

1 実習名

ネットワークアナライザの測定方法 (「高周波回路技術」)

2 実習の目的

各種高周波コンポーネントの特性（周波数ゲイン特性、反射特性等）の測定・評価のために必要なネットワークアナライザの使用方法を習得する。また、本実習を通して、①ネットワークアナライザの特徴及び使用方法、②各種高周波測定器類の操作方法等を習得する。

3 ネットワークアナライザの基本原理

ネットワークアナライザは大きく分けて、スカラとベクトルに分けることができる。スカラ・ネットワークアナライザは信号の振幅特性のみを測定し表示する装置である。これに対して、ベクトルネットワークアナライザは振幅と位相差特性を同時に測定し表示する装置である。

電気信号は、振幅・位相・周波数からなり、この3つを測定すれば信号が決定できる。ベクトル・ネットワークアナライザは、このうち振幅及び位相差を直接測定する機器である。図1は高周波コンポーネントの特性を決める要素を示したものである。

回路網は、各々の周波数における反射波と伝送特性を測定すれば、その特性を知ることができる。図2、3はそれぞれ伝送特性および反射特性の原理を示したものである。



図1 回路の特性

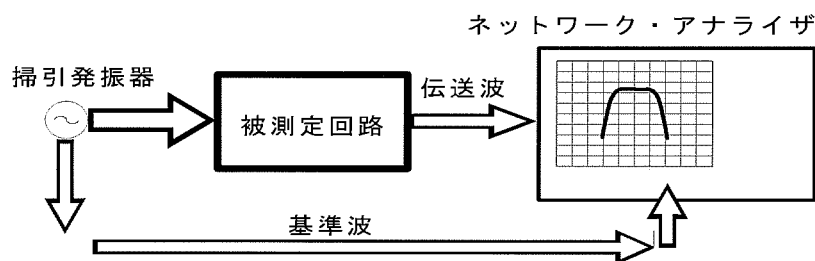


図2 伝送特性測定 (S21・S12)

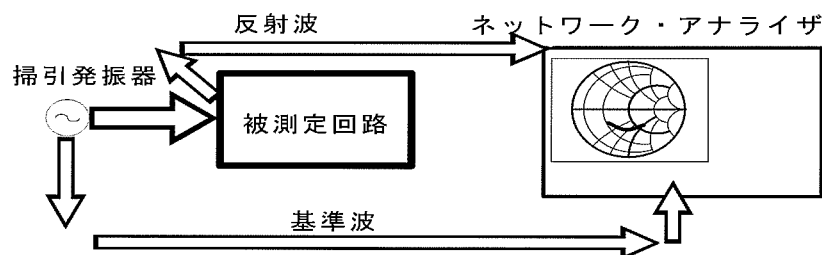


図3 反復特性測定 (S11・S22)

4 測定方法

ネットワークアナライザを使用して高周波コンポーネントを測定・評価するには、標準器を用いた校正をしなければならない。また、測定に当たりケーブル長、コネクタの周波数特性などの注意が必要となってくる。ここでは、ヒューレットパッカード社（現在アジレントテクノロジー社）製ネットワークアナライザ（HP8719C）を使用した代表的な測定方法を示す。

4-1 初期設定

測定に必要な測定項目、周波数帯域、測定点数等を設定する。図4はネットワークアナライザの基本測定項目を示したものである。以下にキー操作とその内容を示す。

内 容	キー操作
伝送特性 S21 の設定	[MEAS][Trans : FWD S21]
管面表示縦軸対数メモリ	[FORMAT][LOG MAG]
スタート周波数	[START]500[M/ μ]
ストップ周波数	[STOP]1.5[G/n]
この時 STOP 周波数は 1.49GHz となる	
測定ポイント数の設定	[MENU][NUMBER of POINTS]401[$\times 1$]
スイープ周波数対数メモリ	[SWEEP TYPE MENU][LOG FREQ]

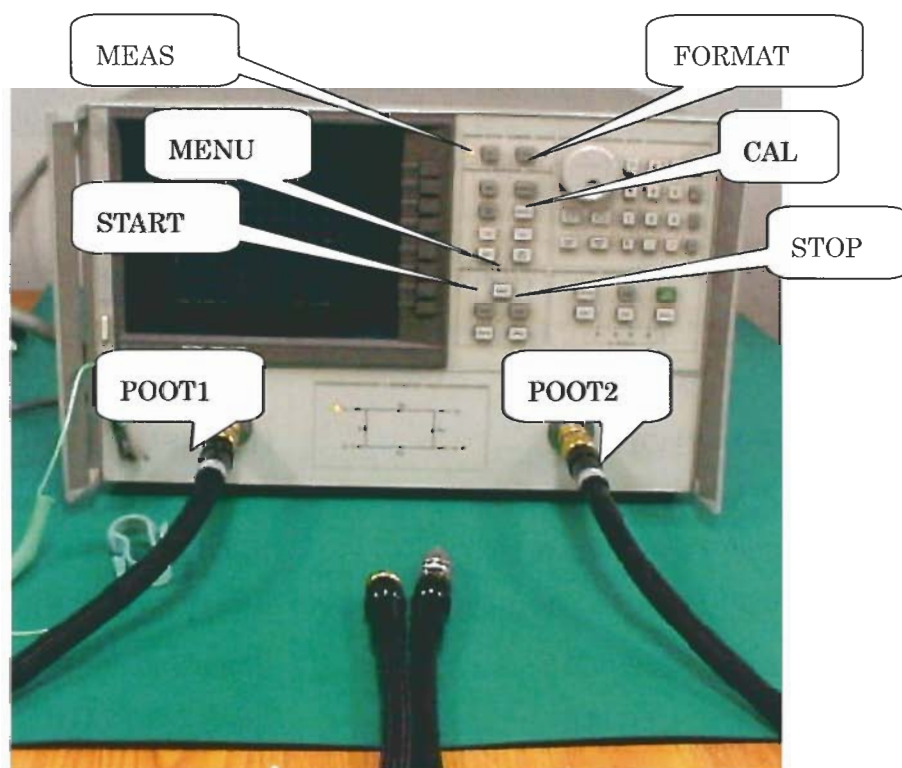


図4 ネットワークアナライザの基本構成

4-2 校正

ネットワークアナライザを使用するに当たり必ず校正する必要がある。以下にその手順を示す。図5、7はポート1およびポート2に標準器を接続した様子である。ここで図6に示す3.5mmコネクタの標準器を接続し対応するキーを押す。

内容	キー操作
校正キットの種類選定	[CAL][CAL KIT][3.5mm][RETURN]
ポート1、2すべての校正	[CALIBRATE MENU][FULL-2PORT]
ポート1の反射	[REFRECTION]
◎テストポート1に標準器を付け対応するソフトキーを押す。	

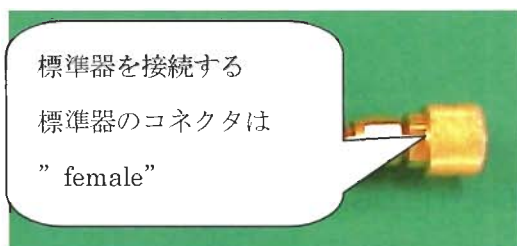


図5 ポート1側：OPEN・SHORT・LOAD



図6 OPEN・LOAD・SHORT 標準器

◎テストポート2に対しても同様に行う。

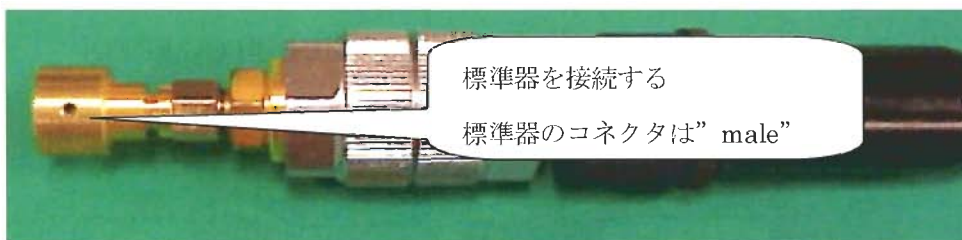


図7 ポート2側：OPEN・SHORT・LOAD

◎テストポートにスルーの標準器を接続し校正を行う。図8はポート1、2間にスルー標準器を接続したものである。

内容	キー操作
伝送特性の校正	[TRANSMISSION]
双方向の校正	[DO BOTH FWD + REV]
アイソレーション校正	[ISOLATION]
アイソレーション校正は実施しない	[OMIT ISOLATION]
2ポート校正の終了	[Done 2-PORT CAL]
校正データの保存	[Re-SAVE REG1]



図8 ポート 1、2 間の伝送校正

4-3 デバイスの測定

①伝送特性の測定

図8に示すように被測定コンポーネントをポート 1、2 間に接続する。このとき残ったポートは、そのポートの特性インピーダンスと同じ抵抗で成端する。また、コンポーネントの入出力コネクタ形状により変換コネクタを使用して接続する。この時変換コネクタにより電気長も変化してしまうことに注意しなければならない。

内容	キー操作
スケールを自動設定する	[SCALE REF][AUTO SCALE]

注：適切なレンジとするには手動設定が必要である。

マーカの設定	[MKR]
例)	
1	1GHz
2	100MHz
3	-3.0dB の点
4	-10.0dB の点
5	-20.0dB の点

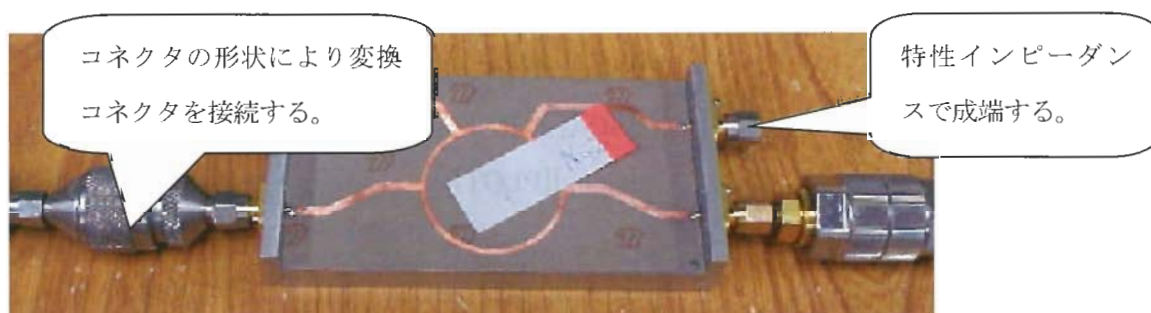


図9 コンポーネント接続

結果の印刷	[Copy][PLOT]
-------	--------------

注：プロット数が多いため出力に時間がかかる

②入力インピーダンスの測定（接続は変更しなくて良い）

ポート 1 側の反射特性測定	[MEAS][Ref:FWD S11]
表示をスミスチャートとする	[FORMAT][SMITH CHART]
結果の印刷	[Copy][PLOT]

③出力インピーダンスの測定

ポート 2 側の反射特性測定 [MEAS][Ref:REV S22]
表示をスミスチャートとする [FORMAT][SMITH CHART]
結果の印刷 [Copy][PLOT]

その他の測定（必要に応じて以下の測定を行なう）

④位相特性の測定

[RECALL][RECALL REG1]
[CH2]
[MEAS][Trans:FWD S21]
[FORMAT][PHASE]
[SAVE][Re-SAVE REG2]
[MEAS]
[SCALE REF][AUTO SCALE]
[MKR]

伝送特性と同様の周波数とする。

[Copy][PLOT]

⑤電気長の測定

[MKR][MARKER 1][all off]
[MKR FCTN][MARKER→MENU]
[MARKER→DELAY]
[SCALE REF][REFERENCE VALUE]0[× 1]
[ELECTRICAL DELAY]
[SCALE REF][AUTO SCALE]
[Copy][PLOT]

⑥群遅延測定

[SCALE REF][ELECTRICAL DELAY]0[× 1]
[FORMAT][DELAY]
[SCALE REF][AUTO SCALE]
[AVG][SMOOTHING ON off]
[SMOOTHING APERTURE]5[× 1]
[SCALE REF][AUTO SCALE]
(この時スケールは 500ps/div 程度)
[Copy][PLOT]

1 実習名

高周波コンポーネントの特性評価 (「高周波回路技術」)

2 実習の目的

ネットワークアナライザを用いて、各種高周波コンポーネントの特性（周波数ゲイン特性、反射特性等）の測定・評価を行う。また、本実習を通して①各種高周波コンポーネントの特徴及び使用方法、②各種高周波測定器類の操作方法等を習得する。

3 主な使用機器類

表 1 使用機器類

品名	型式	数量	備考
ネットワークアナライザ	HP8719C	1	ヒューレットパッカード製
N/SMA 変換コネクタ		2	ヒロセ製
SMA 中継コネクタ	Male-Female タイプ	1	ヒロセ製
SMA 中継コネクタ	Male-Female タイプ	1	ヒロセ製
キャリブレーションセット	HP85052B	1	ヒューレットパッカード製
高周波測定用ケーブル	両端 SMA 型	4	ケーブル長：30cm 程度
高周波減衰器	N 型 20dB 型	1	アンリツ製
LPF モジュール	OP-50-LP-04D	1	睦コーポレーション製
HPT モジュール	OP-50-HP-04D	1	睦コーポレーション製
アッテネータモジュール	OP-50-AT-05D	1	睦コーポレーション製



BNC-N型



BNC-T分岐



BNC-SMA



基板用SMAコネクタ



SMA-N型

図 1 各種コネクタ

4 実習手順及び測定結果

4-1 終端器の特性測定

- (1) 校正を行なう (S11 のみの校正で良い)
- (2) 図 2 に示すようにネットワークアナライザのポート 1 に被測定終端器を接続する。
- (3) スミスチャート表示として S11 を測定する。



図 2 終端器の特性測定

4-2 電力分割器の特性測定

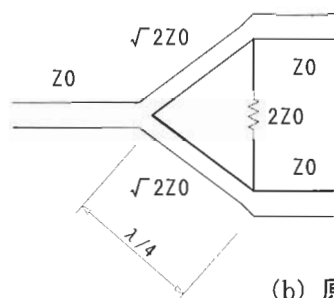
図 3 に市販の電力分割器を示す。図 4 (a) はマイクロストリップで構成した電力分割器であり、2 段構成となっており、1 段構成のものより広帯域の特性が得られる。入力電力はそれぞれのポートに -6dB ($1/2$) 分配され出力される。この型はウィルキンソン型と言われ、分配比を計算により変えることもできる。図 4 (b) はウィルキンソン型電力分割器の原理図を示したものである。



図 3 電力分割器



(a) 電力分割器の例



(b) 原理図

図 4 ウィルキンソン型電力分割器

右の図 5 は電力分割器を測定するための接続を示したものである。コネクタの形状の違いから SMA-N 型コネクタ変換器を使用して接続している。また、電力分割器の空のコネクタは特性インピーダンス (50Ω) で成端することを忘れてはならない。

- (1) 2 ポート校正を行なう。
- (2) S11 ポートを電力分割器の入力ポートに接続する。
S22 ポートを出力ポートに接続する。残りの出力



図 5 電力分割器の測定

ポートには終端器を接続する。

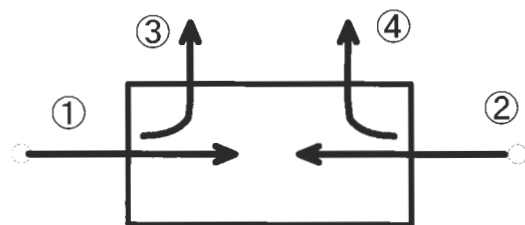
- (3) 伝送特性 S_{21} 、 S_{12} を測定する。
- (4) 各ポートの反射特性を測定する。
- (5) ポートを変更し同様の測定をする。
- (6) 電力分割器の出力ポート同士の伝送特性も測定する。

4-3 方向性結合器の特性測定

方向性結合器は信号の一部を取り出すために用いる。方向性結合器の特性は以下に示す結合係数と方向性が大切なパラメータとなる。なお、式中の添え字はポート番号を示す。

$$\text{結合係数} \quad C_{31} = -20\log_{10}|S_{31}| \quad [\text{dB}] \quad C_{42} = -20\log_{10}|S_{42}| \quad [\text{dB}]$$

$$\text{方向性} \quad D_{32} = -20\log_{10}\frac{|S_{32}|}{|S_{31}|} \quad [\text{dB}] \quad D_{41} = -20\log_{10}\frac{|S_{41}|}{|S_{42}|} \quad [\text{dB}]$$



(a) 方向性結合器の原理図



(b) 実際の方向性結合器

図 6 方向性結合器

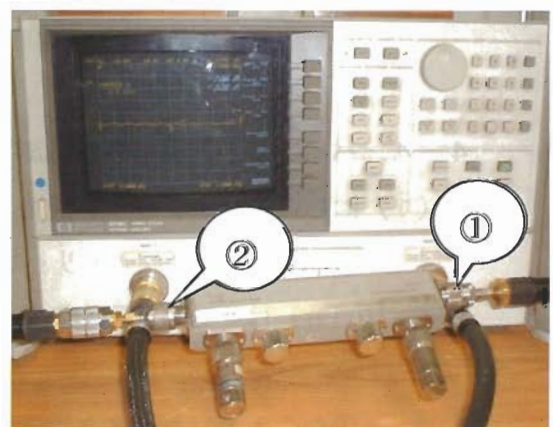


図 7 伝送特性測定

図 6 (a) は方向性結合器の動作原理を示したものである。図において各ポートの入出力関係を以下に示す。

- ・ ポート①⇒ポート②：通常の伝送特性
- ・ ポート①⇒ポート③：結合係数で表される電力を分割して出力する
- ・ ポート②⇒ポート④：逆方向の結合係数で表される電力を分割して出力する
- ・ ポート②⇒ポート①：逆方向の伝送特性
- ・ ポート②⇒ポート③：方向性で表される電力を出力する（通過しない方が良い）
- ・ ポート①⇒ポート④：方向性で表される電力を出力する（通過しない方が良い）

また、同図 6 (b) は実際の方向性結合器の例である。図 7 は方向性結合器の伝送特性 (S_{21}) を測定する構成を示したものである。この時も空ポートには終端器を接続することを忘れてはならない。

- (1) 2 ポート校正を行なう。
- (2) 図 6 (a) の①、②間の S_{21} 、 S_{12} 伝送特性を測定する。
- (3) 各ポートの S_{11} 、 S_{22} 特性を測定する。
- (4) 図 8 に示すように①、③間の伝送特性を測定し結合係数を得る。
- (5) 図 9 に示すように①、④間の伝送特性を測定し方向性を得る。
- (6) 以下同様に各ポートの特性を測定する。

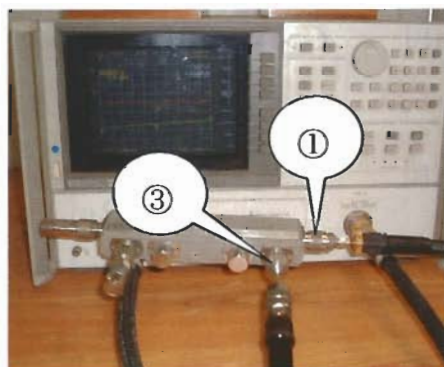


図 8 結合度の測定

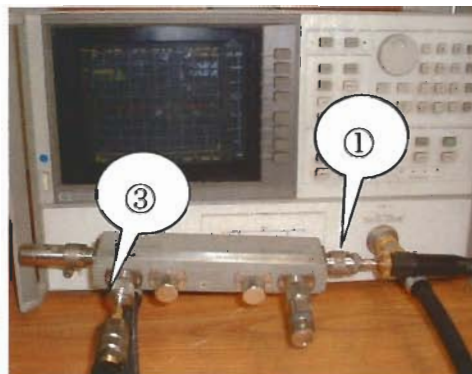


図 9 方向性の測定

4-4. ハイブリット回路の特性測定

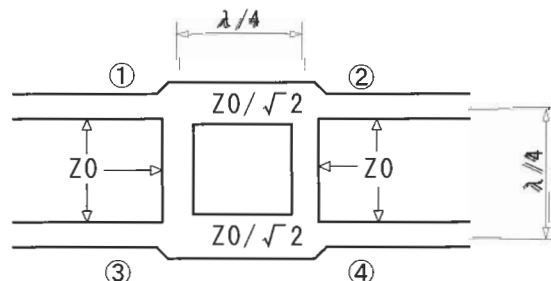
(1) はしご形ハイブリット回路

図 10 はマイクロストリップラインを利用したはしご形ハイブリット回路である。同図 10 (b) はその原理図を示したものである。この動作は以下に示すとおりである。

①から入力したマイクロ波は分岐④には出力されるが③には出力されない。②には不平衡分として残りの電力が現れる。これは、④のものに対して位相が 90 度ずれている。逆に③から入力すると①には現れずに出力される。測定方法は方向性結合器と同様である。



(a) はしご型ハイブリッドの例



(b) 原理図

図 10 はしご形ハイブリット

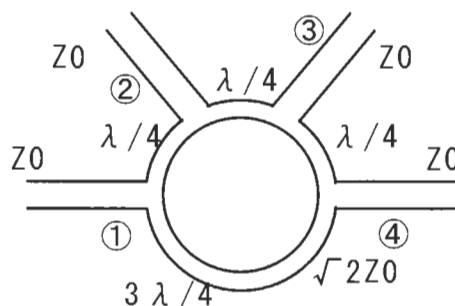
(2) ラットレース

図 11 はラットレースと呼ばれる回路で、はしご形ハイブリット回路同様、信号を分岐するための回路である。

ポート①から入力した信号はポート②とポート④に半分ずつの電力で信号が現れる。ポート③には出力が現れない。逆にポート③から信号を入力するとポート②とポート④には信号が現れるが、ポート①には現れない。測定方法は方向性結合器と同様である。



(a) ラットレースの例



(b) 原理図

図 11 ラットレース

4-5 測定課題

図に示す回路の特性を測定する。

(1) ローパスフィルタの特性測定

図 12 に示すローパスフィルタを測定する。

(睦コーポレーション製)

(2) ハイパスフィルタの特性測定

図 13 に示すハイパスフィルタを測定する。

(睦コーポレーション製)

(3) バンドパスフィルタの特性測定

図 12 と図 13 を接続し総合特性を測定する。

参考：図 14、15 に各フィルタの特性例を示す。



図 12 ローパスフィルタ

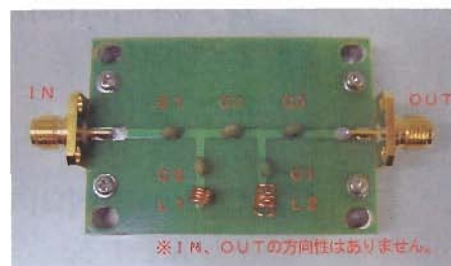


図 13 ハイパスフィルタ

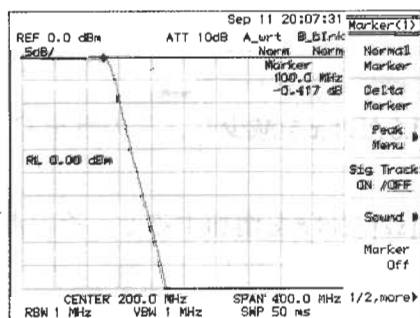


図 14 ローパスフィルタの特性

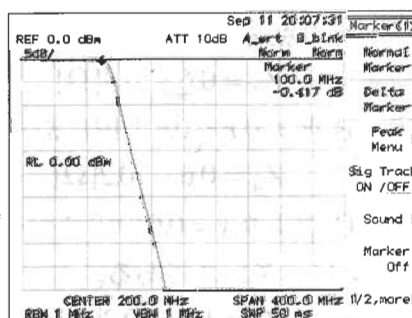


図 15 ハイパスフィルタの特性

参考：以下にスミスチャートの使用方法習得のため、例題を載せる。

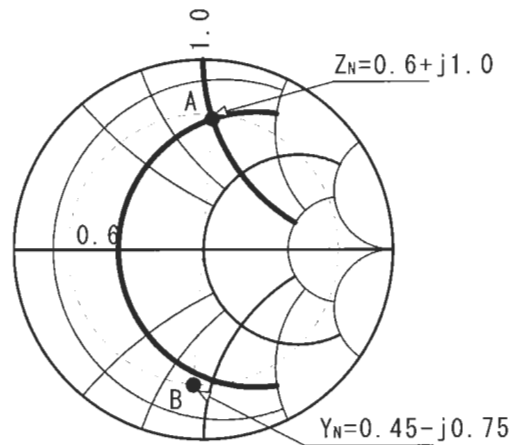
例題 1.

特性インピーダンス 50Ω 系におけるインピーダンス $Z = 30 + j50[\Omega]$ をスミスチャートに表示する。

解答：正規化インピーダンス

$$Z_N = 0.6 + j1 \text{ をプロットする。}$$

A 点



例題 2.

例題 1 のアドミッタンスを求める。

解答： $Z_N = 0.6 + j1$ を円の中心を点対称

とする点をプロットする。

$$\text{B 点 } Y_N = 0.45 - j0.75$$

この値を特性インピーダンス 50Ω で割る

求めるアドミッタンスは $Y_N = 0.09 - j0.015$ となる。

例題 3.

$Z_1 = 30 + j40[\Omega]$, $Z_2 = j30[\Omega]$, $Z_3 = -j80[\Omega]$, $Z_4 = 60[\Omega]$ の 4 個のインピーダンス和を求めよ。

解答：

- ① 各インピーダンスの正規化インピーダンスを求める。

$$Z_1' = 0.6 + j0.8[\Omega]$$

$$Z_2' = j0.6[\Omega]$$

$$Z_3' = -j1.6[\Omega]$$

$$Z_4' = 1.2[\Omega]$$

- ② $Z_1' = 0.6 + j0.8[\Omega]$ をプロットし A とする。

- ③ A 点より $r = 0.6$ の円に沿って $Z_2' = j0.6$ だけ x を増加し、その点を B とする。

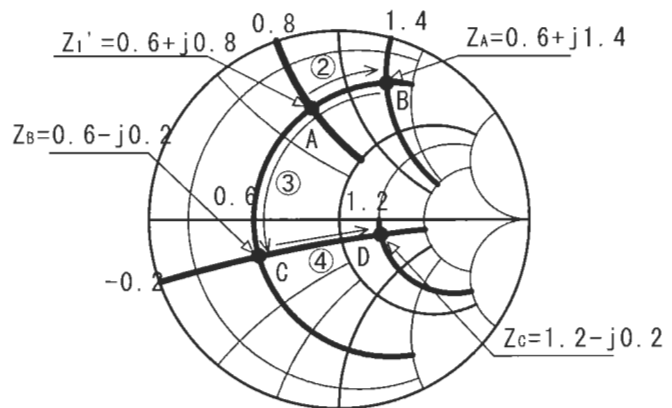
$$Z_A = 0.6 + j1.4[\Omega]$$

- ④ B 点より $r = 0.6$ の円に沿って $Z_3' = -j1.6$ だけ x を減少し、その点を C とする。

$$Z_B = 0.6 - j0.2[\Omega]$$

- ⑤ C 点より $x = 0.6$ の円に沿って $Z_4' = 1.2[\Omega]$ だけ r を増加すると、その点が求めるインピーダンスである。

$$Z_C = 1.8 - j0.2[\Omega]$$



例題 4.

特性インピーダンス $50[\Omega]$ の線路にインピーダンス $Z_L = 20 + j80$ の負荷を接続したとき、負荷から $\lambda_g/4$ の点から負荷方向を見たときそのインピーダンスを求める。

解答：

- ① 負荷の正規化インピーダンス $Z_{LN} = 0.4 + j1.6$ をプロットする。この点を A とする。
- ② 原点 O を中心に半径 OA の円を描く。
- ③ 負荷から電源側に距離 l 移動しても反射係数の大きさは変化せず位相角が $2\beta l$ 変化するのみである。したがって、負荷から距離 $\lambda_g/4$ の点におけるインピーダンスは

$$2\beta l = 2\beta \times \frac{\lambda_g}{4} = 2 \times \frac{2\pi}{\lambda_g} \times \frac{\lambda_g}{4} = \pi$$

で与えられる角度を A 点から円 OA に沿って時計方向に回転した点となる。

また、スミスチャートの外周には l/λ_g で目盛った波数と呼ばれる円がある。

反射係数は $1/2$ 波長ごとに繰り返すため 1 周を 0.5 (2π) としている。この波数からもインピーダンスが求められる。波数は次式で求められる。

$$\frac{l}{\lambda_g} = \frac{\lambda_g}{4} \div \lambda_g = 0.25$$

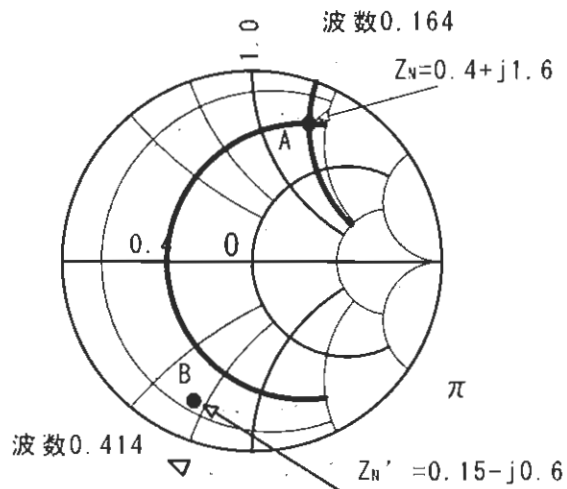
したがって、A 点から円 OA に沿って時計方向に 0.25 回転した点となる。

正規化インピーダンスは

$$Z_N' = 0.15 - j0.6$$

求めるインピーダンスは

$$\begin{aligned} Z_N'' &= 50 \times (0.15 - j0.6) \\ &= 75 - j30[\Omega] \end{aligned}$$



例題 5.

特性インピーダンス $50[\Omega]$ の線路にインピーダンス $Z_L = 40 + j20$ の負荷を接続したとき、負荷から $\lambda_g/3$ の点から負荷方向を見たときそのインピーダンスを求める。

解答：

- ① 負荷の正規化インピーダンス $Z_{LN} = 0.8 + j0.4$ をプロットする。この点を A とする。
- ② 原点 O を中心に半径 OA の円を描く。
- ③ 負荷から距離 $\lambda_g/3$ の点におけるインピーダンスは

$$2\beta l = 2\beta \times \frac{\lambda_g}{3} = 2 \times \frac{2\pi}{\lambda_g} \times \frac{\lambda_g}{3} = \frac{4}{3}\pi$$

で与えられる角度を A 点から円 OA に沿って時計方向に回転した点となる。

また、波数は、

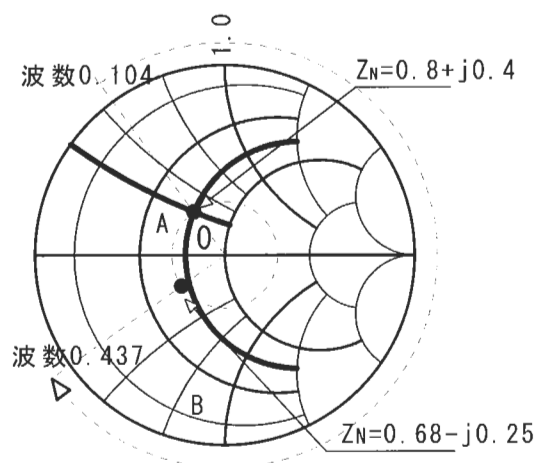
$$\frac{l}{\lambda_g} = \frac{\lambda_g}{3} / \lambda_g = 0.33$$

であり、正規化インピーダンスは

$$Z_N' = 0.66 - j0.25$$

求めるインピーダンスは

$$\begin{aligned} Z_N' &= 50 \times (0.66 - j0.25) \\ &= 33 - j12.5[\Omega] \end{aligned}$$



1 実習名

マイクロストリップラインを利用した高周波デバイスの基板作成 (「高周波回路技術」)

2 実習の目的

マイクロストリップラインを用いた各種高周波コンポーネントの特性を測定するためにその製作方法を習得する。

3 基板作成

(1) 基板を洗浄・乾燥する。 (使用基板：テフロン・ガラスエポキシ基板)

誘電体の厚さ	: 0.8mm	比誘電率	: 2.6
導体の厚さ	: 0.018mm	大きさ	: 100mm×55mm)

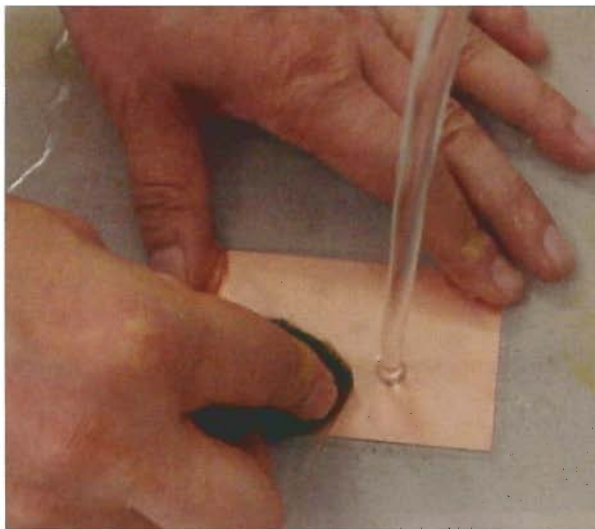


図1 水道水で洗浄



図2 ドライヤーで乾燥

(2) 基板の片隅に $\phi 1\text{mm}$ 程度の穴を開ける
(基板を支持するため)。



図3 穴開け($\phi 1\text{mm}$ のドリル)

図1、2、3は基板表面の洗浄とエッチングの準備作業である。

(3) 感光液を塗布する。(使用感光液：フジ・ポジティブ・フォトレジスト)

注意：薄く均一になるようにすること。

塗りむらがないように表・裏ともにレジストを塗ること。



図4 感光液塗布

(4) 塗布した感光液を乾燥させる。

注意：出来るだけ自然乾燥とするが、ドライヤーで乾燥しても良い。

基板を吊り下げ乾燥させる。

縁の余分なレジストを布等で拭き取る。

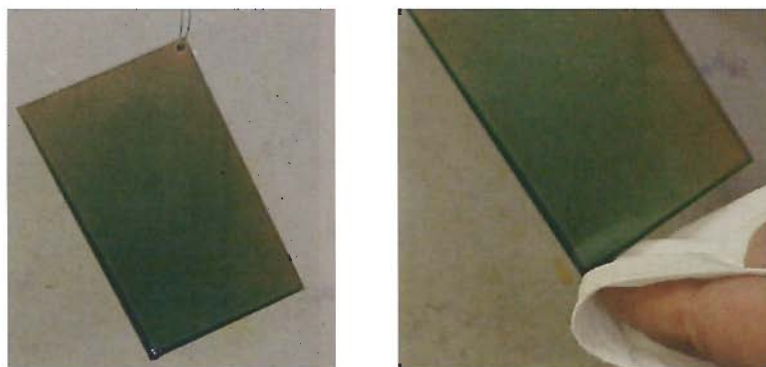


図5 感光液の乾燥

図4、5は感光液の塗布とその注意事項を示したものである。

(5) 基板にフィルムを乗せ露光する。

注意：露光時間はおおむね90秒とするが、試し焼きをすることが望ましい。

フィルムをずれのないように重ね露光する。

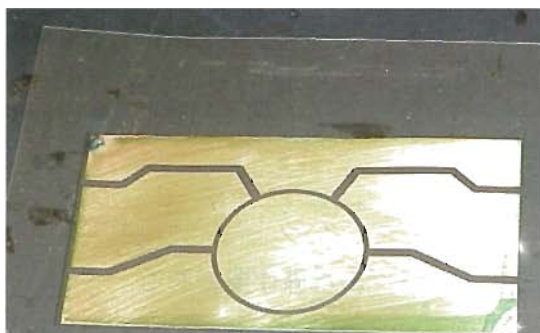
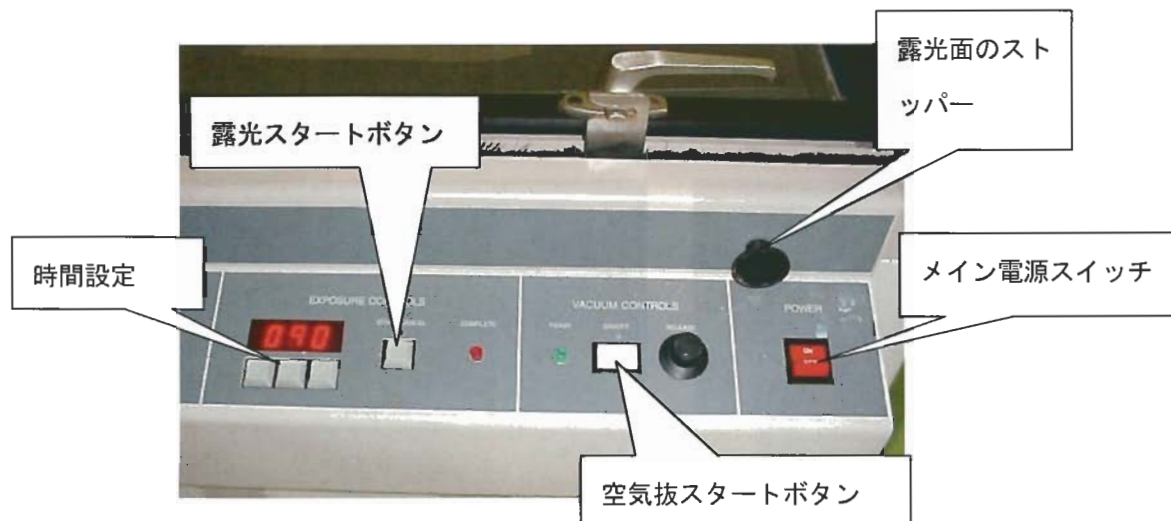


図6 露光



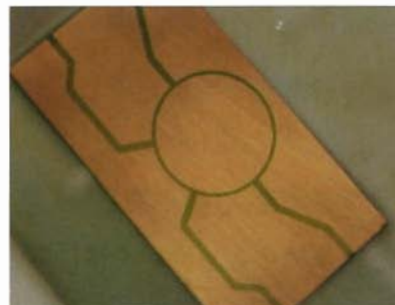
(6) 現像する。

注意：パターンがくっきりと現れ銅箔がすべて見えるのが望ましい。

塗りむら等により感光液が完全に落ちないときは後で修正を加える。



(a) 現像直後



(b) 現像終了前

図7 現像

(7) 流水で洗浄する。

注意：洗浄するときパターンに傷を付けないこと。



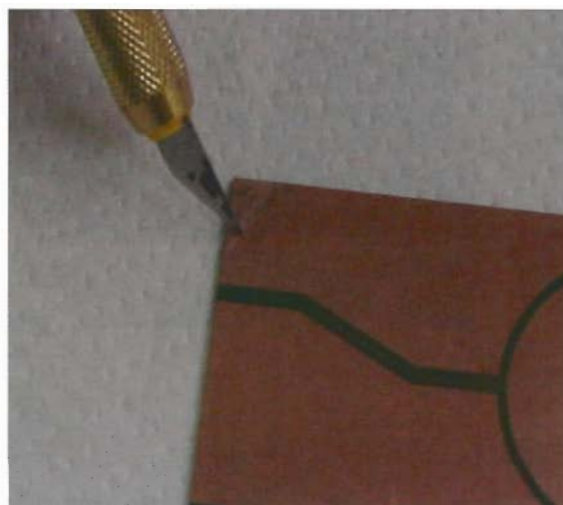
図8 洗浄（水道水で現像液を洗い流す）

(8) 基板を熱風で乾燥し、修正を加える。

注意：追加修正を加えるときは油性のマジックインクを使用する。



(a) 基板乾燥（熱風で）



(b) 基板の修正

図9 基板乾燥・修正

図6から図9は露光と現像を示したものであり、この段階で基板の修正を行う。

(9) エッチングする。(塩化第2鉄)

注意：基板をエッチング槽に落とさないこと。

5分程度からエッチング進行度を確認する。

エッチング途中でゴミなどを取り修正を加えることもできる。



(a) エッチング槽に入れる直前



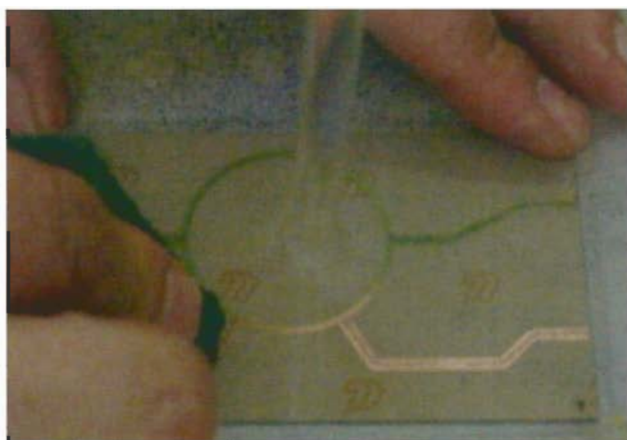
(b) エッチング初期段階



(c) エッチング終了直前

図10 エッチング

(10) 水で洗浄し、レジスト液を取り除く。



(a) 基板の洗浄（レジストを取り除く）



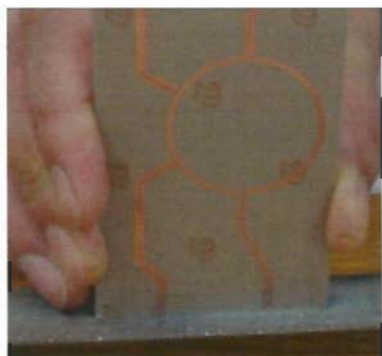
(b) 裏面も取り除く

図11 レジスト除去

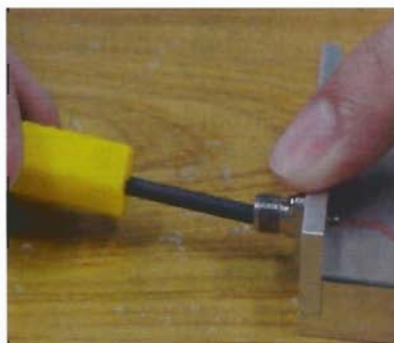
(11) 基板を乾燥しシャーシに取り付け、コネクタを取り付ける。

注意：コネクタを取り付けるとき、ハンダの量は出来るだけ少なくする。

パターン面をグラウンドに落とすときはシャーシに取り付ける前に行なう。



(a) 基板の大きさ調整



(b) コネクタのビス止め



(c) コネクタのハンダ付け

図12 取り付け

(12) 必要な部品を実装する。

(13) 接続状況を確認し、測定作業に入る。

図10から図12はエッチング作業から基板取り付けまでを示したものである。

1 実習名

高周波広帯域増幅器の特性評価 (「高周波回路技術」)

2 実習の目的

ネットワークアナライザ、スペクトラムアナライザ及び標準信号発生器等を用いて、高周波広帯域増幅器の各種特性（周波数ゲイン特性、二次歪・三次歪特性、反射特性等）の測定・評価を行う。また、本実習を通して、①増幅器の特徴及び使用方法、②各種高周波測定器類の操作方法等を取得する。

3 主な使用機器類

表 1 使用機器類

品 名	型 式	数 量	備 考
ネットワークアナライザ	R3765	1	アドバンテスト製
スペクトラムアナライザ	R3131	1	アドバンテスト製
高周波標準信号発生器	MG3641A	2	アンリツ製
N/SMA 変換コネクタ		2	ヒロセ製
SMA 中継コネクタ	Male-Female タイプ	1	ヒロセ製
SMA 中継コネクタ	Female-Female タイプ	1	ヒロセ製
キャリブレーションセット	Model 9617F3	1	アドバンテスト製
高周波測定用ケーブル	両端 SMA 型	4	ケーブル長：30cm 程度
高周波減衰器	N 型 20dB 型	1	アンリツ製
高周波増幅モジュール (1)	OP50-A-10	1	睦コーポレーション製
高周波増幅モジュール (2)	OP50-A-11	1	睦コーポレーション製
安定化電源	PR36-1.2A	1	ケンウッド製
LPF モジュール	OP50-LP-04	1	睦コーポレーション製

4 実習手順及び測定結果

4-1 周波数ゲイン特性及び反射特性の測定

- (1) ネットワークアナライザの入力端子側に N/SMA 変換コネクタ及び 20dB 減衰器を接続する。次に出力端子側に N/SMA 変換コネクタを接続する。(図 1 参照)
- (2) 入力側 SMA 端子と出力側 SMA 端子を測定ケーブル（中継コネクタ含む）を介して接続する。(図 1 参照)
- (3) ネットワークアナライザを以下の通り設定する。
 - ・ START : 10 MHz ・ STOP : 1000 MHz ・ REF VALUE : 0 dBm
 - ・ dB/div : 5 dB ・ POWER LEVEL : -10 dBm ・ REF POS : 0 %

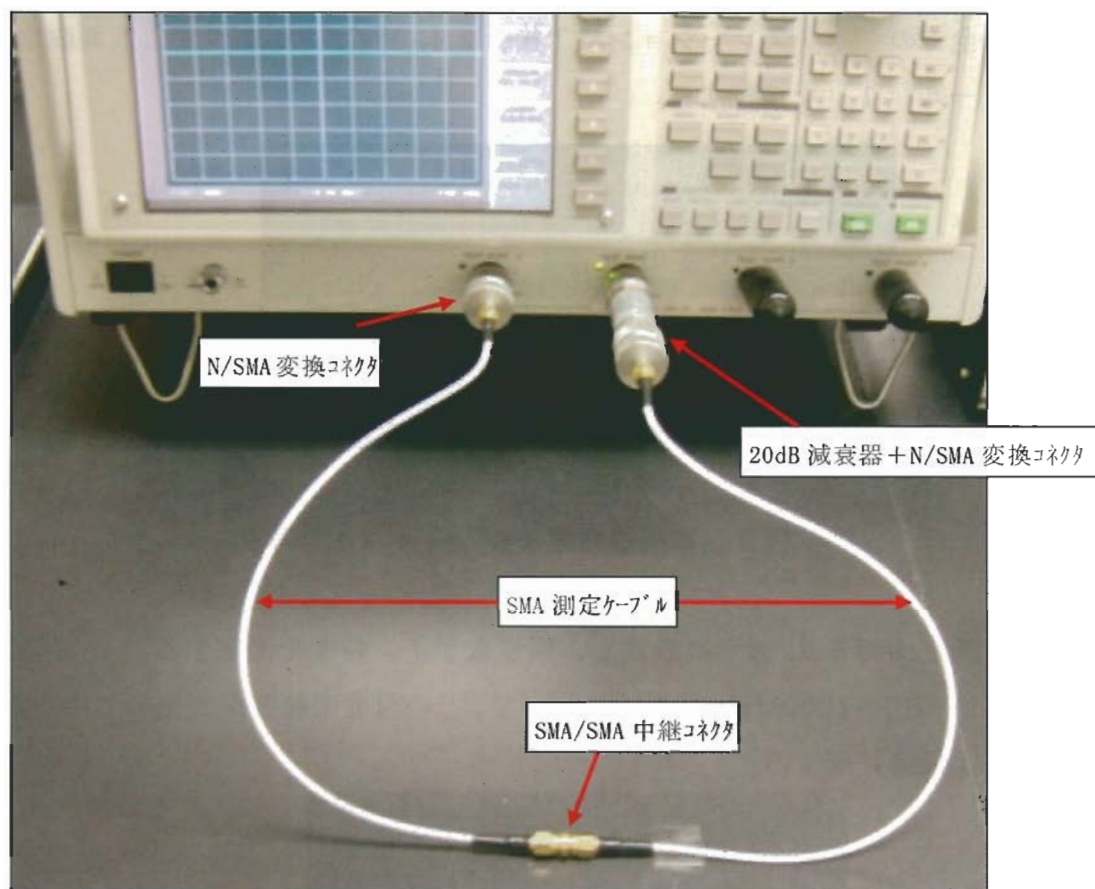
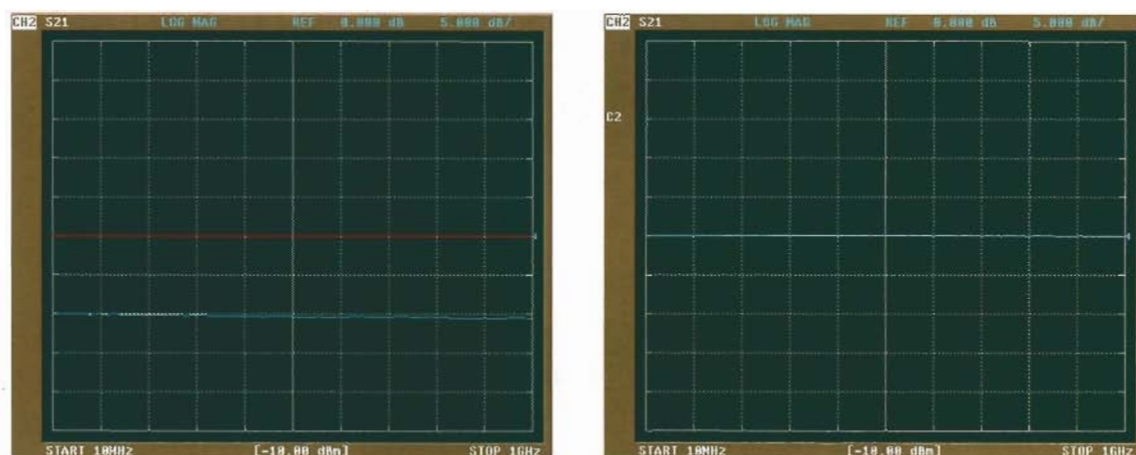


図1 測定器のキャリブレーション構成（例）

(4) 測定器のマニュアルに従い、 S_{21} のキャリブレーションを行う。



【キャリブレーション前】

【キャリブレーション後】

図2 S_{21} キャリブレーション前後の波形

(※ 上図は 10dB 減衰器を使用した場合の例)

(5) S_{21} のキャリブレーション終了後、キャリブレーションキット内のオープンコネクタ・ショートコネクタ・終端器を利用し、測定器のマニュアルに従い、 S_{11} 及び S_{22} のキャリブレーションを行う。

- (6) 全てのキャリブレーション終了後、2本の測定ケーブル間に高周波増幅モジュール(1)を接続する。

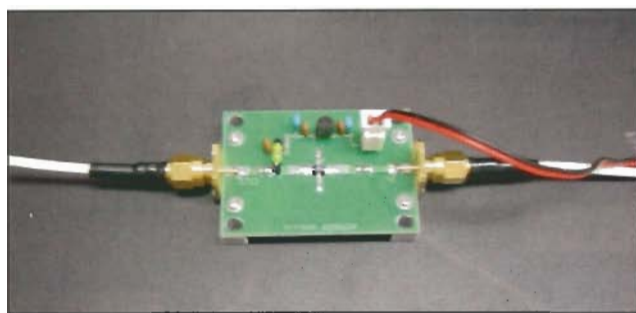
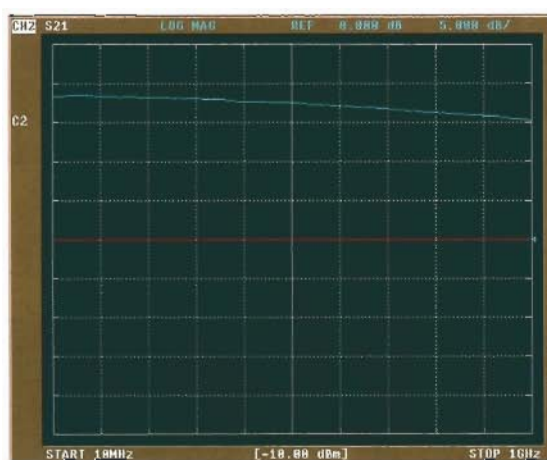


図3 高周波増幅モジュール(1)写真

- (7) 測定画面を S_{21} 表示に設定し、周波数ゲイン特性を測定する。

※ 10~1000MHz の帯域において、どの程度増幅度が変化しているか $\pm$ dB で測定評価する。



$$G_{\max}=185\text{dB}, G_{\min}=155\text{dB}$$

$$G_{\max}-G_{\min}=3\text{dB}$$

フラットネス特性 $\pm 1.5\text{dB}$

図4 周波数ゲイン特性(例)

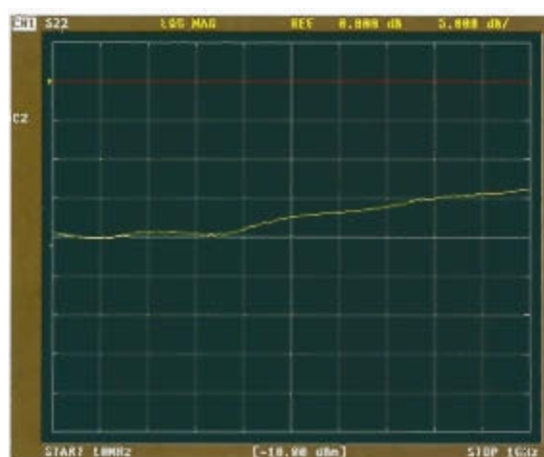
- (8) 測定画面を S_{11} 表示に設定し、入力端子側の反射特性を測定する。



$$RL_{\min}=16\text{dB}$$

図5 入力端子側の反射特性(例)

(9) 測定画面を S_{22} 表示に設定し、出力端子側の反射特性を測定する。



$$RL_{\min} = 14\text{dB}$$

図6 出力端子側の反射特性（例）

(10) 高周波増幅モジュール（1）を取り外す。次に高周波増幅モジュール（2）を接続し、上記同様に周波数ゲイン特性及び反射特性を測定する。

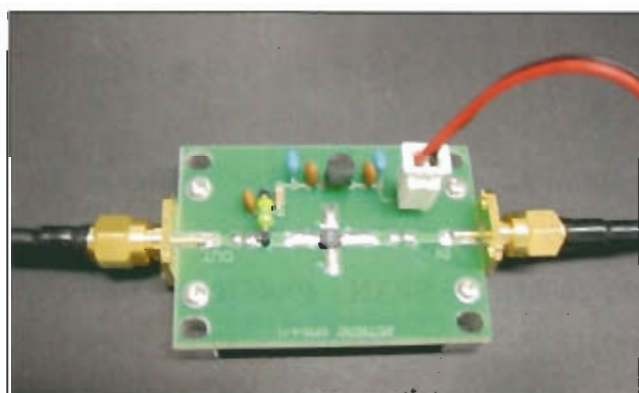


図7 高周波増幅モジュール（2）写真

(11) 測定結果を下記の表2にまとめる。

表2 測定結果

測定項目	高周波増幅モジュール (1)	高周波増幅モジュール (2)
最大ゲイン $G_{\max}$	dB	dB
最小ゲイン $G_{\min}$	dB	dB
フラットネス特性	± dB 以内	± dB 以内
入力側反射特性	dB 以上	dB 以上
出力側反射特性	dB 以上	dB 以上

4-2 歪特性の測定

(1) 標準信号発生器（以下 SG）の RF 出力コネクタに N/SMA 変換コネクタを接続し、スペクトラムアナライザの RF 入力端子にも N/SMA 変換コネクタを接続する。

(2) 次に、図 8 の通り SMA コネクタ同士、SMA 中継コネクタを介して接続する。



図 8 SG とスペクトラムアナライザの接続図

(3) SG 及びスペクトラムアナライザを以下の通り設定し、起動させる。

【SG】

・周波数：100MHz ・RF 出力レベル：0dBm

【スペクトラムアナライザ】

・CENTER：200MHz ・SPAN：400MHz ・REF：0dBm ・dB/div：10dB
・RBW：1MHz ・VBW：1MHz ・ATT：10dB

(4) SG の出力信号（100MHz）をスペクトラムアナライザで測定・確認する。この時、基本波 100MHz 以外に二次高調波 200MHz、三次高調波 300MHz 等が発生している点に注意。

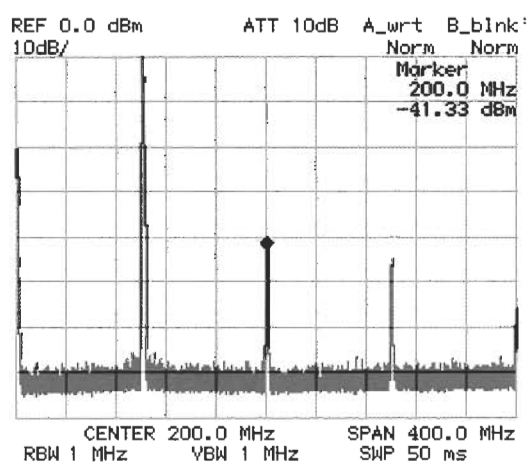


図 9 SG から発生する基本波及び高調波成分

- (5) SMA 中継コネクタを外し、LPF モジュールを挿入する。これにより、高調波成分が殆どカットされていることを確認。

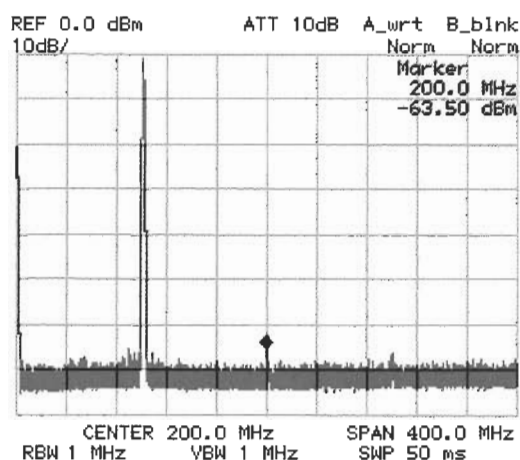


図 1 0 LPF 接続と高調波成分の除去

- (6) LPF の出力端子と高周波増幅モジュール (1) の入力端子を、図 10 のように SMA 中継コネクタ (Male-Male) を用いて接続する。

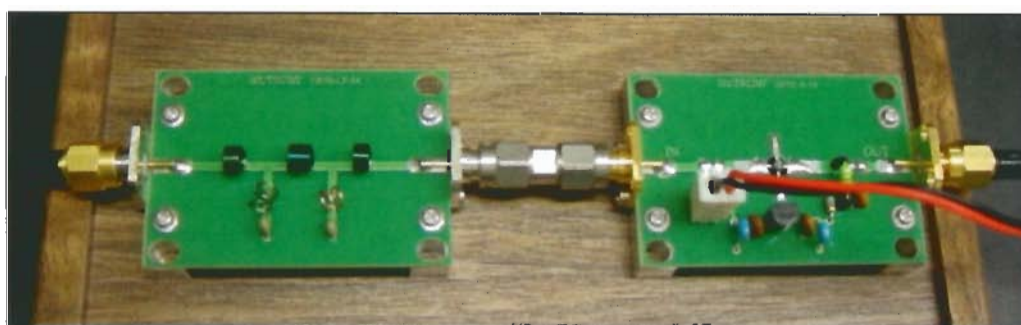


図 1 1 LPF と高周波増幅モジュール (1) の接続

- (7) SG の出力レベルを -30dBm に変更した後、高周波増幅モジュールに 15V を供給し、歪測定を行う。

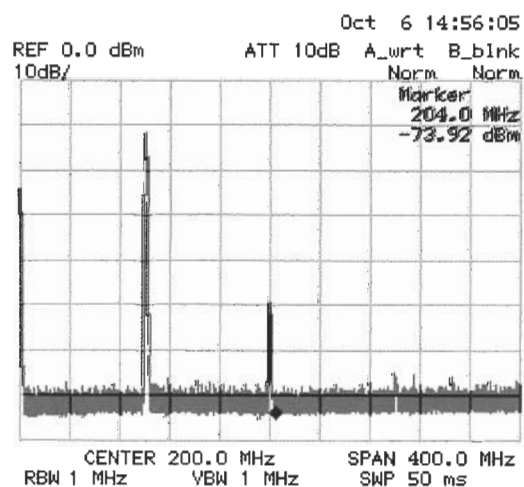


図 1 2 アンプより発生した各種歪成分

- (8) スペクトラムアナライザの設定を、CENTER : 100MHz ・ SPAN : 100KHz に変更し、基本波信号のレベルを測定する。次に CENTER : 200MHz に変更し、二次歪のレベルを測定する。更に CENTER : 300MHz に変更し、三次歪のレベルを測定する。

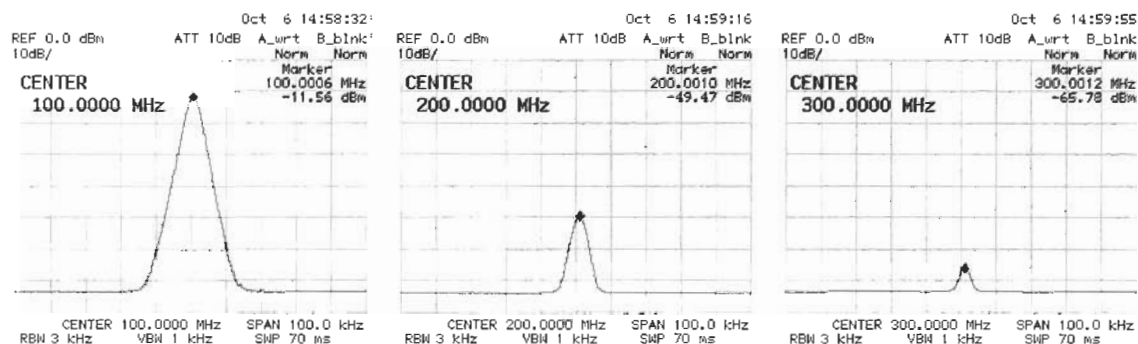


図 1 3 基本波及び各種歪レベルの測定例

- (9) 次に SG の出力レベルを -28dBm に変更し、(8) 項と同様に基本波信号のレベル、二次歪のレベル及び三次歪のレベルを測定する。
- (10) 更に SG の出力レベルを -26dBm ～ -20dBm まで 2dB ステップ で変化させた場合の基本波信号レベル及び二次歪、三次歪のレベルを測定する。
- (11) 以上の測定結果を下の表 3 のようにまとめ、グラフ化する。

表 3 測定結果(例)

SG 出力レベル【dBm】	基本波出力レベル【dBm】	アンプゲイン【dB】
-30	-11.56	-18.44
-28	-9.58	-18.43
-26	-7.61	-18.39
-24	-5.81	-18.19
-22	-4.00	-18.00
-20	-2.25	-17.75

※ アンプゲイン = (基本波出力レベル) - (SG 出力レベル)

SG 出力レベル 【dBm】	基本波 出力レベル 【dBm】	二次歪 レベル 【dBm】	D/U (二次) 【dB】	三次歪 レベル 【dBm】	D/U (三次歪) 【dB】
-30	-11.56	-49.47	37.91	-65.78	54.22
-28	-9.53	-45.44	35.91	-59.50	49.97
-26	-7.61	-41.39	33.78	-53.56	45.95
-24	-5.81	-37.19	31.38	-47.56	41.75
-22	-4.00	-33.17	29.17	-41.78	37.78
-20	-2.25	-28.89	26.64	-35.81	33.56

※ D/U (二次) = (基本波信号レベル) - (二次歪レベル)

※ D/U (三次) = (基本波信号レベル) - (三次歪レベル)

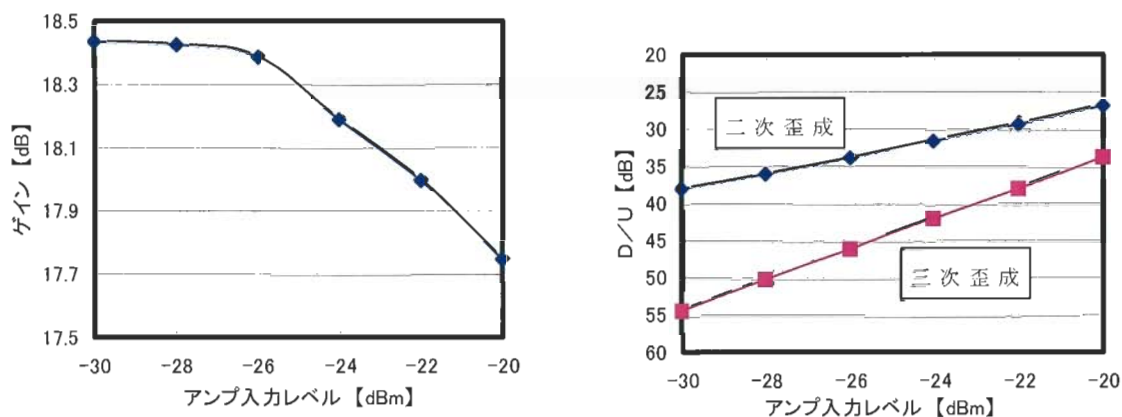


図 1.4 高周波増幅モジュール (1) のゲイン特性と D/U 特性 (例)

(1.2) グラフ化した測定結果から、次の項目を確認する。

- ・ アンプ入力レベルが増加するに従い、ゲインが低下していること。
- ・ アンプ入力レベルが 2dB 増加するに従い、D/U (二次歪) 特性が約 2 dB 悪化していること。
- ・ アンプ入力レベルが 2dB 増加するに従い、D/U (三次歪) 特性が約 4dB 悪化していること。

(1.3) 高周波増幅モジュール (1) を取り外し、高周波増幅モジュール (2) を接続する。

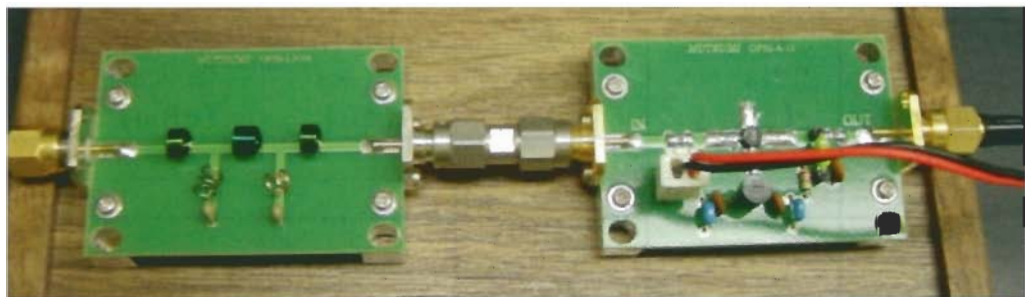


図 1.5 LPF と高周波増幅モジュール (2) の接続

(14) 高周波増幅モジュール (1) と同様にモジュール (2) の測定を行う。

※ 但し、SG 出力レベルは $-15\text{dBm} \sim -5\text{dBm}$ に設定する。

(15) 下表の通り、その結果をまとめグラフ化する。

● 高周波増幅モジュール (1)

SG 出力レベル【dBm】	基本波出力レベル【dBm】	アンプゲイン【dB】
-30		
-28		
-26		
-24		
-22		
-20		

SG 出力レベル【dBm】	基本波出力レベル【dBm】	二次歪レベル【dBm】	D/U (二次)【dB】	三次歪レベル【dBm】	D/U (三次歪)【dB】
-30					
-28					
-26					
-24					
-22					
-20					

● 高周波増幅モジュール (2)

SG 出力レベル【dBm】	基本波出力レベル【dBm】	アンプゲイン【dB】
-15		
-13		
-11		
-9		
-7		
-5		

SG 出力レベル【dBm】	基本波出力レベル【dBm】	二次歪レベル【dBm】	D/U (二次)【dB】	三次歪レベル【dBm】	D/U (三次歪)【dB】
-15					
-13					
-11					
-9					
-7					
-5					

(16) 各モジュールの特性の違いについて検討する。

5 実習のまとめ

(1) ネットワークアナライザを用いた S パラメータの測定方法を習得したか。

(YES, NO)

(2) SG 及びスペクトラムアナライザの操作法を習得したか。

(YES, NO)

(3) 高周波コネクタ及びケーブル等の名称・種類を覚えたか。

(YES, NO)

(4) 高周波増幅器の周波数ゲイン特性について理解できたか。

(YES, NO)

(5) 高周波増幅器の歪特性について理解できたか。

(YES, NO)

6 関連知識 (応用問題等)

(1) 高周波増幅モジュール (1) 及び (2) のそれぞれについて、NF (ノイズ) 特性を測定してみる。

(2) 高周波増幅モジュール (1) 及び (2) のそれぞれについて、消費電流を測定する。

(3) 各モジュールについて、利得飽和度特性・歪特性・NF 特性及び消費電流をそれぞれ比較してみる。

(4) SG を 2 台用意し、相互 2 次歪 (IM_2) 及び相互 3 次歪 (IM_3) を測定してみる。

<参考>

基本信号 1 周波数: f_1

基本信号 2 周波数: f_2 (但し、 $f_2 > f_1$ の時)

$$IM_2 = f_2 \pm f_1$$

$$IM_3 = 2f_2 - f_1, \quad 2f_1 - f_2$$

7 参考文献

(1) ネットワークアナライザ R3765 取扱説明書 (アドバンテスト社)

(2) RF モジュールセット取扱説明書 (睦コーポレーション社)