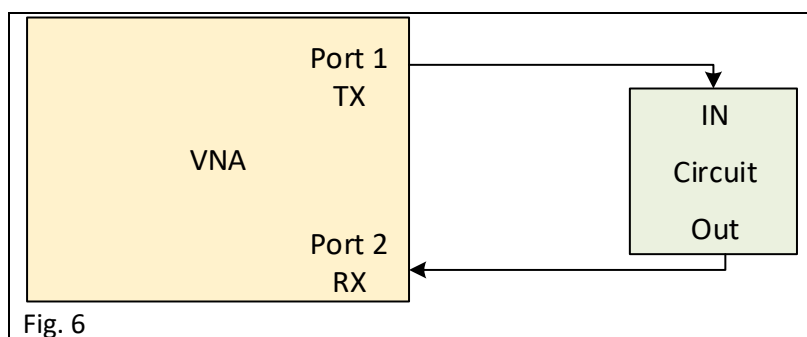
1. **Măsurători bazate pe reflectometrie în domeniul frecvență.** Acestea sunt măsurători care se fac pe **un singur port**, prin care se injectează un semnal cu o anumită frecvență în circuitul măsurat și pe același port este măsurat semnalul reflectat. Măsurând coeficientul de reflexie și unghiul/faza acestuia, se poate deduce impedanța, valoarea unui condensator sau a unei inductanțe la o anumită frecvență, ca și multe altele. Elementul esențial care permite această măsurătoare este o punte direcțională.



În terminologia parametrilor S, acesta este S11.

2. **Măsurători bazate pe transmisia semnalului printr-un circuit.** Aceste măsurători se fac pe **două porturi**, unul ce emite un semnal ce este injectat în circuitul măsurat, iar celălalt recepționează semnalul ce trece prin circuit. Din analiza amplitudinii și a fazei semnalului ce a traversat circuitul măsurat se pot determina un număr important de parametrii.

Astfel, se poate determina caracteristica de amplitudine frecvență a unui filtru, atenuarea unui cablu ori a pierderilor printr-un circuit, timpul de întârziere de grup prin filtru, și altele.



În terminologia parametrilor S, acesta este S21.

Un VNA profesional permite multe alte tipuri de măsurători, cum ar fi baleierea cu un semnal cu putere variabilă și frecvență fixă, pentru a determina punctul de compresie a unui amplificator, măsurători de reflectometrie în domeniul timp, extragerea de parametrii S pe două porturi și multe altele.

NanoVNA F V2 are nu numai gama de frecvență extinsă la 3GHz, dar folosește și un ecran cu dimensiuni mai mari (4.3 inch) și cu rezoluție mai mare (800x400 pixeli). Ecranul IPS permite un unghi de vizualizare mai mare decât ecranele TFT. De asemenea folosește un procesor mai puternic (Cortex M3), cu un clock intern mai mare și care are și o memorie mai mare.

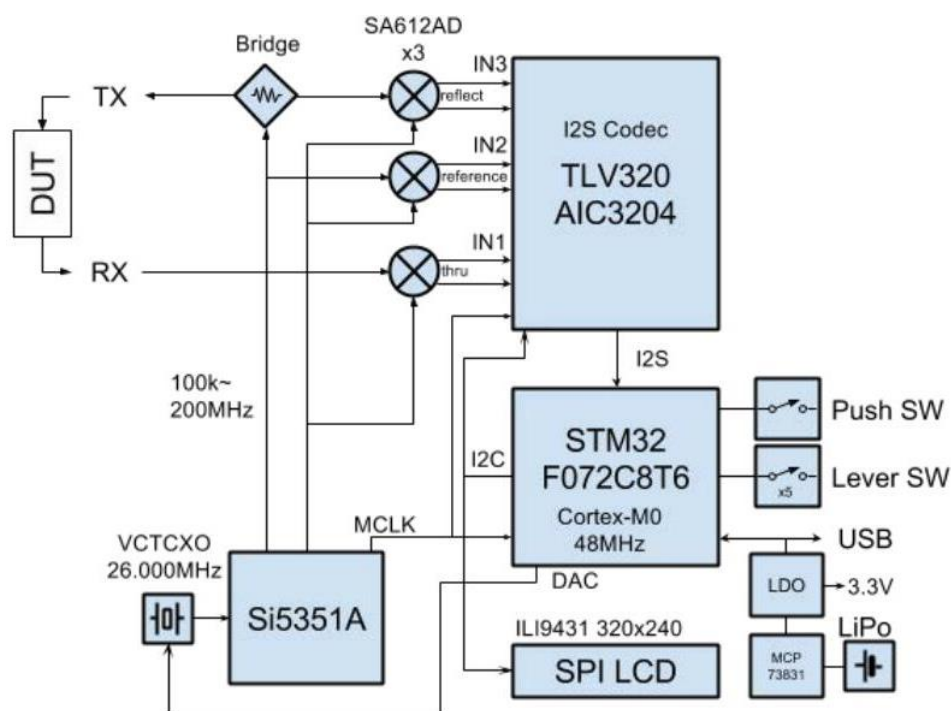
Memoria mai mare a permis creșterea numărului de măsurători ce pot fi stocate intern, a numărului de versiuni de calibrare sau chiar a numărului de puncte în care se face calibrarea și măsurătoarea. Ecranul cu dimensiuni mai mari permite vizualizarea mai ușoară a parametrilor măsurați, ca și controlul mai ușor folosind ecranul tactil. Adevărul este ca mulți utilizatori ai NanoVNA-ului original s-au plâns de utilizarea dificilă a instrumentului datorită dimensiunilor mici ale ecranului și a rezoluției reduse a acestuia.

Toate nanoVNA-urile pot fi controlate nu doar prin intermediul ecranului dar și printr-o interfață USB. Astfel se pot folosi programe pentru control pe PC, sau pentru cei care doresc se poate face chiar controlul prin linie de comandă. Aceste programe pe calculator permit o analiză mai în detaliu a măsurătorilor, ca și alte operații mai sofisticate.

Arhitectura internă NanoVNA

NanoVNA-ul original putea fi folosit pe o gamă de frecvență de până la 300MHz. Piesa centrală este un oscilator programabil, cu o frecvență maximă de 300MHz. Autorii au extins domeniul maxim de frecvență, prin folosirea ingenioasă a armonicilor generate de acest oscilator. Ideea folosirii armonicilor unui oscilator pentru a extinde gama de măsură e mai veche și a fost promovată între alții de [Thomas Baier](#) [DG8SAQ](#) și [Sam Wetterlin](#). DG8SAQ a publicat un articol în revista QEX (Jan/Feb 2009), însă folosind evident componente diferite și în plus necesită un calculator PC pentru operare.

Schema bloc originală (edy555) a nanoVNA-ului este prezentată mai jos:

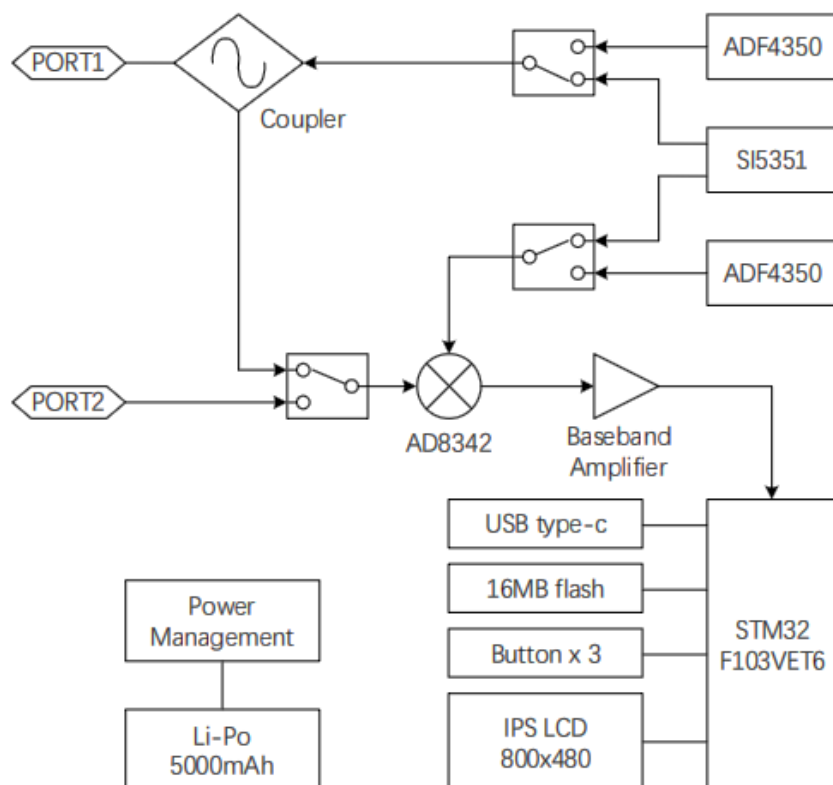


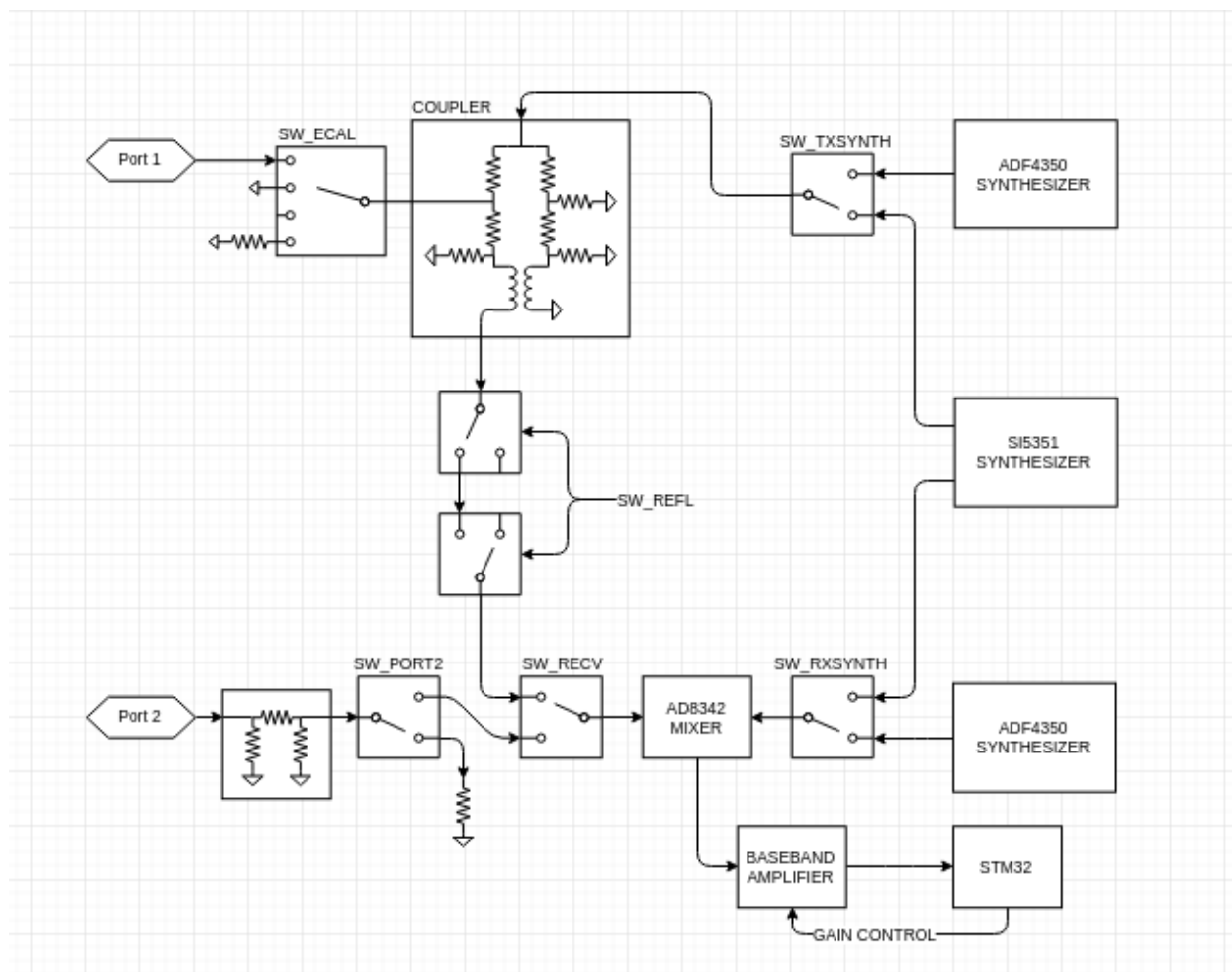
Piesa centrală este oscilatorul de clock programabil Si5351A, cu frecvența maximă de 300MHz. Semnalul de la cele două porturi TX și RX, plus semnalul reflectat sunt mixate și produsul de mixaj de joasă frecvență este prelucrat cu un Codec de la Texas Instruments (în esență o cartelă de sunet, ce conține convertoare A/D și D/A). Datele sunt prelucrate în format digital cu un procesor ST (din seria STM32 ce conține un nucleu Cortex M0). Produsul este prevăzut cu un ecran LCD color- touchscreen de 2.8 inch (320x240 pixeli), ceea ce asigură dimensiuni reduse și o portabilitate maximă. Comenzile se pot da atât folosind ecranul cât și cu ajutorul a trei butoane (sau un buton multiplu). Alimentarea este făcută cu o baterie cu Litiu-polimer de capacitate mică, însă suficientă pentru câteva ore de operare continuă.

Versiunile de software ulterioare au permis creșterea performanțelor inițiale și chiar extinderea gamei de frecvență la peste 1.2GHz, prin folosirea armonicilor a patra și a cincea. Nivelul de putere în armonici scade însă și evident performanțele se degradează rapid la acest nivel și rezultatele sunt destul de aproximative.

La ora actuală a apărut pe piață și o a doua generație (V2) care nu mai folosește regimul armonic. Pentru a extinde gama de frecvență este folosit un Si5351A până la frecvența de cca. 140MHz, după care se comută pe un sintetizor cu ADF4350, ce a permis extinderea gamei de măsură până la 3GHz.

Mai jos este arătată schema bloc a unui NanoVNA F- V2:





Schema bloc Nano VNA-F V2, partea de RF.

NanoVNA-F V2. Măsurători și rezultate

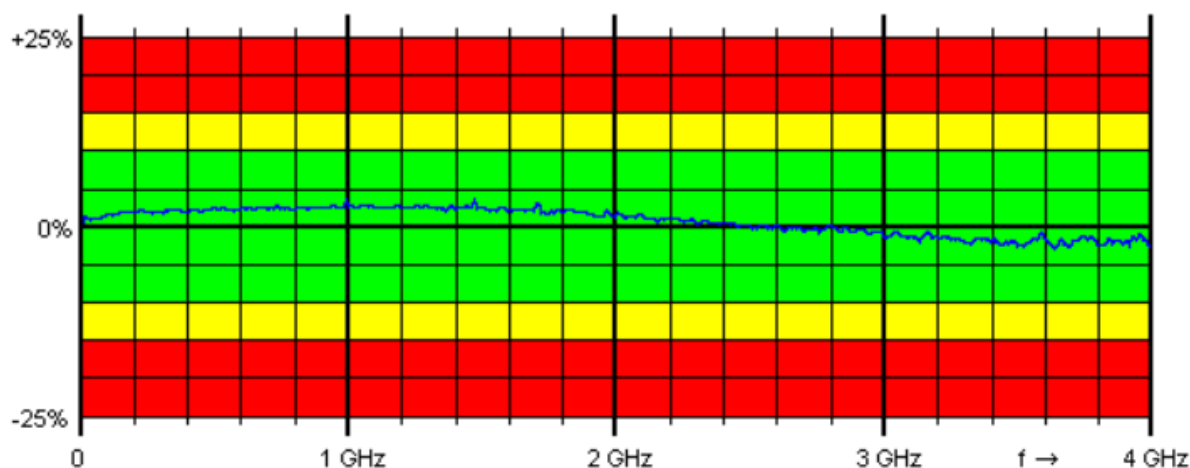
Scopul testelor a fost să determin care sunt limitele de frecvență în care măsurătorile au o precizie rezonabilă și în care rezultatele sunt utile. O evaluare obiectivă a unui asemenea instrument necesită evident și un număr de măsurători comparative, în raport cu un instrument de laborator de calitate, pentru a vedea care sunt diferențele.

Pentru a putea vedea care sunt limitele instrumentului, am folosit același kit de calibrare de laborator pentru ambele instrumente și aceleași cabluri de măsură.

Planul (referința) de măsură a fost în toate cazurile conectorul cablului de măsură.

Am efectuat două tipuri de măsurători: măsurători de reflexie (S11) și măsurători de transmisie (S22).

Probabil cel mai simplu test global pentru un VNA este așa numitul **Test- T**, introdus de Rhode & Schwarz. Pentru acuratețe maximă acest test necesită însă ca VNA-ul să folosească un model intern pentru etaloanele de calibrare, ceea ce nu este cazul în acest moment cu NanoVNA. Rezultatul este prezentat într-un grafic ca în fig. de mai jos, ce permite evaluarea rezonabilă a erorii de măsură funcție de frecvența de lucru. (R&S VNA ZVR)



Testul necesară măsurarea tuturor celor patru parametri S. Pentru ca NanoVNA nu este bidirecțional, trebuie luate două seturi de măsurători și dispozitivul de testare trebuie rotit manual. Probabil că la frecvențe sub 50-100MHz testul să aibă acuratețe acceptabilă chiar dacă calibrarea nu este foarte bună, așa cum este cazul cu un NanoVNA.

Am preferat în aceste condiții să fac niște măsurători comparative cu un VNA HP-8753E. Am măsurat în acest scop un număr de componente atât SMD cât și clasice. Componentele SMD au fost atașate pe conectori SMA, pentru a minimiza elementele parazite. Până la frecvențe de cca. 300-400MHz, diferențele au fost în limita a 1-2% (dacă reactanța capacitivă sau inductivă este apropiată de 50 Ohm). La frecvențe de peste 600MHz rezultatele încep să difere destul de mult, iar la peste 1GHz eroarea de măsură devine

substanțială și rezultatul este foarte aproximativ. Aceste rezultate sunt valabile doar pentru impedanțe aflate în limita 10 Ohm-1kOhm.

Componentele au fost măsurate cu ambele instrumente, datele fiind salvate în format Touchstone, S1P sau S2P. Aceasta a permis importul în diverse programe ce permit o analiză în detaliu a datelor.

Toate măsurătorile comparative sunt făcute cu 201 puncte și același domeniu de frecvență.

Un program ce poate fi folosit cu succes pentru analiza datelor este **Zplots 2.5, de AC6LA**

Au fost prezentate date atât în format cartezian cât și folosind diagrama Smith. Pentru a vedea mai ușor diferențele între datele măsurate cu cele două instrumente, am prezentat datele pe un grafic comun, la finalul datelor pentru fiecare componentă (inductanța, capacitatea sau impedanța).

Conectorii SMA care au fost folosiți pentru măsurare adaugă firește propriile elemente parazite. La frecvența de sub 100-200MHz aceste efecte sunt neglijabile, însă la frecvențe de peste 1GHz efectele sunt din ce în ce mai importante. Am efectuat o procedură de de-embedding parțial, prin care am înlăturat din rezultatul măsurătorii efectul de linie de transmisie a unei porțiuni din conectorul SMA, funcție de tipul acestuia.

Practic, la planul de referință vedem componenta prin intermediul conectorului, porțiunea care iese din conectorul tată, necesitând de-embedding. După caz, este vorba de lungimi fizice de cca 1.8. la 4.5mm, considerând un dielectric de Teflon. Aceasta permite măsurători cu acuratețe mai bună, deși în sistem încă mai rămân și alte surse de eroare. Capătul pinului pe care e lipită componenta suferă de efectul de capacitate terminală (fringe effects), (câmpul EM se extinde din linia de transmisie puțin în afară). Am ignorat aceasta sau efectul dielectricului din teflon asupra componentei măsurate, procedura completă de de-embedding fiind mai complexă și conectorul SMA trebuie caracterizat separat.

Evaluare sarcini de 50 Ohm

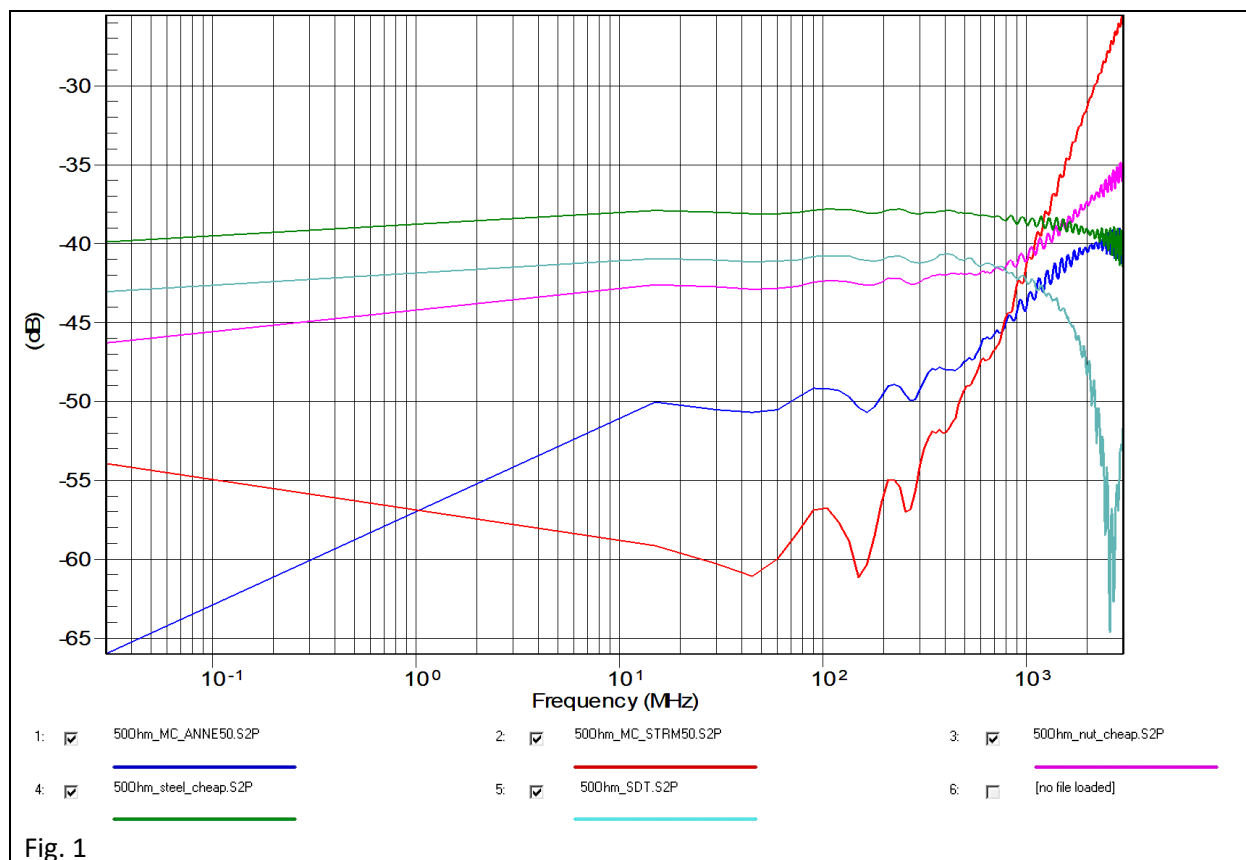
Am acordat o atenție aparte setului de calibrare, pentru că de calitatea acestuia depinde în bună măsură acuratețea măsurărilor, în special la frecvențe mai mari de câteva sute de MHz. Setul de calibrare conține o sarcină de 50 Ohm, un scurt circuit și un conector deschis. Evident cel mai dificil de realizat este rezistența de 50 Ohm care trebuie să se comporte cât mai aproape de o rezistență pură până la frecvența maximă de operare. Conectorul în scurt și cel deschis sunt mult mai simplu de realizat.



Fig. de mai sus arată aspectul kitului de calibrare: Conector deschis, în scurt și 50 Ohm. Sarcina de 50 Ohm primită cu NanoVNA-ul meu este diferită de cea din Fig. de mai sus.

Am evaluat un număr de 5 sarcini coaxiale SMA, inclusiv etalonul de 50 Ohm furnizat cu NanoVNA F V2.

Rezultatele sunt prezentate cumulat în graficul de mai jos, pentru un domeniu de frecvență de la 30kHz la 3GHz.



În Fig. 1 este arătat parametrul RL - Return Loss (pierderi de reflexie) pentru rezistențele de sarcină măsurate. Gama de frecvență este reprezentată pe o scară logaritmică, iar măsurătorile au fost făcute cu 201 puncte (cca. 15 MHz între punctele de măsură). Un ochi versat va depista probabil o mică problemă... dar care e fără consecințe.

Figura de mai sus permite o comparație între calitatea diverselor referințe. Cu excepția unei sarcini SMA cu corp din oțel inox (curba verde), celelalte sarcini măsurate au un RL mai bun de -40 dB.

Tabel 1 Etaloanele de 50 Ohm evaluate.

				
Mini-Circuits ANNE-50	Mini-Circuits STRM-50	NanoVNA-F-V2 STD	Neidentificat Oțel-inox	Marcă neidentificată

(RL-Return Loss indică cu cât puterea reflectată de sarcină este mai mică decât puterea trimisă spre sarcină. Cu cât numărul este mai negativ, cu atât adaptarea este mai bună).

În mod clar etalonul din kitul de calibrare (50 Ohm_STD- curba albastru/gri) are o optimizare/compensare făcută la frecvența de cca. 2.5GHz, pentru că este mai bună decât toate celelalte. RL este ceva mai bun de 40dB la frecvențe sub 1GHz, ceea ce nu este foarte bine, însă suficient pentru aplicații radioamatoricești.

De remarcat că referințele MiniCircuits ANNE-50 (caracterizată până la 18GHz) și MiniCircuits STRM-50 (caracterizată până la 2GHz, însă utilizabilă până la 1GHz), au la frecvențe de sub 100MHz un RL mai bun de -50...-55dB ceea ce este foarte bun. Personal prefer ANNE-50, care are și un preț rezonabil.

Kiturile de calibrare profesionale conțin etaloane cu performanțe bune, însă nu ieșite din comun. Ceea ce e deosebit la acestea, și motivul pentru care costă atât de mult, este însă repetabilitatea excepțională a acestora ca și stabilitatea în timp. Mai mult, modelul de eroare a acestora ce conține elementele parazite ale acestora este cunoscut cu precizie.

VNA-urile profesionale au în memorie datele acestor kituri și atunci când este făcută calibrarea, aceste date sunt folosite pentru a efectua toate corecțiile necesare. În felul acesta se poate atinge o precizie cu mult mai mare a măsurătorilor, dincolo de precizia absolută a kitului în sine.

Din păcate nanoVNA-urile actuale nu permit folosirea internă a unui model de eroare pentru etaloane.

Despre aspectul mecanic al acestor etaloane.

Atunci când se face strângerea conectorului, nu este permisă rotația pinului central în conector. Din cauza asta conectorii SMA de calitate (și mulți alții) sunt prevăzuți cu o piuliță de strângere, care se rotește independent de corpul conectorului. Aceste cerințe sunt și mai acute pentru un echipament de laborator la care se atașează conectori de sute sau mii de ori.

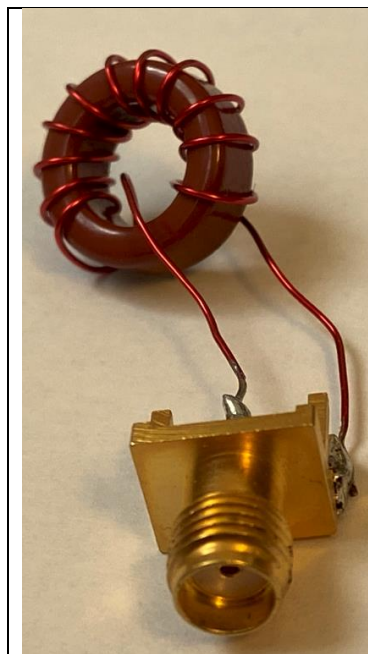
Unele referințe vândute cu nanoVNA-uri ieftine nu au aceasta piuliță, întregul corp rotindu-se atunci când conectorul este strâns. Este evident mai simplu și mai ieftin, însă aceasta duce la degradarea prematură a contactului elastic central în conectorul mamă.

Referințele pentru scurt și gol furnizate cu NanoVNA-F V2 nu au piuliță, în timp ce conectorul pentru referința de 50 Ohm are.

Pentru cablurile folosite pentru aparatura de măsură, într-un mediu de laborator, se preferă deseori conectori nu din alamă/bronz aurit (care au performanțele cele mai bune), ci cele care au partea filetată din oțel inox nemagnetic. Aceasta asigură, o durată de viață a conectorului substanțial mai mare.

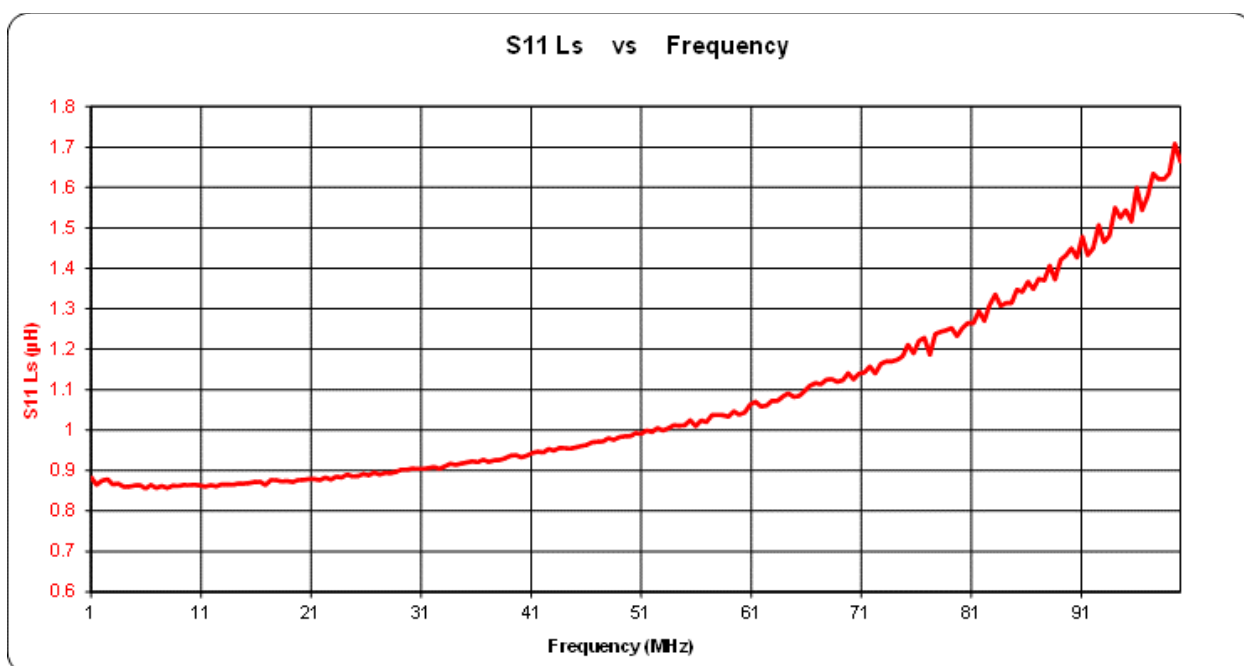
În mod normal, conectorii se strâng folosind o cheie dinamometrică, pentru a nu depăși cuplul maxim și a accelera uzura. Nu este însă cazul pentru aplicațiile de amatori.

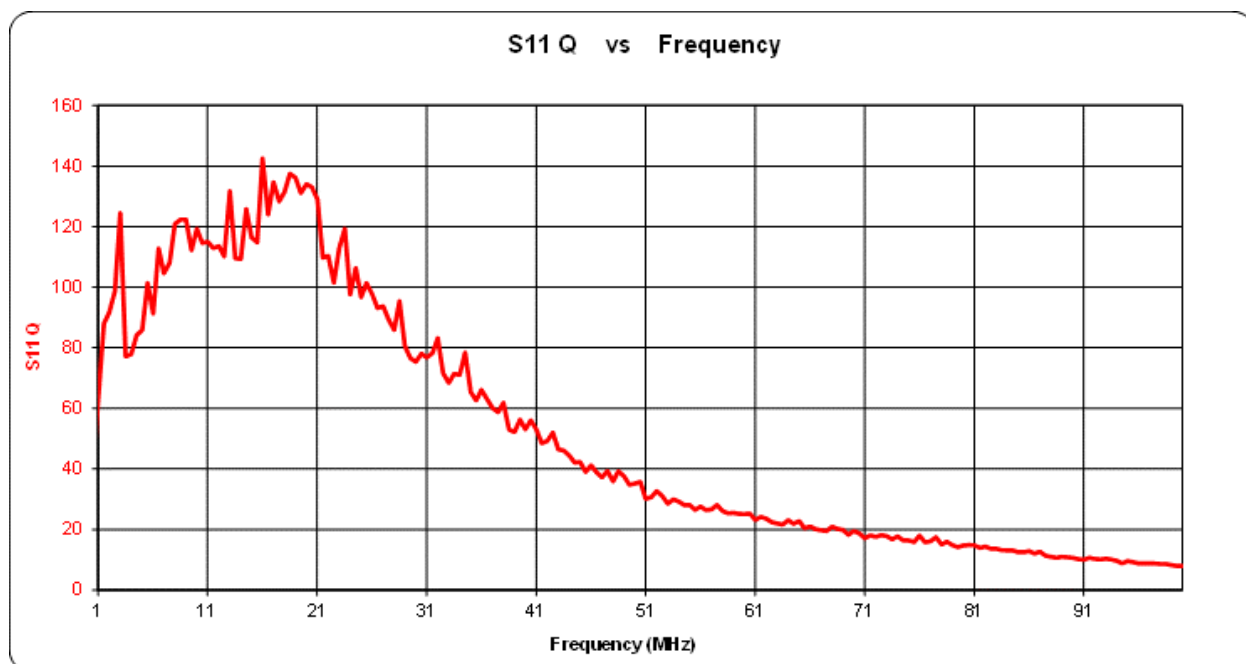
Inductanță 850nH T 50- 2 Amidon



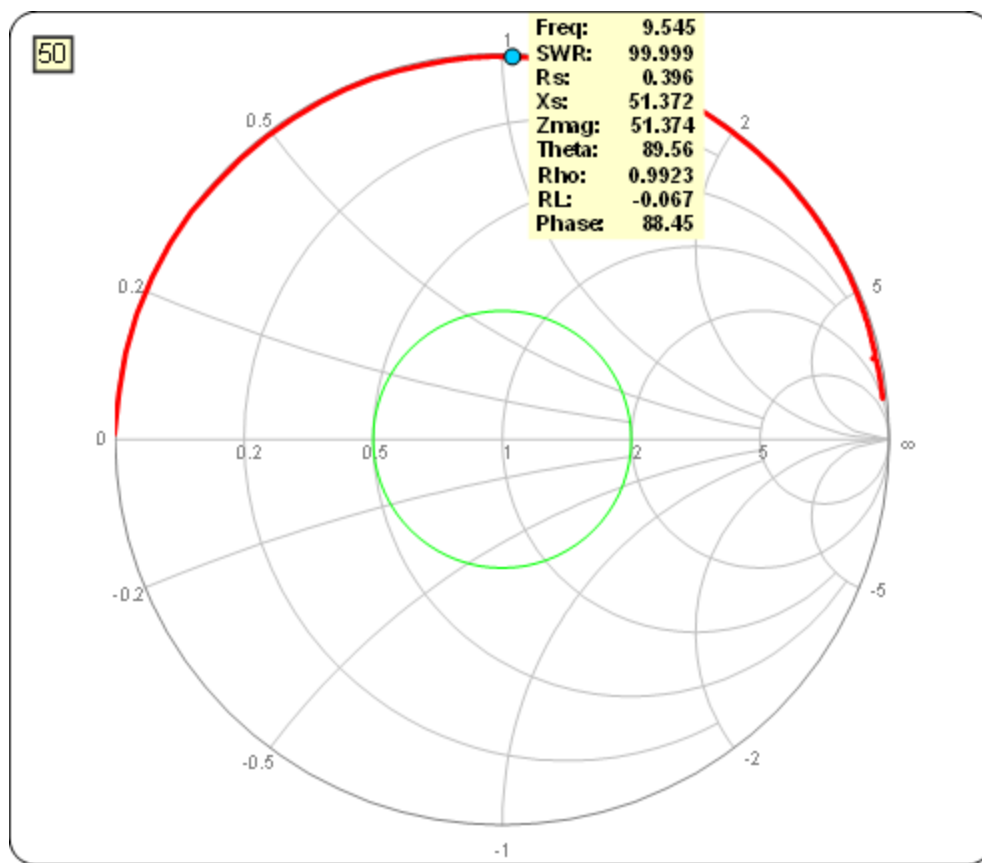
Inductanță T 50- 2 Amidon Toroid 11 spire. 850nH

Valoarea măsurată a inductanței este cea așteptată. Eroarea cea mai mare ce se observă la frecvențe joase și este o eroare previzibilă, pentru că la frecvențe foarte reduse (50kHz) mărimea reactanței este de ordinul a 0.25 Ohm și e apropiată de mărimea rezistenței ohmice de pierdere. Valoarea efectivă a inductanței crește pe măsură ce frecvența crește spre valoarea frecvenței de auto rezonanță paralelă. Graficul de mai jos prezintă din acest motiv date pentru frecvențe mai mari de 1MHz.



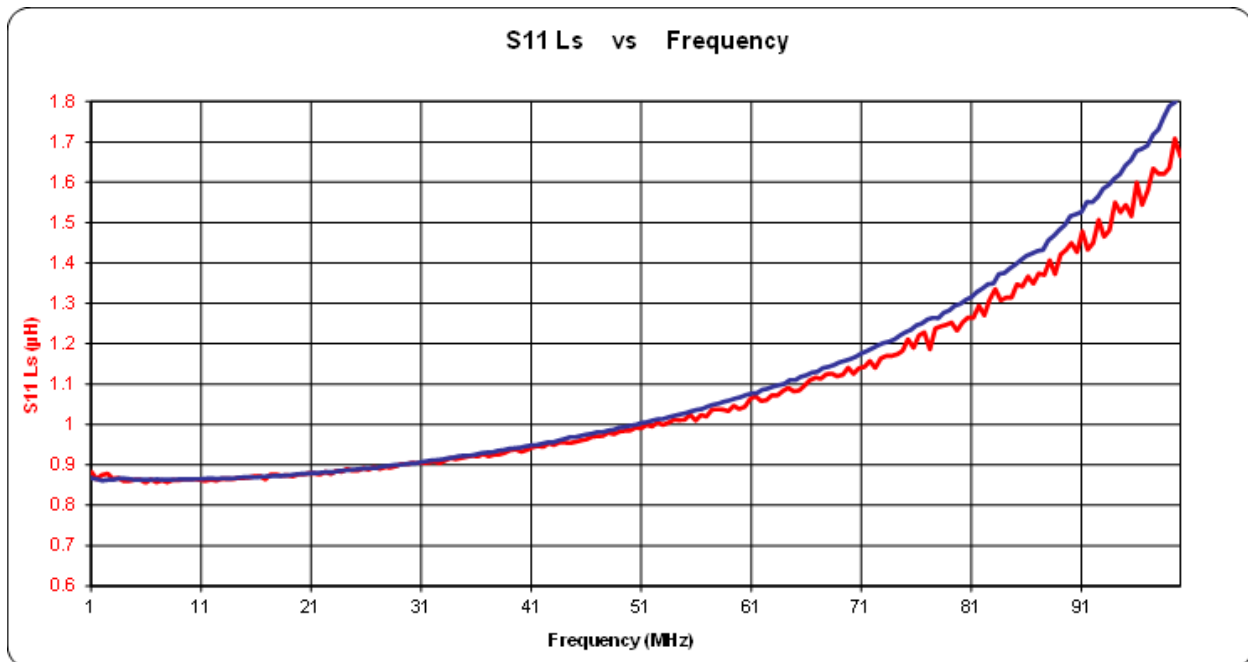


Q-ul măsurat cu această metodă se face cu ajutorul raportului X/R , însă rezultatul este foarte aproximativ, pentru că un VNA are erori mari când măsoară rezistențe de pierdere de sub 1 Ohm. Bobinele cu Q foarte mare (peste 300-400) nu pot fi evaluate cu această metodă.

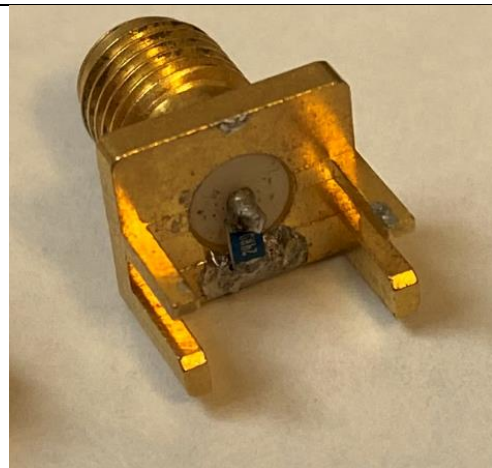


Când reprezentăm S_{11} pentru un inductor pe o digramă Smith, punctele de măsură sunt în zona inductivă a diagramei. În partea stângă unde este reactanța minimă, frecvența de test este evidentă minimă. În partea dreaptă, reactanța crește cu frecvența. În acest caz frecvența maximă a măsurătorii a fost de 100MHz și nu permite vizualizarea atingerii autorezonanței inductanței. La autorezonanța paralelă, impedanța crește foarte mult, și după depășirea frecvenței de autorezonanță, impedanța coboară pe diagrama Smith în zona capacitivă.

Comparație între inductanța de 850nH măsurată HP8753 (albastru închis) și NanoVNA-F V2 (roșu)

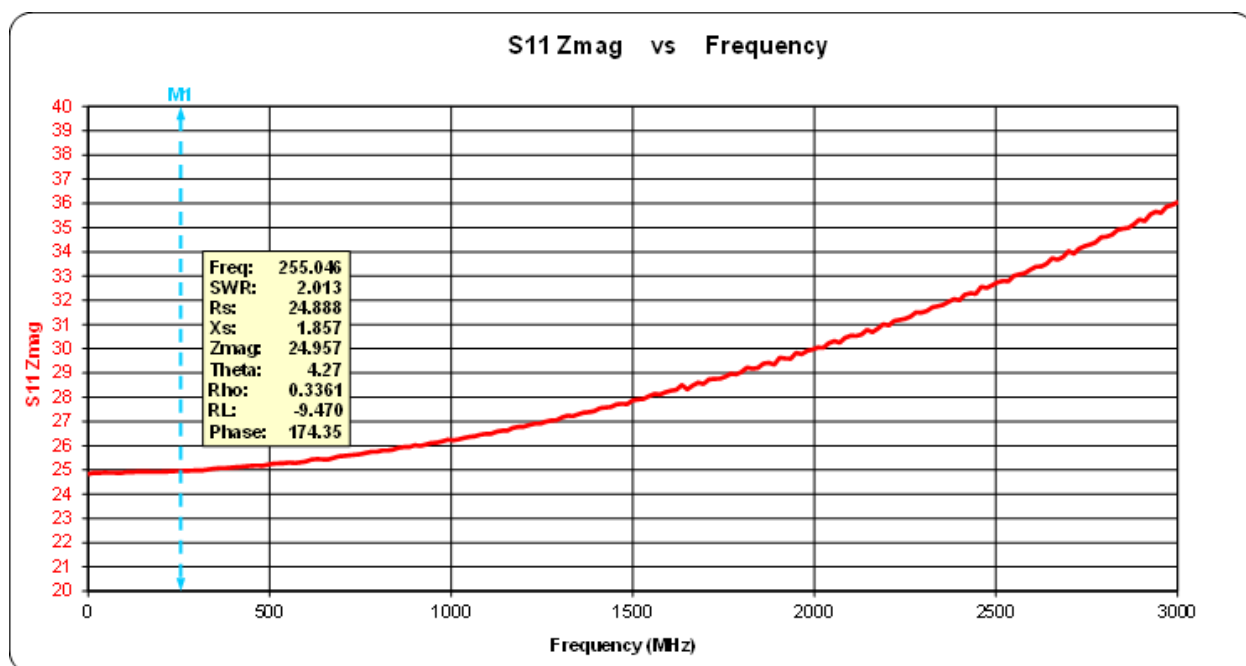


Rezistență SMD 0805, 24.9Ohm, 1%



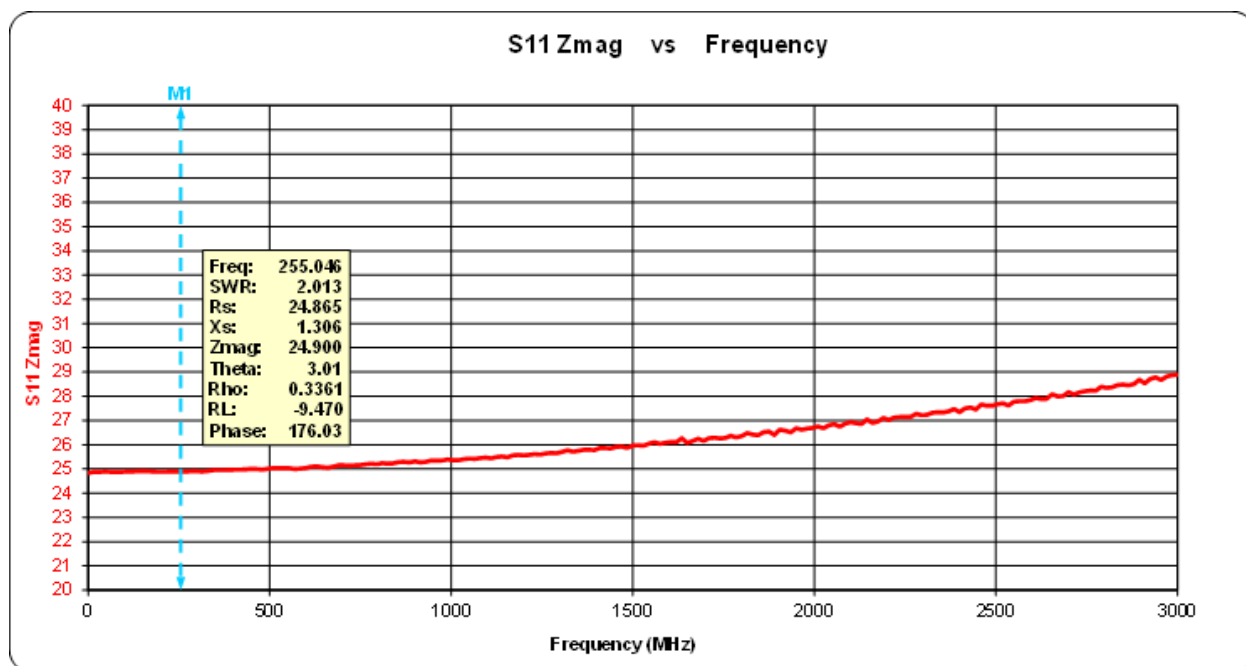
24.9 Ohm, 1%, mărime 0805.

Graficul arată mărimea impedanței. La frecvența de măsură (Marker M1) reactanța parazită este neglijabilă în acest caz.



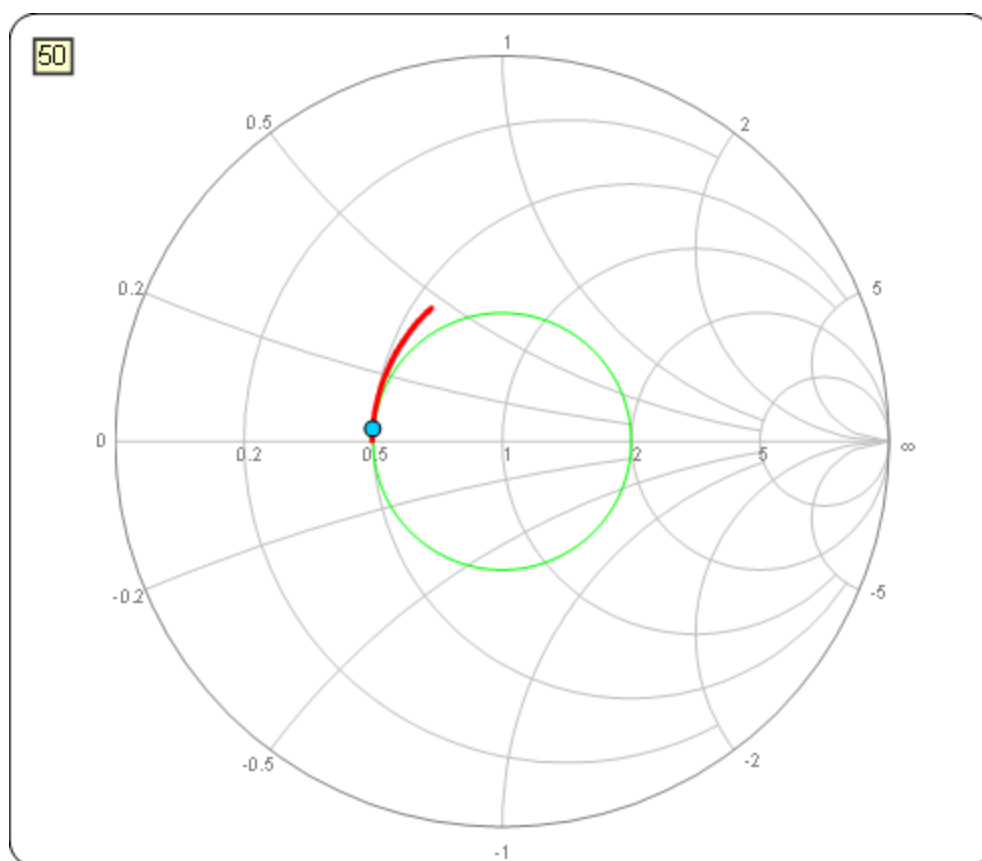
Rs=24.88 Ohm, Xs=1.85Ohm @ 255MHz

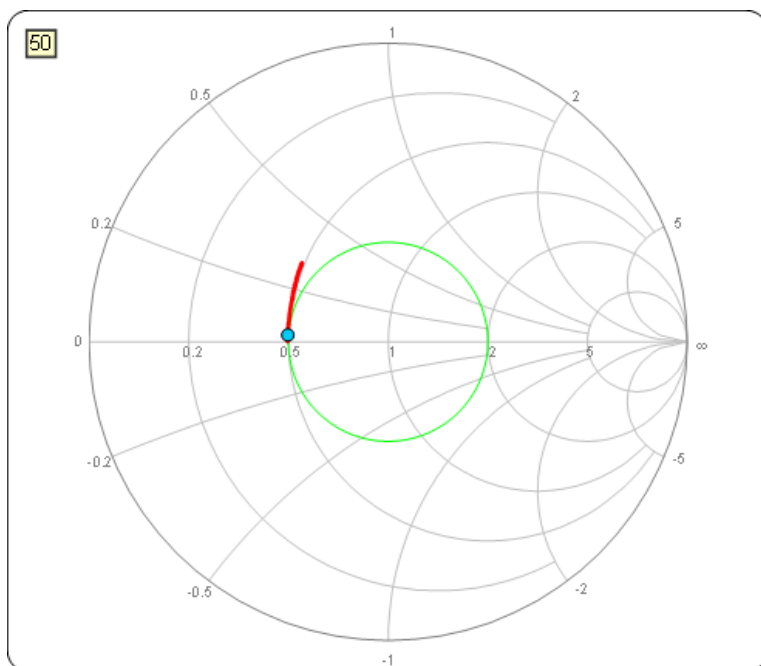
Pentru reducerea erorilor se recurge la extragerea din rezultate a efectelor unei linii de transmisie parazite cu lungimea de cca. 1.8mm. Valoarea măsurată a rezistenței este foarte bună, fiind identică cu cea măsurată cu un instrument de precizie în curent continuu.



1.8mm TL de-embedded $R_s=24.86\Omega$, $X_s=1.3\Omega$ @ 255MHz

Mai jos sunt arătate diagramele Smith pentru măsurătoarea brută și cea de-embedded.



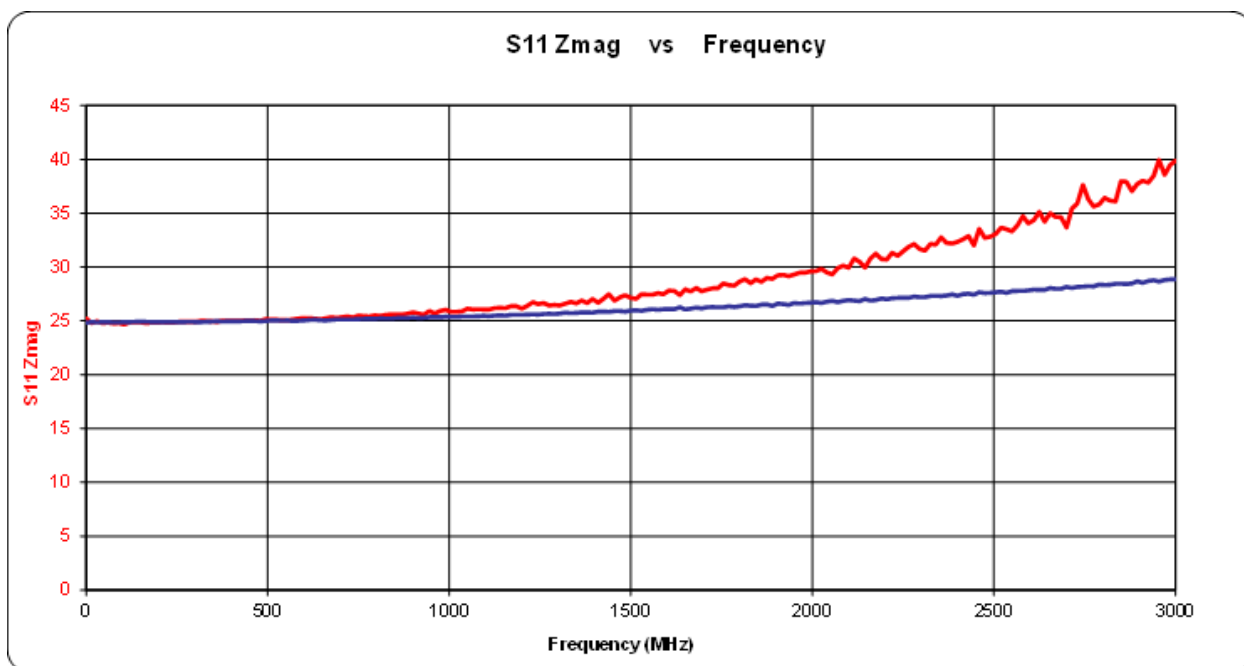


1.8mm TL De-embedded

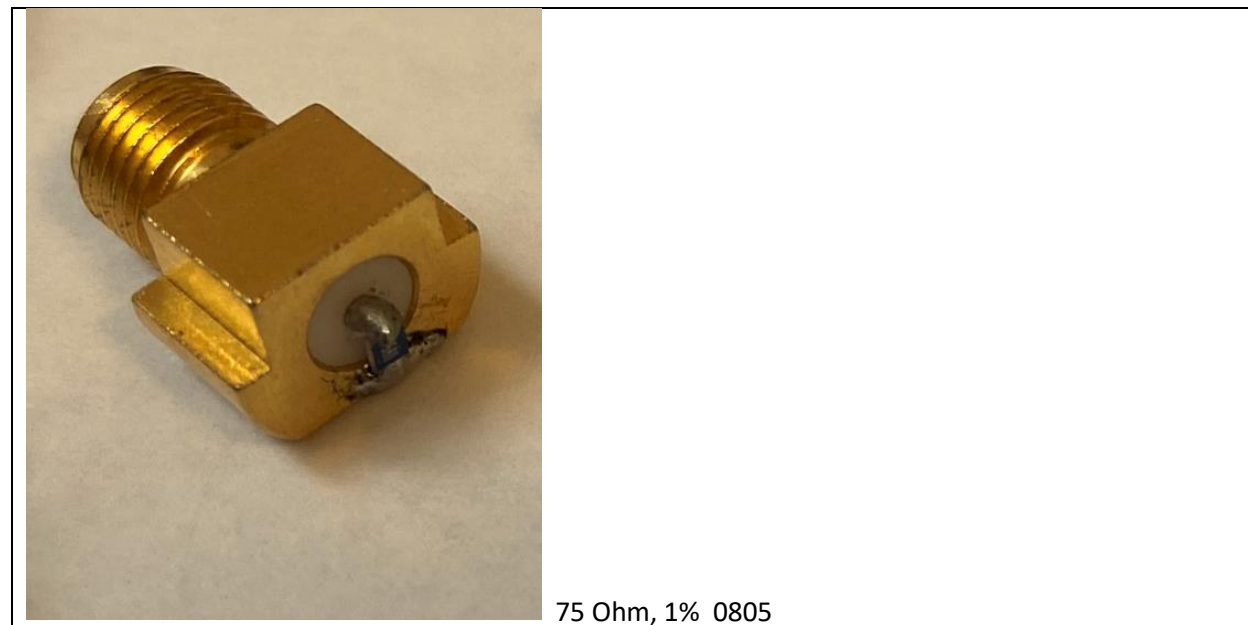
Reducerea dispersiei de pe digrama Smith indică eliminarea transformării reactanțelor induse de linia de transmisie (TL). Impedanța rezistenței măsurate la frecvențe mari devine inductivă.

Rotația impedanței datorate liniei de transmisie se face în sensul acelor de ceasornic pe diagrama Smith.

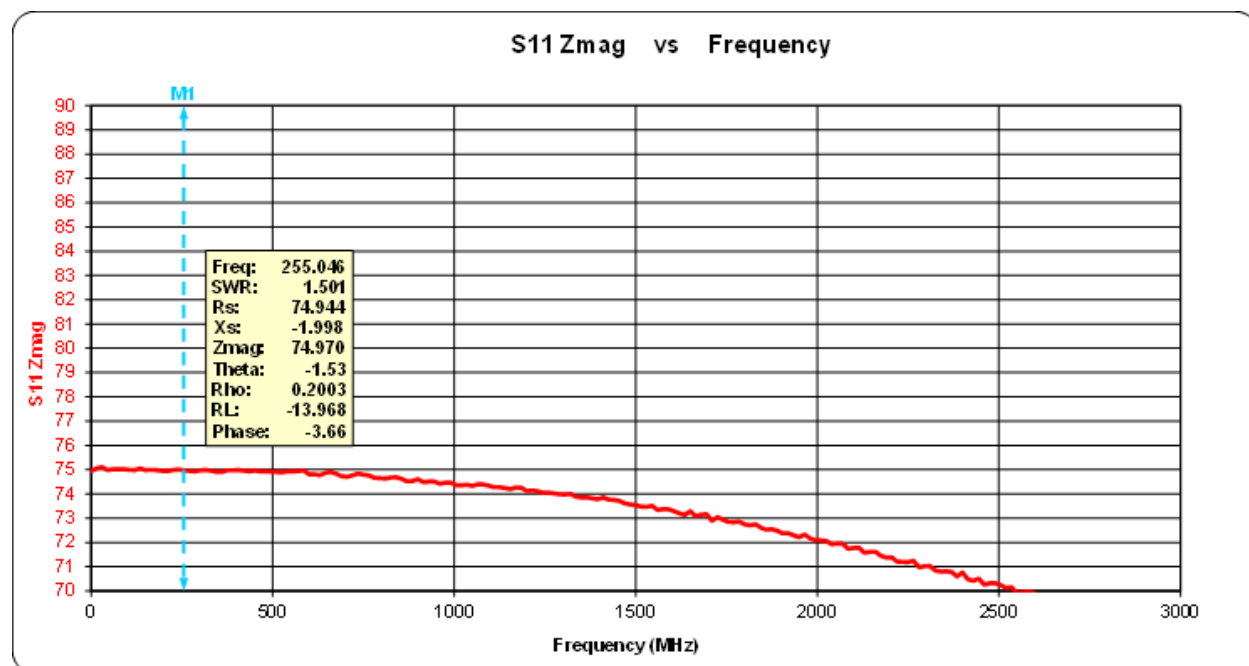
Valoarea impedanței măsurate comparativ pe HP8753E (Curba albastră) și NanoVNA-F V2 (Curba roșie)



Rezistență SMD 0805, 75 Ohm, 1%

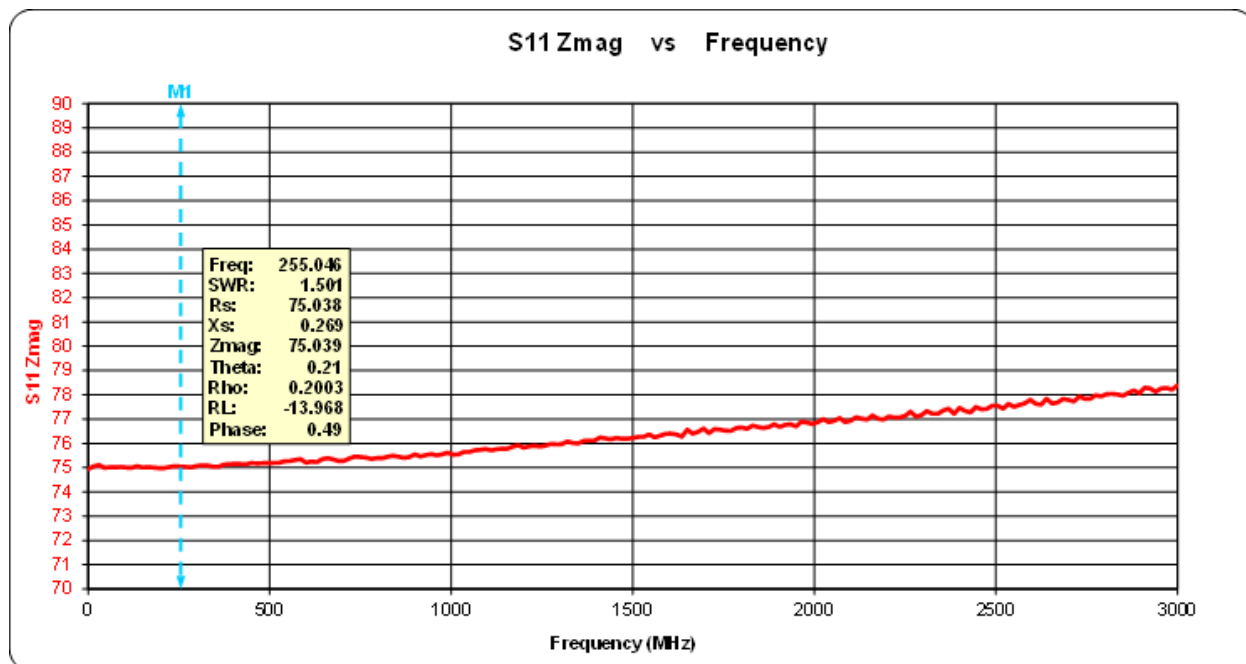


Conectorul SMA folosit pentru această măsurătoare are corpul mai lung, deci efectul liniei de transmisie este mai pronunțat, linia fiind mai lungă.



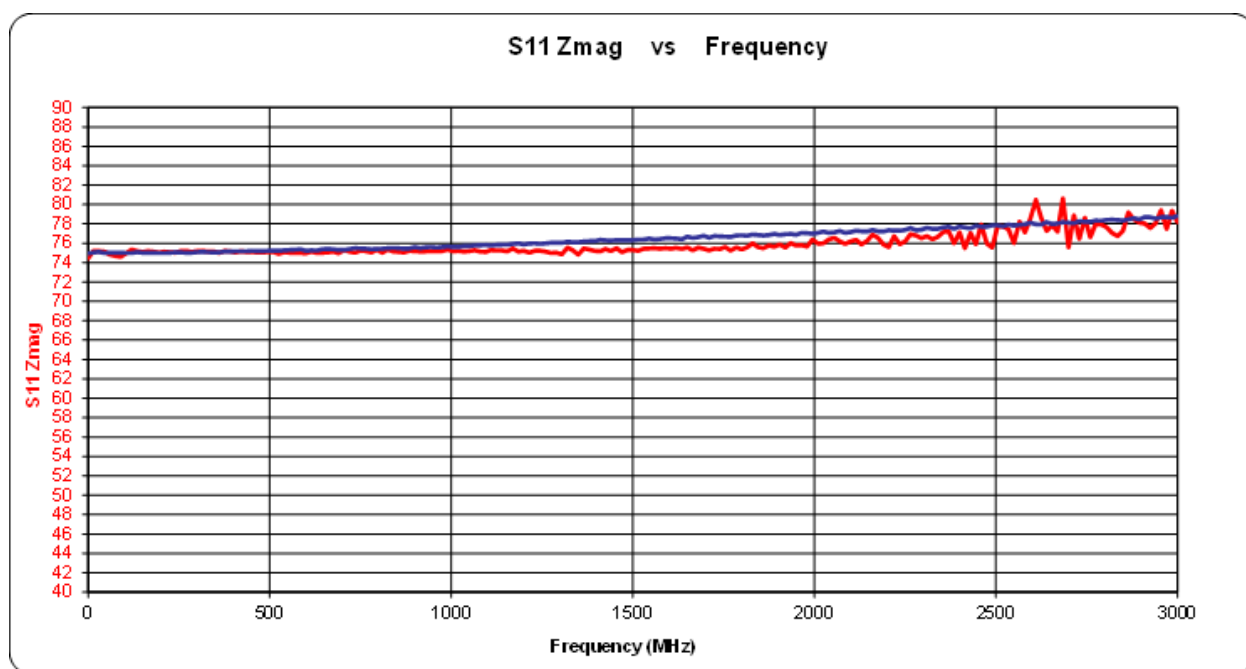
Rs=74.94Ohm, Xs=-1.99Ohm @ 255MHz

Valoarea măsurată a rezistenței în acest caz diferă doar la prima zecimală în raport cu cea măsurată cu un instrument de precizie.

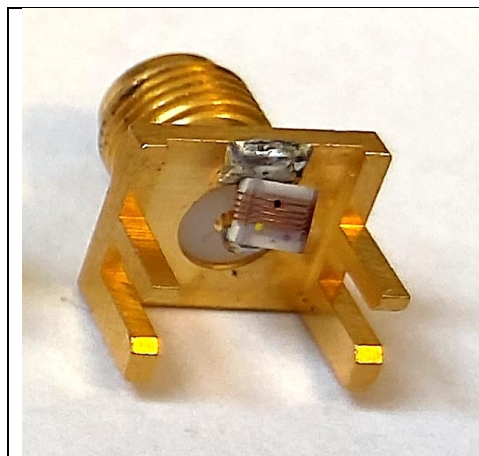


TL=4.5mm De-embedded, $R_s=75\Omega$, $X_s=0.269$ @ 255MHz

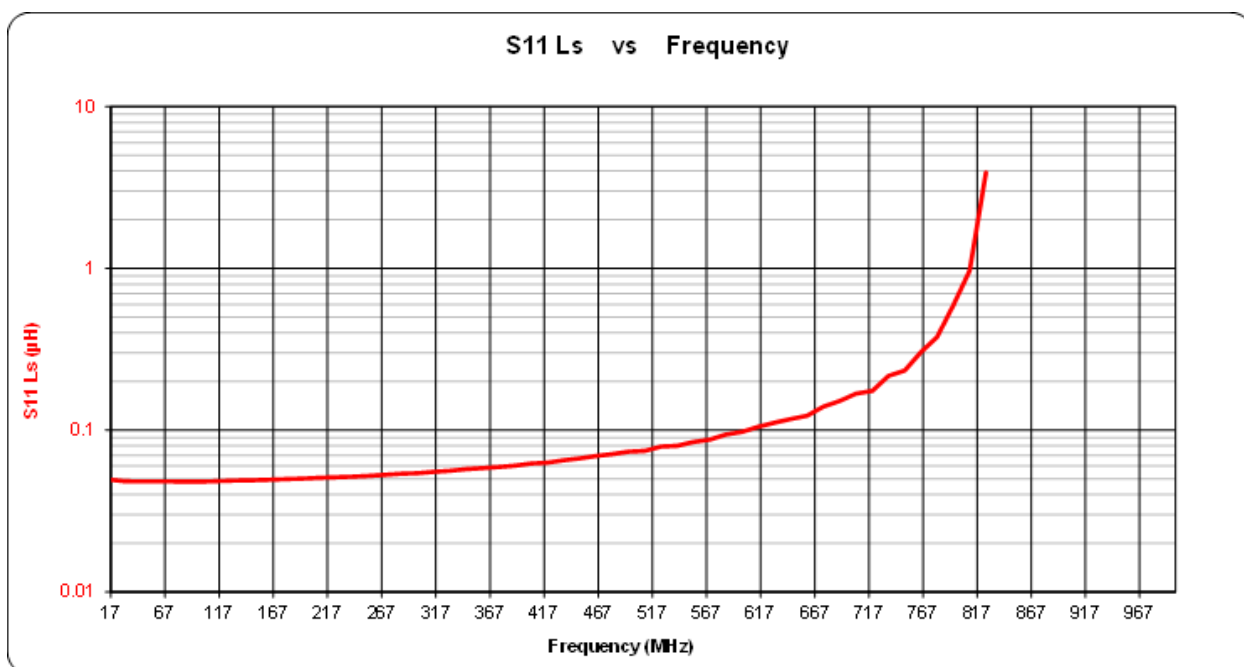
Comparație, HP8753E (curba albastră), NanoVNA-F V2 (curba roșie)



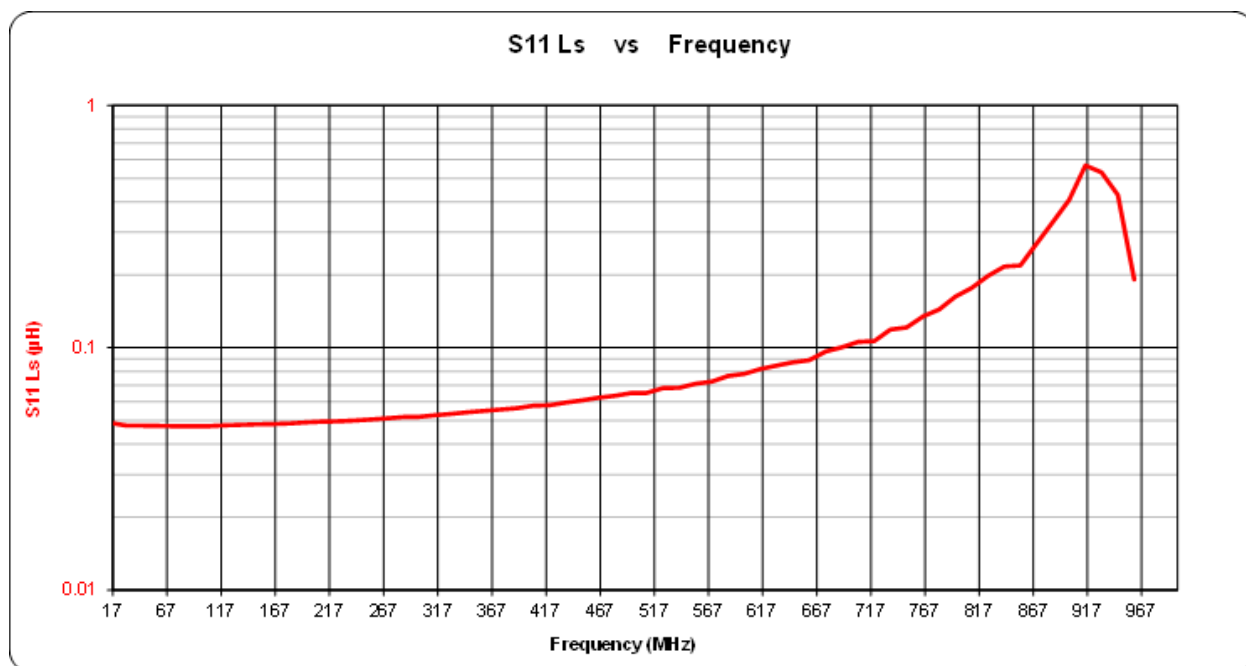
Inductanță SMD 1008, 47nH, 2%

Inductor Coilcraft 1008HQ-47N **47nH**, 2%, Q=75 at

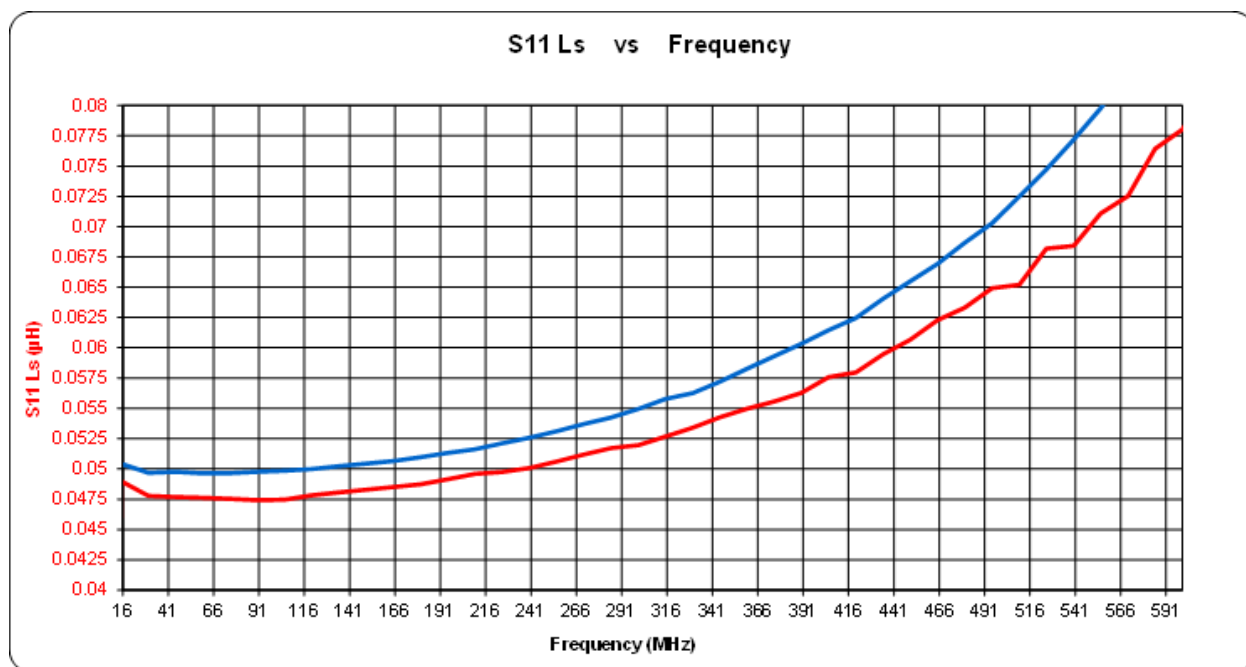
350MHz (2.92x2.79x2.03mm)



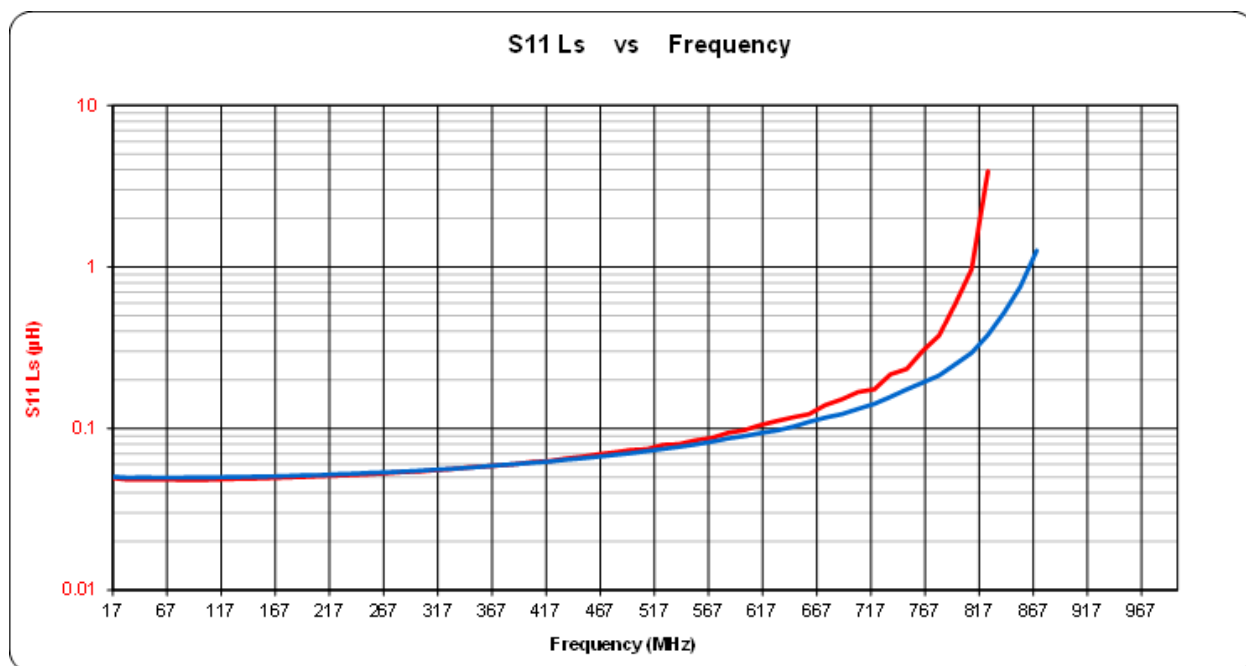
Măsurătoare NanoVNA, efectul conectorului (TL=1.8mm) de-embedded. Măsurătorile la joasă frecvență pentru acest inductor au erori mari datorită reactanței prea mici.



Coilcraft S2P file 10HQ47N.S2P. Test fixture de-embedded



Comparație, HP8753E (curba albastră), NanoVNA-F V2 (curba roșie)



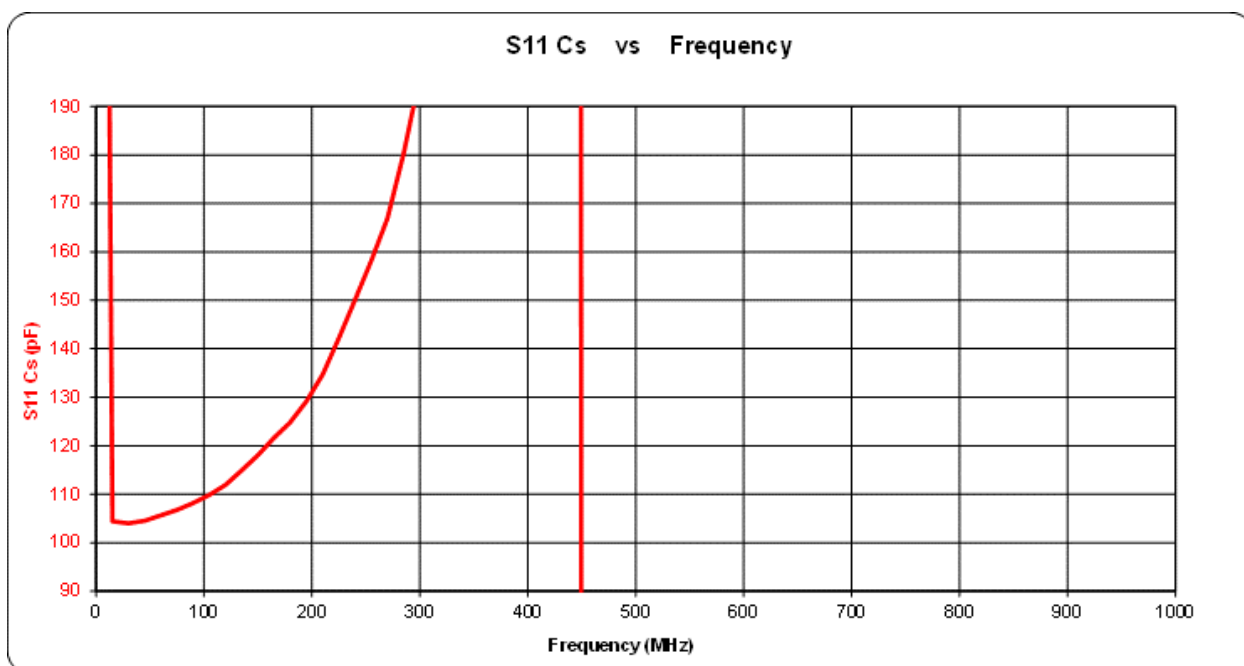
În mod clar diferențele de inductanță sunt minore până la frecvențe de 400-500MHz însă valorile diverg pe măsură ce se apropie de frecvența de autorezonanță. În acest caz există o diferență de cca. 15-20% între frecvențele de autorezonanță, care trec de 1GHz

Condensator SMD 1111, 100pF, 5% ATC 700B



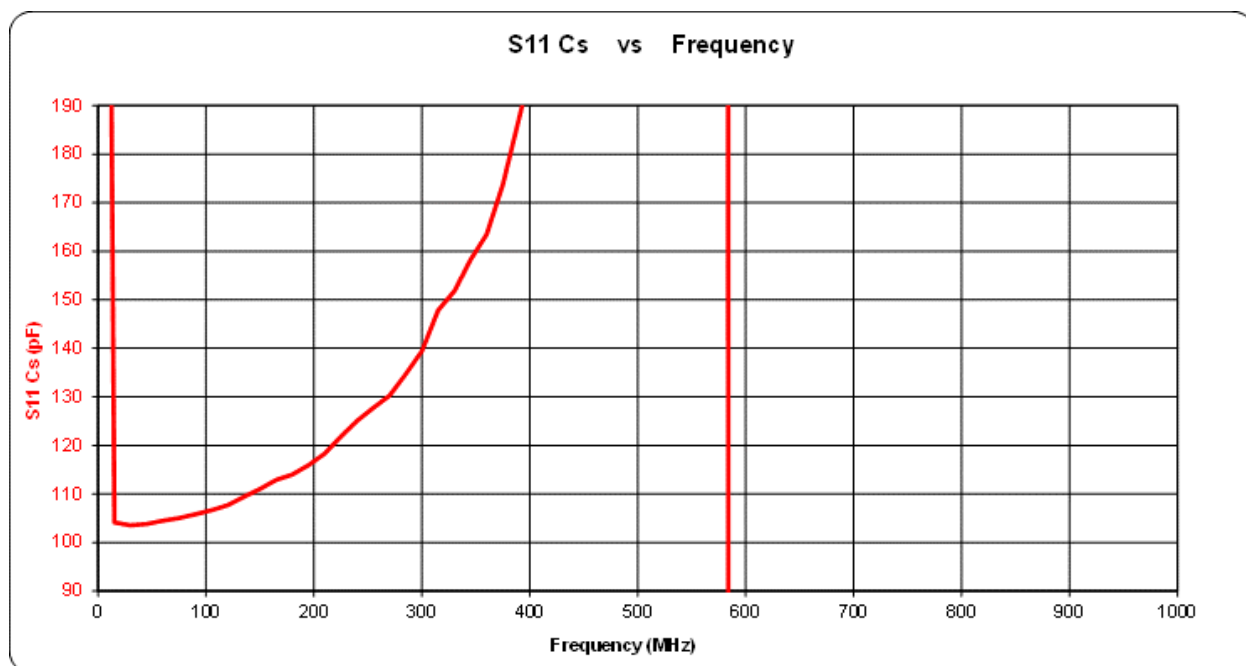
ATC700B-100p, 5%

(2.79x2.79x2.59mm) (SFR~600MHz)

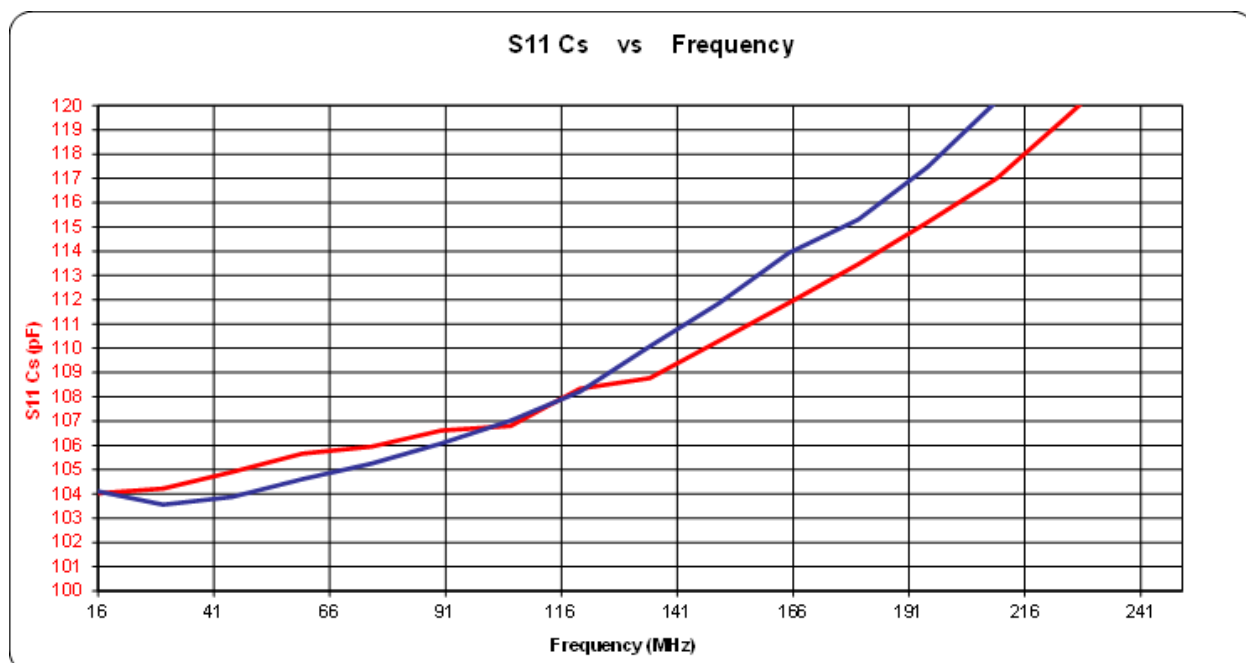


A se ignora primul punct de măsură la frecvență joasă pentru care reactanța este prea mare pentru a putea fi corect măsurată. Măsurătoarea este făcută cu 201 puncte pentru 50kHz-3GHz.

Mai jos De-embedding 2.3mm SMA Coax.



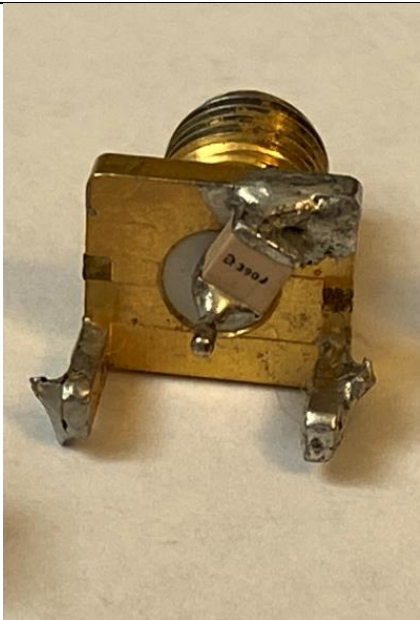
SRF se mută mai aproape de 600MHz când se recurge la de-embedding TL=2.3mm . Valoarea măsurată cu un instrument de precizie este 103.5pF @ 30MHz.



Comparație între același condensator ATC700B 100pF, măsurat cu HP8753E (Albastru) și NanoVNA-F-V2

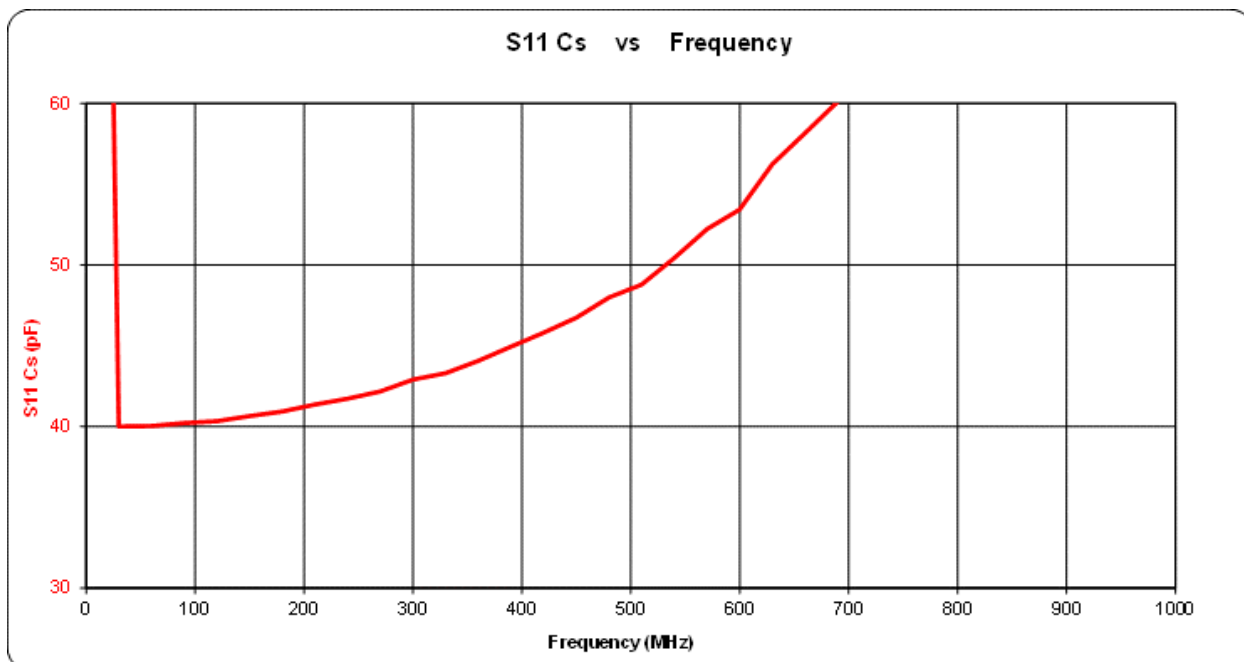
În ambele cazuri s-a recurs la de-embedding, TL=1.8mm (Teflon). Condensatorul a fost de asemenea măsurat cu o punte de precizie la frecvența de 100kHz și valoarea rezultată a fost de 103.6pF.

Condensator SMD 1111, 39pF, 5% ATC 700B

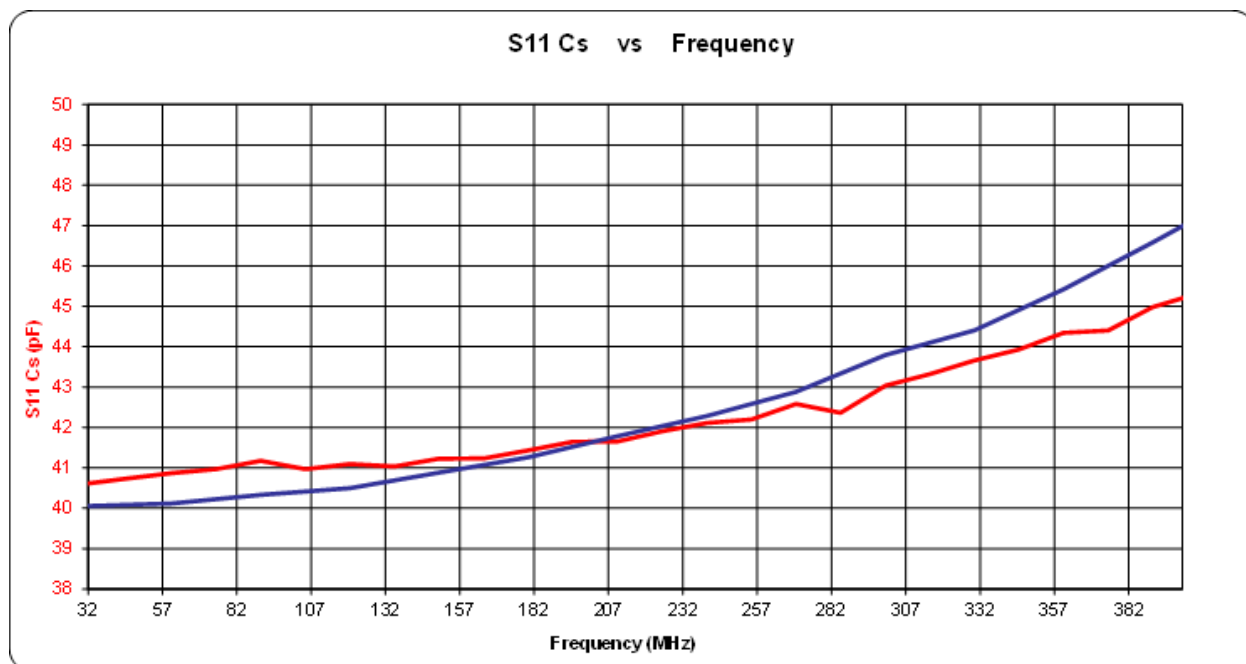


VNA)

ATC700B 39pF, 5%, SRF~1050MHz (HP), SRF ~1170MHz (Nano

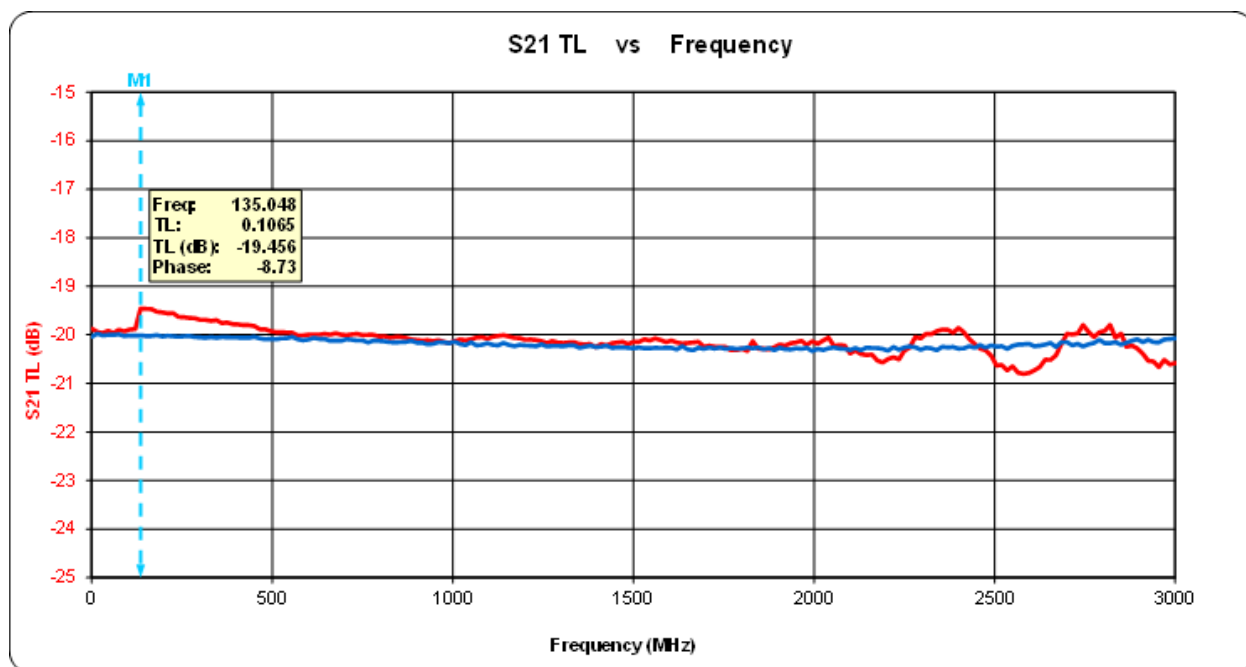


Măsurătoare efectuată cu nanoVNA F V2. Rezultatul este cu de-embedding TL=1.8mm.



Comparație între măsurătorile efectuate pe același condensator de 39pF cu HP8753E și nanoVNA-F V2. Ambele măsurători sunt cu de-embedding TL=1.8mm

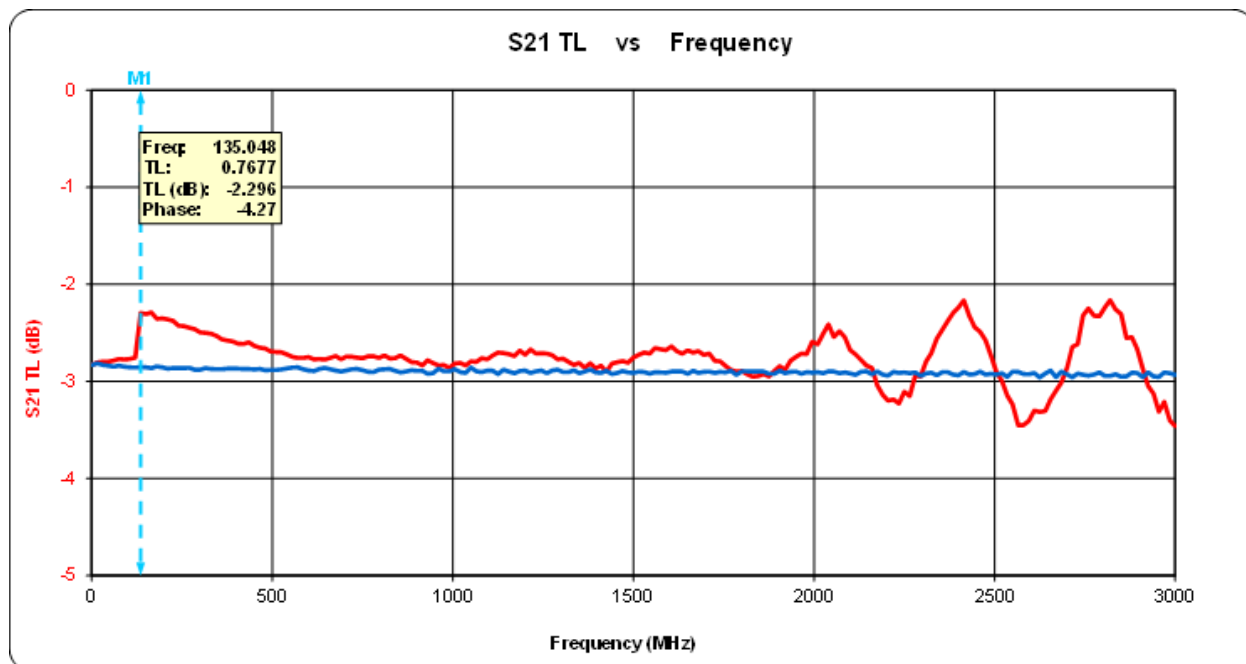
Atenuator Mini-Circuits VAT-20 20dB



Red= NanoVNA-F V2

Dark blue= HP8753E

Atenuator Mini-Circuits BW-S3W2+ 3dB



Red= NanoVNA-F V2

Dark blue= HP8753E

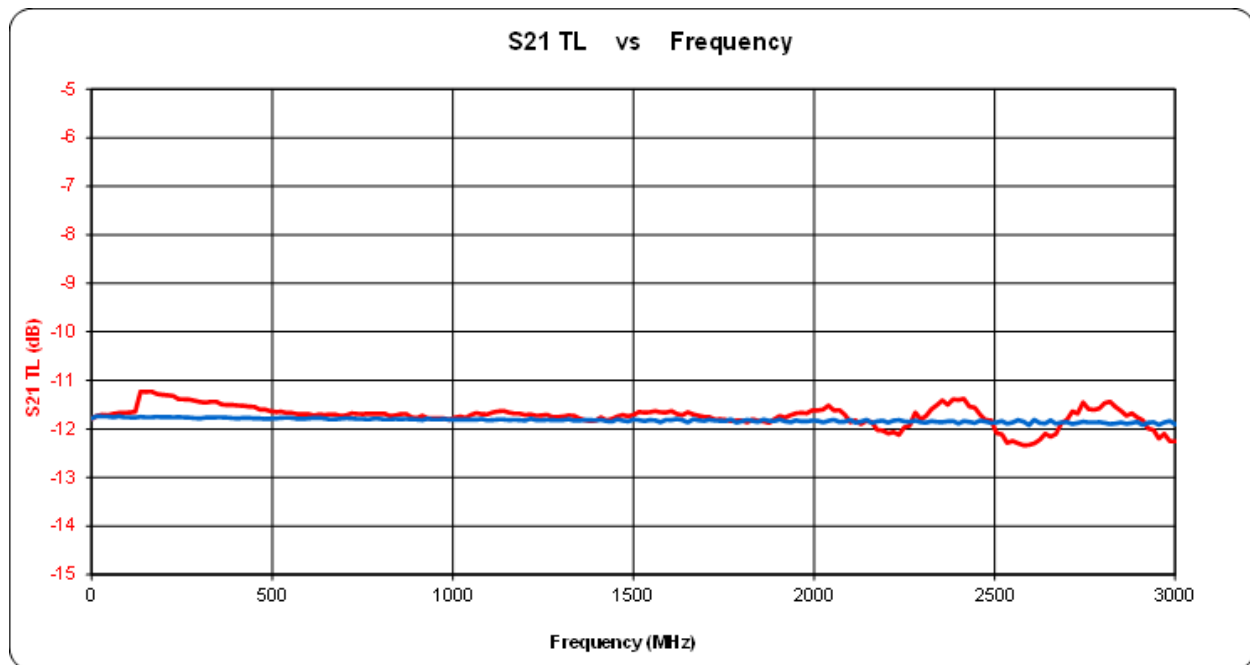
Se observă erori cauzate de trecerea de la oscilatorul pentru frecvențe joase Si5351A și cel pentru frecvențe mari ADF4350, la frecvența de 135MHz. Posibil ca eroarea să fie datorată diferenței de nivel dintre cele două oscilatoare, și a interpolării defectuoase. În același timp, RL pentru Portul 2, ca și cablul de măsură pot accentua acesta problemă. Eroarea este de cca 0.7dB la atenuatorul de 3dB și cca 0.55dB la atenuatoarele mai mari.

La frecvențe mai mari apare o undulare, cauzată de reflexiile interne din instrument. Cu modelul actual de calibrare aceste erori la frecvențe mari nu pot fi eliminate.

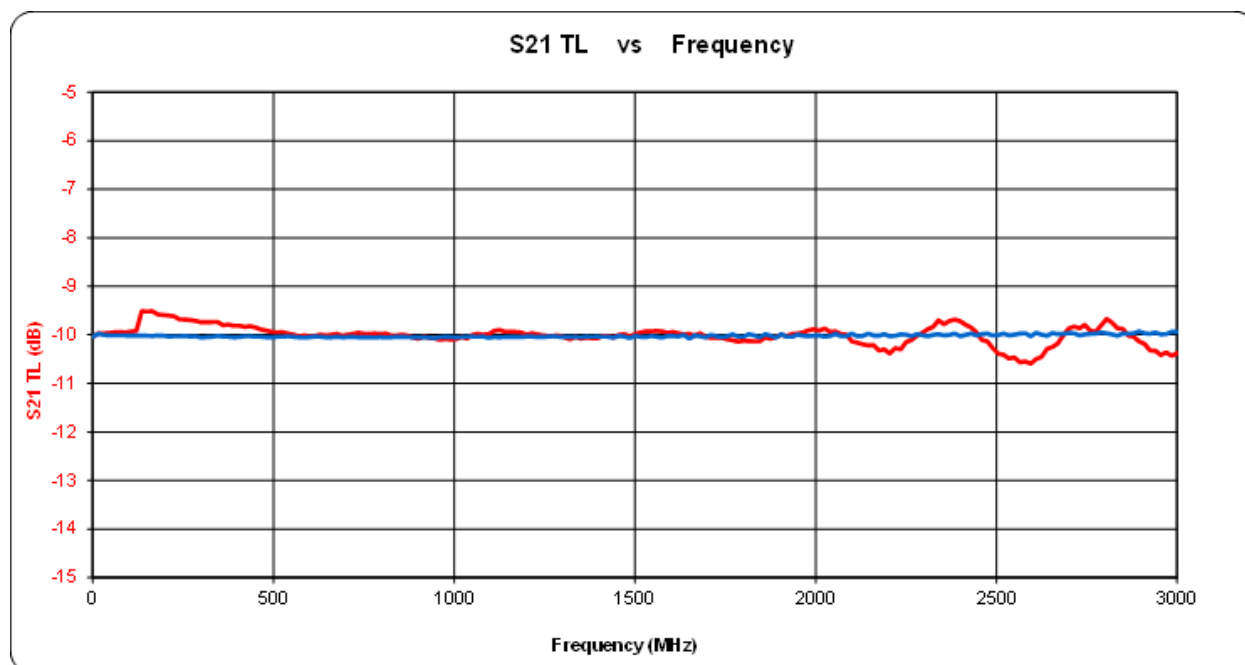
Notă: A. La finalul secțiunii despre atenuatori se arată o metodă simplă pentru a reduce aceste erori, parțial datorate și factorului RL mediu al portului 2 (RX). Pentru aceasta se adaugă un atenuator în timpul calibrării pe portul 2, sau dacă se folosește un cablu până la portul 2, la capătul liber al cablului conectat la portul 2.

B. Se pare ca versiunile de firmware pentru NanoVNA F V2 mai mari de 3.2 corectează cel puțin parțial această problemă.

Atenuator Weinschel 12dB

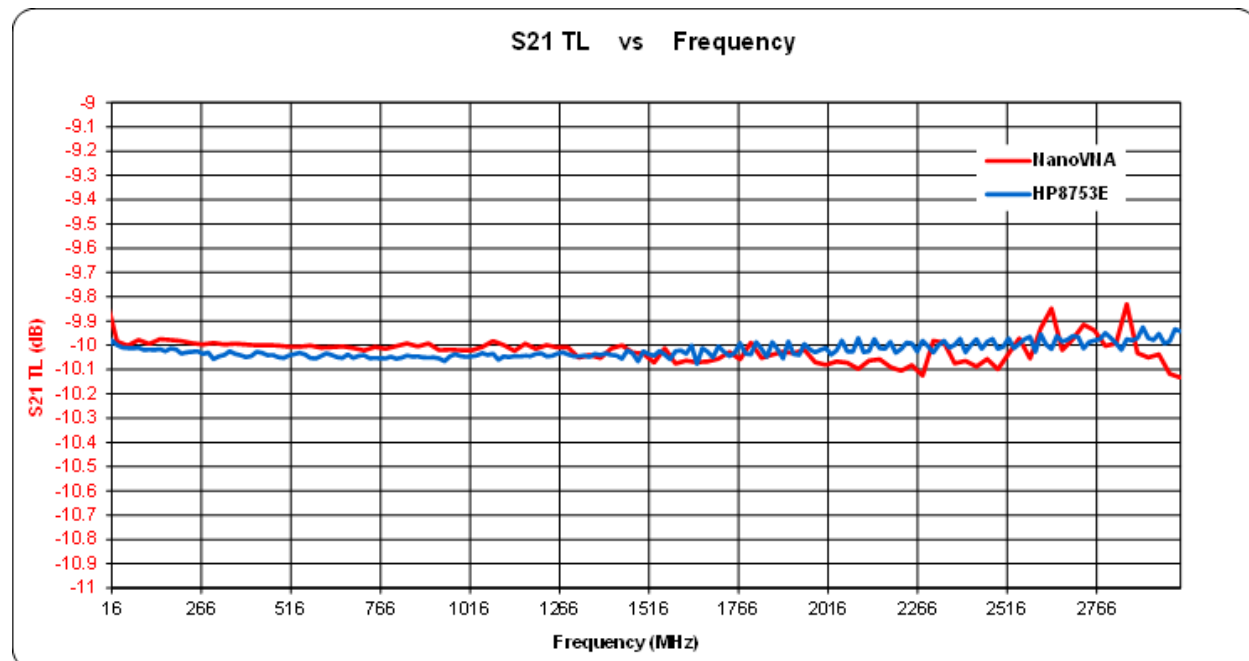


Atenuator Mini-Circuits VAT10 10dB



Red= NanoVNA-F V2

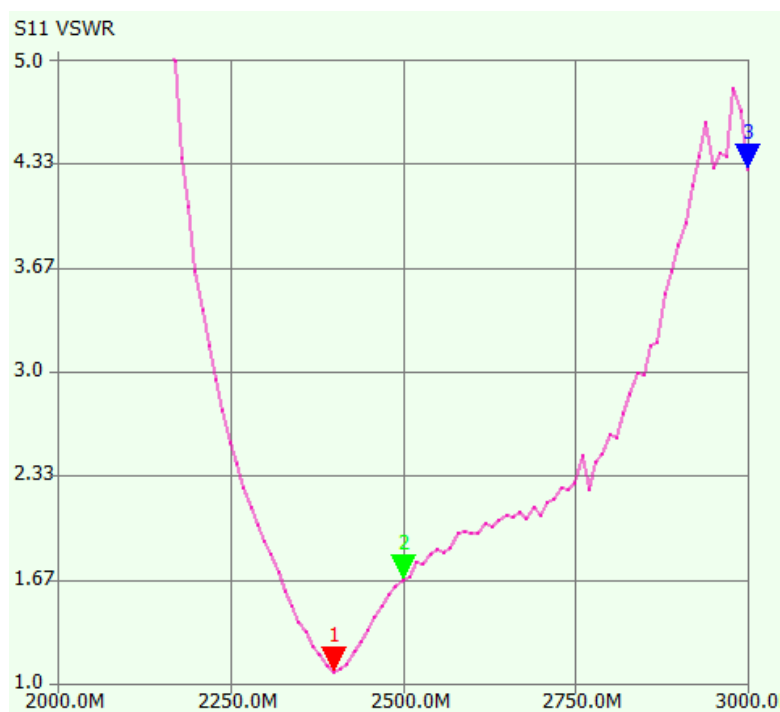
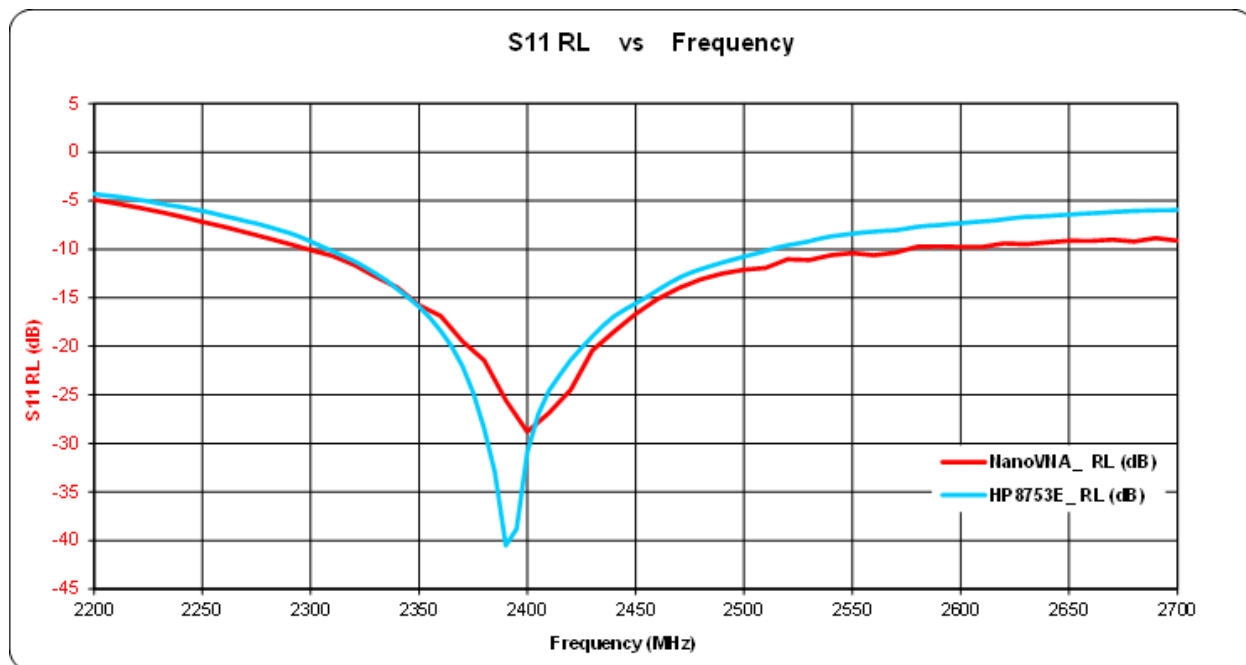
Dark blue= HP8753E



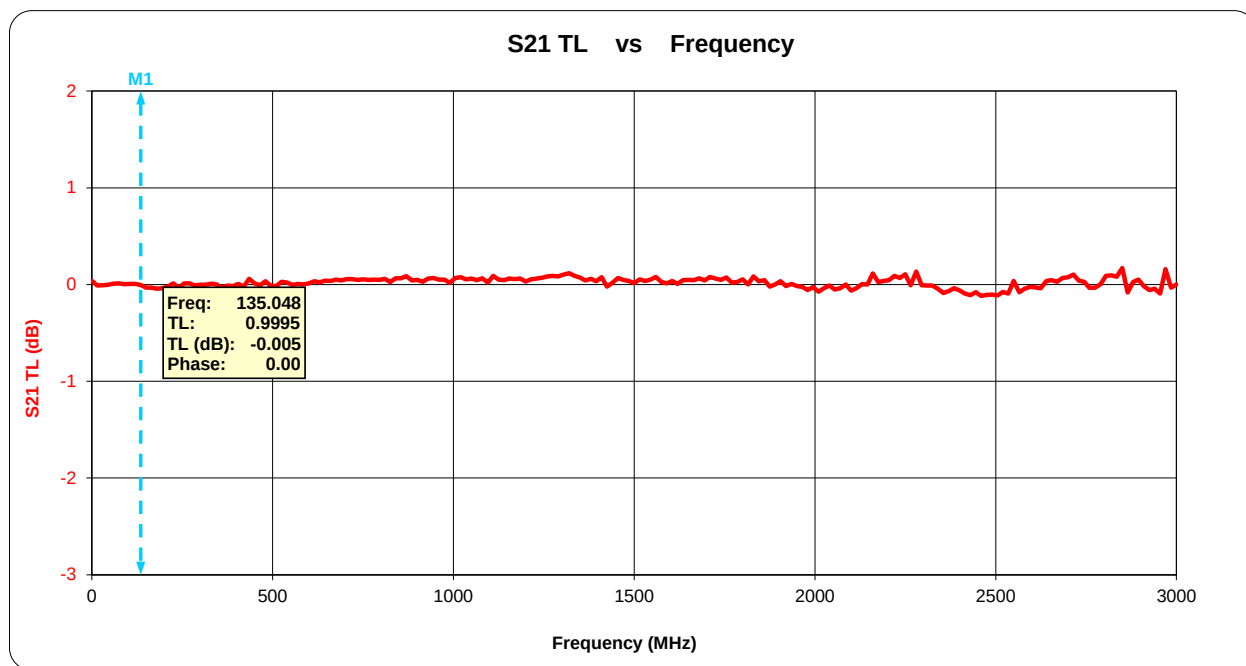
Am adăugat un atenuator de 10dB în timpul calibrării la portul 2 (RX). Urmare a calibrării, efectul acestui atenuator suplimentar dispare și devine parte a calibrării. Îmbunătățirea este substanțială și reduce riplul. Atenuatorul de 10dB suplimentar reduce însă din gama dinamică totală pentru S₂₁. Evident pentru această măsurătoare nu e o problemă, însă pentru un filtru cu dinamică mare poate fi.

Antenna WiFi 2.4GHz

2GHz-3GHz, 201 pt.



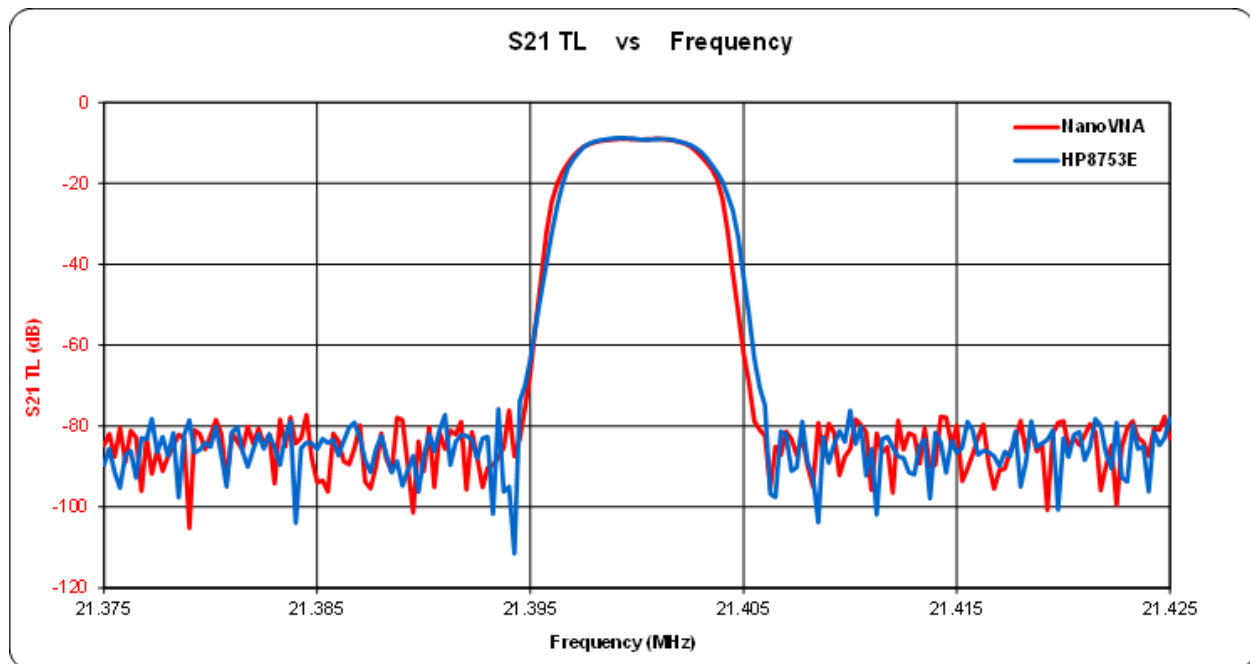
Cablul RG405, după calibrare



Acesta este cablul furnizat ca accesoriu cu NanoVNA-F V2

Eroarea de nivel de la frecvența de 135MHz nu este vizibilă în acest caz, posibil să indice prezența unor distorsiuni neliniare, dacă la acest nivel operarea se face în regim saturat pentru mixer.

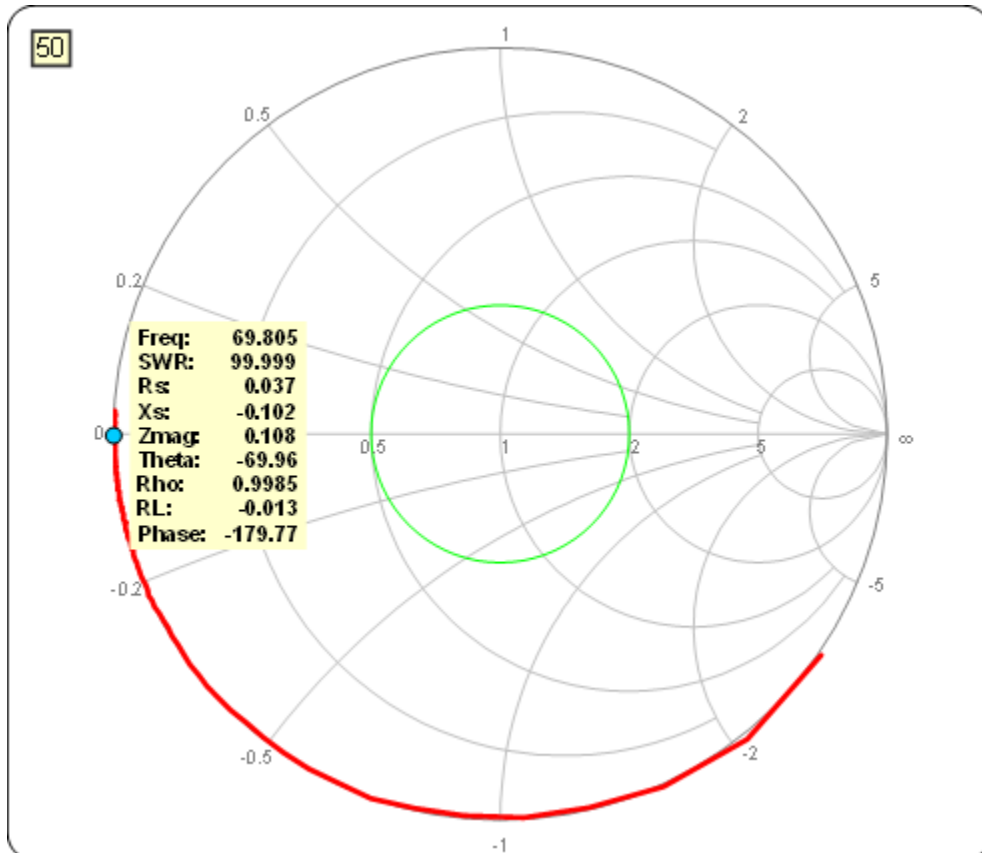
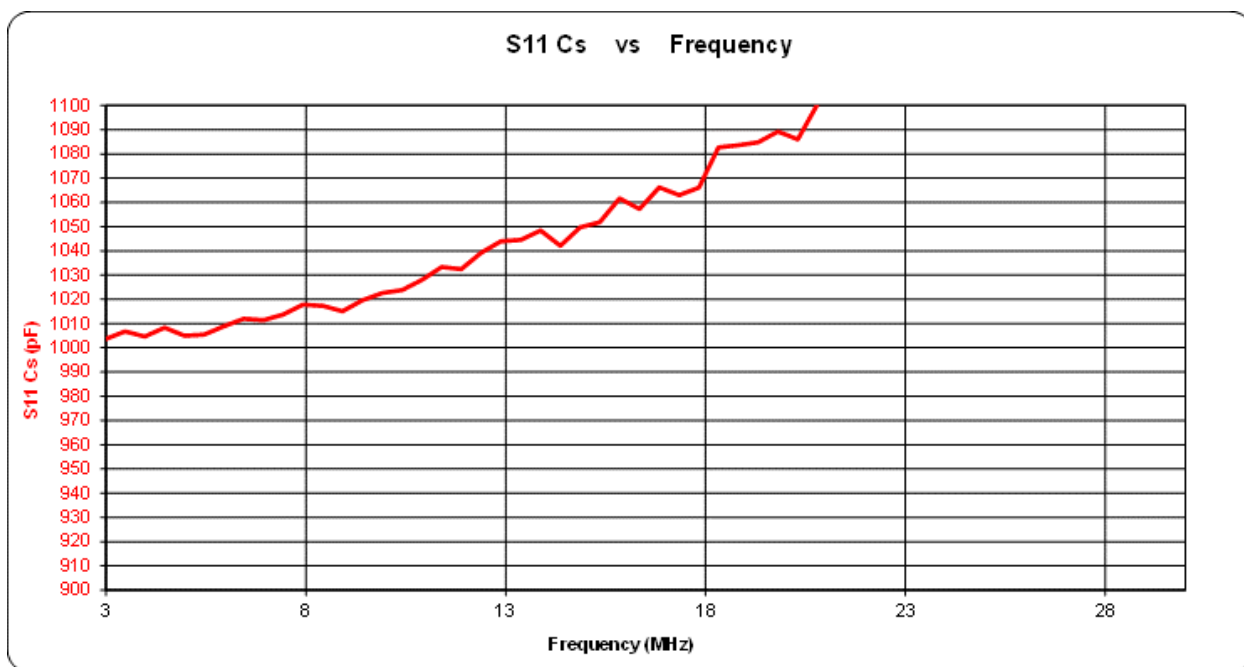
Filtru Cristal 21.4MHz, Span 50kHz, 201pt.



Nu-mi pot explica diferențele ce apar doar la flancul superior.

Condensator 1000pF, 1%, Mică

Condensatorul are terminale de cca. 20mm. În mod clar terminalele lungi duc la o frecvență de autorezonanță redusă.



Detalii Calibrare

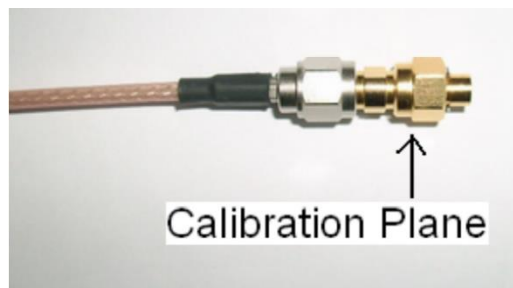
Un VNA profesional are stocată în memoria internă modelul complet al kitului de calibrare folosit. Când se efectuează calibrarea cu acest kit, instrumentul creează un model de eroare al întregului sistem, pe care îl corectează în baza diferențelor dintre valorile modelului și cele măsurate efectiv. Aceasta permite de fapt plasarea planului de referință al măsurătorii fie pe instrument fie chiar la capătul unui cablu ce este folosit în decursul măsurătorii. Modelul de eroare conține funcție de instrument 6, 12 sau mai mulți termeni și cei mai mulți termeni sunt dependenți de frecvență.

Altfel spus, chiar dacă eroarea absolută a standardelor de calibrare folosite nu este foarte bună, prin faptul că acestea sunt caracterizate cu mare precizie de fabricant și erorile acestora sunt cunoscute cu mare precizie, permite în final măsurători cu precizie foarte mare.

Nu este cazul măsurătorilor făcute cu NanoVNA, care în acest moment nu pot stoca intern modelul de eroare complex al standardelor folosite. În plus nanoVNA-ul este unidirecțional, din acest motiv de fapt se pot măsura doar parametrii S_{11} și S_{21} , nu și S_{22} , respectiv S_{12} . Aceasta împiedică folosirea unui model de eroare complet, care să poate elimina prin calibrare erorile de dezadaptare cauzate de impedanța diferită de ideal a porturilor 1 și 2. O măsurare a parametrilor S_{12} și S_{22} se poate face însă, prin rotirea dispozitivului măsurat, în așa încât sensul de parcurs a semnalului în dispozitiv (DUT) să se schimbe. Evident în acest caz erorile nu sunt eliminate complet însă rezultatele sunt acceptabile, mai ales la frecvențe sub 100-200MHz.

Programul pentru PC NanoVNA Saver, are capabilitatea de a lucra cu modele ale standardelor de calibrare și în principiu poate efectua măsurători cu precizie mai mare dacă valorile din modelul de eroare standard sunt cunoscute. Rămâne să testez această capabilitate cu mai multă rigurozitate, pentru că testele mele inițiale au date rezultate neconcludente. Posibil ca întreaga parte de calibrare în nanoVNA Saver v.0.3.8. să nu funcționeze corect. Un update recent la versiunea v.0.4 promite rezolvarea unor erori care existau în modelul de corecție de eroare/calibrare a acestui program însă rămâne să testez aceasta.

Când calibrarea este efectuată la capătul unui cablu și nu pe instrument, cablul devine parte a sistemului de măsură și prin calibrare transformările de impedanță, ca și pierderile, care apar datorită coaxialului sunt eliminate. Altfel spus, planul de calibrare este mutat la capătul cablului coaxial.



Pentru că NanoVNA, așa cum este la ora actuală, nu are posibilitatea de a face această corecție internă, neștiind în prealabil caracteristicile kitului de calibrare (derivate cu un instrument cu precizie sau metode

superioare), calitatea cablului folosit pentru măsură este foarte importantă. De asemenea lungimea acestuia trebuie să fie minimă.

Modelul de eroare cu 12 termeni necesită măsurarea tuturor parametrilor S, inclusiv S12 și S22, ceea ce nu se poate face în mod direct cu nanoVNA-urile actuale.

Nano VNA va asuma în timpul calibrării un model simplificat cu coeficienți care nu depind de frecvență.

VNA-ul produs de Tom Baier, DG8SAQ permite o calibrare mult mai complexă și care permite atingerea unei precizii mai bune, putând folosi intern datele kitului de calibrare. În plus și hardware-ul este mai evoluat și deci limitele hardware sunt diferite față de NanoVNA. Gama dinamică pentru S21 a măsurătorilor efectuate cu acest [VNWA-3SE](#) este mai bună de 90dB, fără să se recurgă la media între mai multe măsurători, care lungesc excesiv timpul de măsurătoare. Aceeași gamă de măsură se poate atinge și cu [Mini-VNA](#).

Concluzii

În toate cazurile când frecvența de măsură a fost sub câteva sute de MHz, rezultatul măsurătorilor cu NanoVNA a fost aproape de rezultatele obținute de un instrument de laborator (HP8753E- cca. 20 ani vechime... însă calibrat metrologic recent). Excepție a fost situația în care impedanțele măsurate au fost foarte mici sau foarte mari, caz în care erorile cresc substanțial pentru NanoVNA.

HP8753E are în mod clar un avantaj în măsurarea impedanțelor foarte mici sau mari, datorită gamei dinamice de măsură substanțial mai mari. Rezoluția convertoarelor A/D folosite, pragul de zgomot, ca și modul considerabil mai evoluat în care este folosită calibrarea determină rezultate mult mai bune pentru HP8753E.

Acuratețea maximă pentru nanoVNA se obține când reactanțele măsurate sunt apropiate de 50 Ohm, unde instrumentul a fost calibrat. În acest domeniu, se pot obține toleranțe de măsură de ordinul a 1%, cu condiția ca frecvența la care se face măsurătoarea să nu fie mai mare de câteva sute de MHz, kitul de calibrare să fie de calitate și coaxialul folosit să fie cât mai scurt.

Măsurare unor impedanțe mai mici de 10Ohm sau peste 1kOhm, cu o acuratețe rezonabilă, necesită alte metode de măsură.

În ceea ce privește gama dinamică necesară pentru măsurătorilor efectuate, iată acest exemplu:

Să presupunem că măsurăm un condensator de 100nF la 1Hz. Se măsoară de fapt reactanța, din care se calculează apoi capacitatea. Reactanța este de 1.6MΩ, în timp ce rezistența de pierdere (ESR) este de 10mΩ.

Gama dinamică necesară în acest caz este de:

Dinamică = $20 \log 1.6e6 / 0.01 = 164 \text{ dB}$.

Pentru acuratețe bună, e necesară o rezervă de încă 10dB (pentru a fi deasupra pragului de zgomot), deci gama totală necesară este de 174dB, ceea ce este dincolo de ceea ce poate fi făcut chiar și cu cele mai bune VNA-uri, folosind metode uzuale.

Tabela de mai jos arată gama dinamică necesară pentru a măsura diferite impedanțe cu acuratețe de ordinul a 1%.

Dacă se sacrifică acuratețea, se poate extinde gama de măsură pentru impedanțe.

Measurement	Min	Max	Dynamic Range
1-port Reflection	1 Ω	2 kΩ	66 dB
Series 2-port	10 Ω	2.5 MΩ	108 dB
Shunt 2-Port	1m Ω	225 Ω	108 dB

Măsurătorile serie și șunt pe două porturi, sunt măsurători indirecte și necesită o serie de calcule intermediare pentru a determina mărimea impedanței.

Pentru a extinde gama de măsură, se folosesc alte metode, cum este cazul instrumentului Agilent E4991A RF Impedance Analyser. Acesta folosește metoda I-V pentru a extinde gama de măsură a impedanțelor.

E remarcabil că putem măsura cu un instrument atât de ieftin atâtia parametrii. Pentru NanoVNA-F V2, specificat pentru o gamă de frecvență de 50kHz la 3GHz, gama de frecvență reală unde rezultatele au o precizie acceptabilă, este probabil 100kHz-300MHz.

Măsurători utile se pot face până la cca. 1GHz, dacă acceptăm erori mai mari.

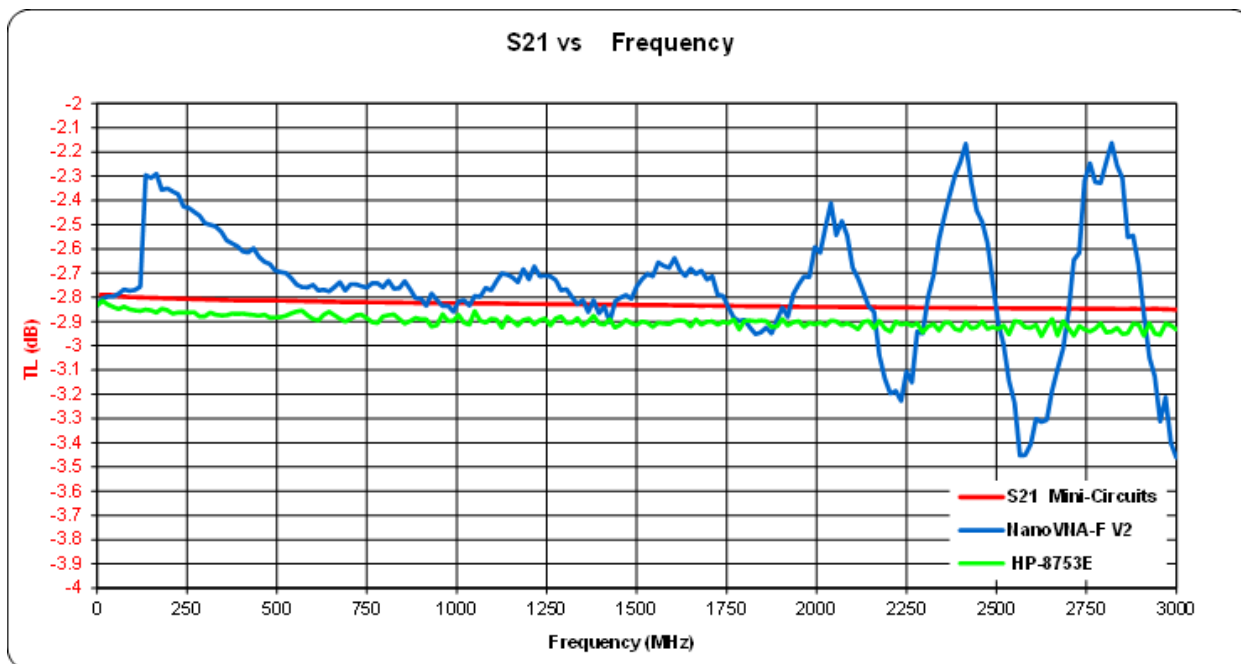
Erorile cresc rapid dincolo de aceasta, la frecvența de 2.4GHz chiar și VSWR-ul măsurat are eroare substanțială. În acest caz un VSWR real de 1.5:1 era arătat ca 3:1.

Pentru măsurători S21, se poate reduce substanțial eroarea prin plasarea unui atenuator înainte de portul P2, și includerea în calibrare a acestuia. Aceasta îmbunătățește parametrul RL al portului 2 însă cu prețul reducerii gamei dinamice a măsurătorii.

Erorile NanoVNA-ului nu pot fi reduse până când modelul de eroare intern nu va fi schimbat substanțial.

Addendum

Același atenuator BW-S3W2+ 3dB, măsurat cu NanoVNA-F V2, măsurat cu HP8753E și datele generice de la MiniCircuits. Firmware-ul folosit pentru aceste grafic a fost V 2.4. Versiunea V 3.2 si mai mare promite să reducă riplul la 140MHz, datorat comutării de la oscilatorul de joasă frecvență, la cel de înaltă frecvență.



Corecții făcute pe data de 10 mai 2022.