

ミリ波CMOS回路設計のための 測定評価技術

○伊藤 彰吾, 李 寧, 高山 直輝, 松下 幸太,
岡田 健一, 松澤 昭

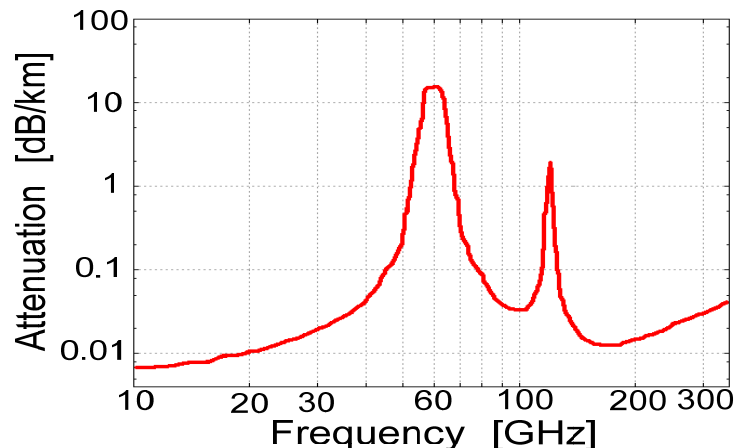
東京工業大学大学院 理工学研究科

- 背景・目的
- SOLTとLRM系の違い
- IFバンド幅の影響
- 測定値の共振
- De-embedding method
- まとめ

- 背景・目的
- SOLTとLRM系の違い
- IFバンド幅の影響
- 測定値の共振
- De-embedding method
- まとめ

ミリ波帯

- ・60GHz付近の周波数帯を使用
- ・遠くまで飛ばない
→近距離通信に向いている
- ・世界的に無免許で使用可能



[1] Rec. ITU-R P.676-2, Feb. 1997

ミリ波を利用したアプリケーション

- ・数Gbpsの高速無線通信
- ・車載レーダー

民生機器として使用
できるくらい低コスト
にするためには...

シリコンCMOSプロセスでの実現が鍵！

ミリ波CMOS回路設計

- ・寄生成分の影響が大きい
- ・正確なモデリングが要求される
- ・精度の高い測定が必要

発表の内容・目的

- ・ネットワークアナライザを用いたミリ波測定の手法、問題点の紹介
- ・測定ノウハウの共有



- ・ネットワークアナライザ
Agilent N5250A (10MHz-110GHz)
- ・プローブステーション
Cascade Microtech Summit 11000
- ・プローブ
Cascade Microtech
I110-A-GSG-150
I110-A-GSG-125
- ・校正基板
Cascade Microtech
101-190 104-783A



- 背景・目的
- SOLTとLRM系の違い
- IFバンド幅の影響
- 測定値の共振
- De-embedding method
- まとめ

ISSを使ったキャリブレーション

SOLT→12個のエラータームを既知のISSの測定値から計算

利点:ISSの補正值(C-open, L-short, L-term)が正確ならば高精度で校正が可能

欠点:補正值のずれの影響が高周波になって大きくなった場合、校正精度が劣化

LRM系→考慮するエラータームを減らして、ISSの非理想性を考慮

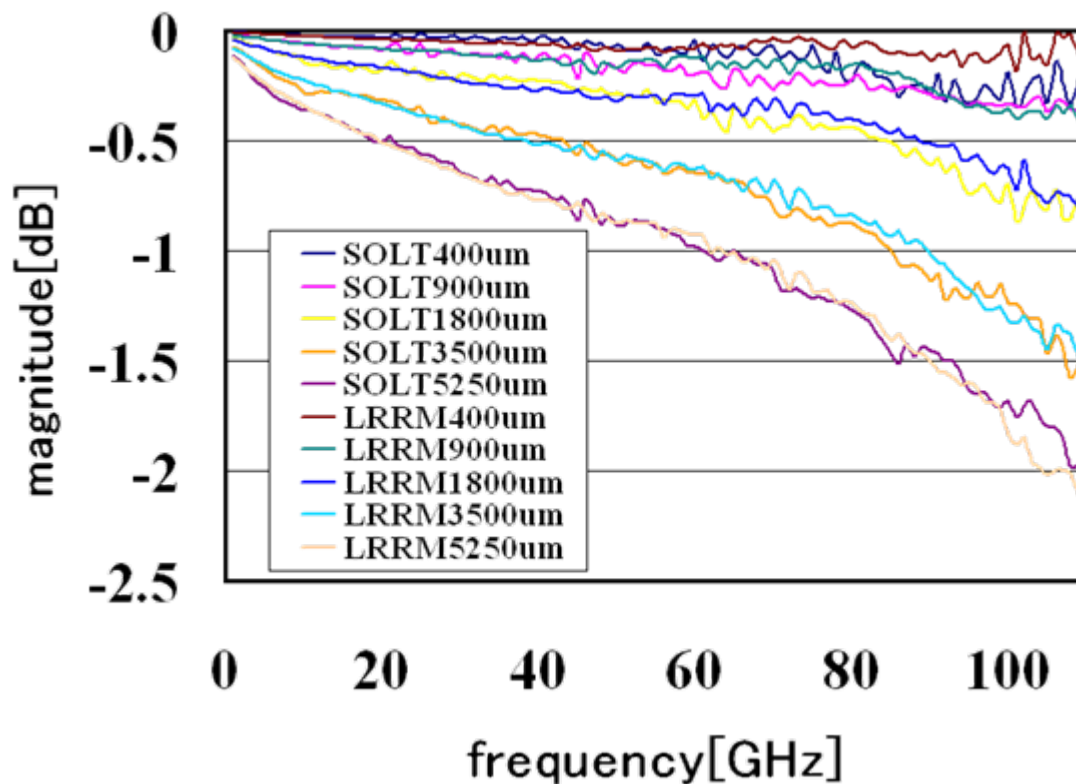
利点:高周波でのISSの補正值のずれをも考慮

欠点:エラータームの数が少ない(考慮できるエラー要因が少ない)
未知数が多く誤差が出やすい

検証方法

- ・SOLT と LRRM、それぞれの方法でキャリブレーションした後、長さの違う thru を測る

通過特性S(2,1)



SOLTの場合、高周波になってISSの補正值に誤差がでてくると、校正精度が劣化してしまいが、今回の比較では差が見られなかった。

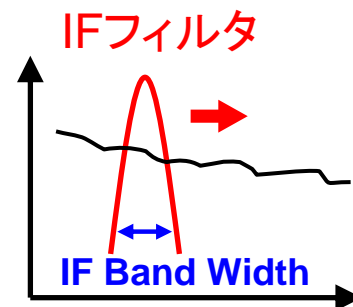
- 背景・目的
- SOLTとLRM系の違い
- IFバンド幅の影響
- 測定値の共振
- De-embedding method
- まとめ

IF Band Width

RF信号をダウンコンバートした後、IFフィルタを通す

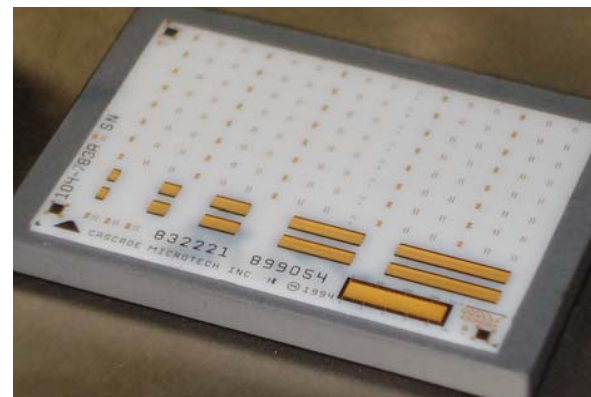
広く設定→測定速度は速いがSN比が劣化

狭く設定→測定速度は遅いがSN比が改善



検証方法

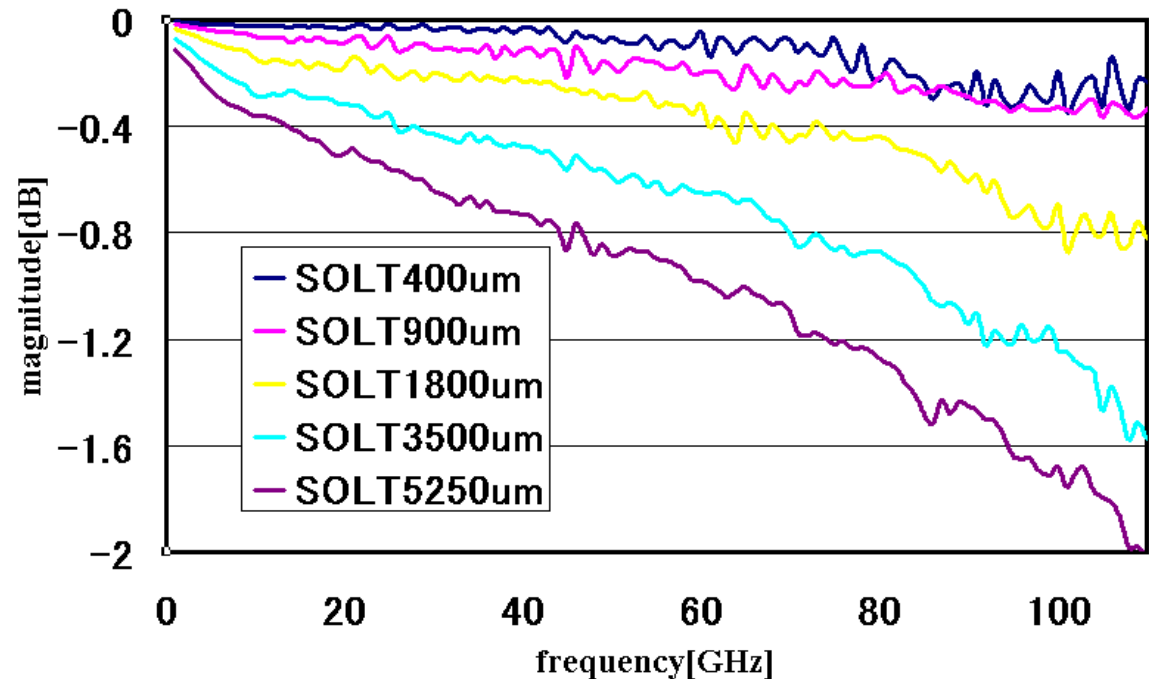
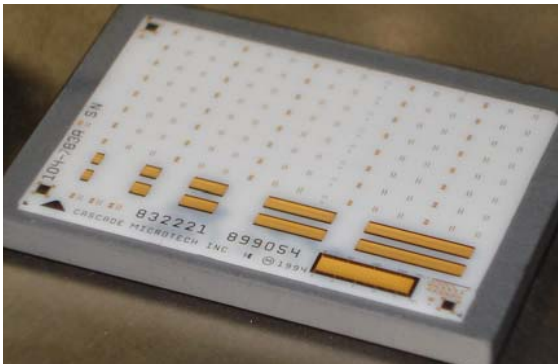
- ・IF Band Width の値を変化させ、ISS基板を使ってSOLTキャリブレーションを行う
- ・ISS基板のthruの特性と計算から求めた目標値とを比較し、キャリブレーションの精度を検証。
- ・アベレージングなし



ISS校正基板

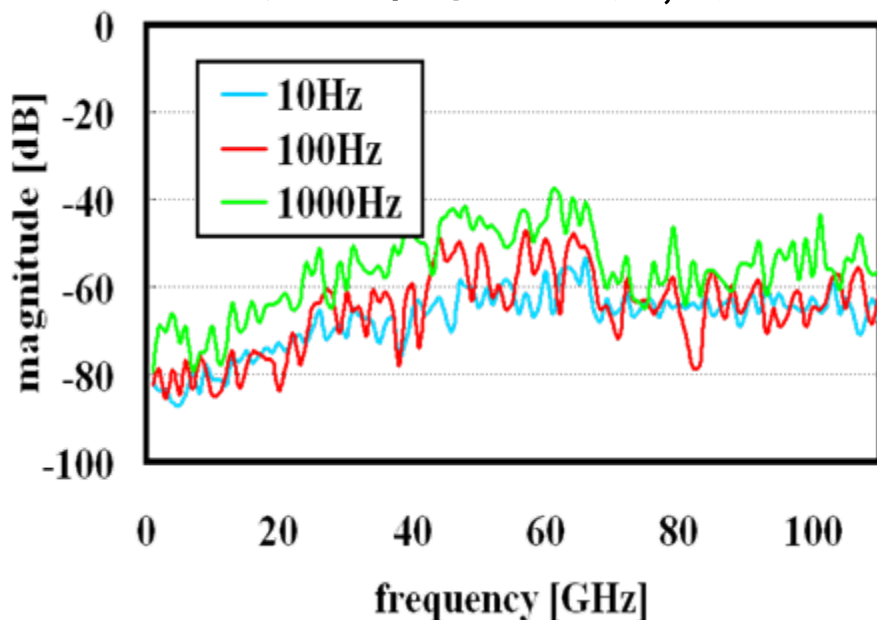
目標値の導出

ISSのthruの $S(2,1)$ を導出する。ISSの長さの異なる線路を測定し、線路のロス差から単位長さ当たりのロスを求める。

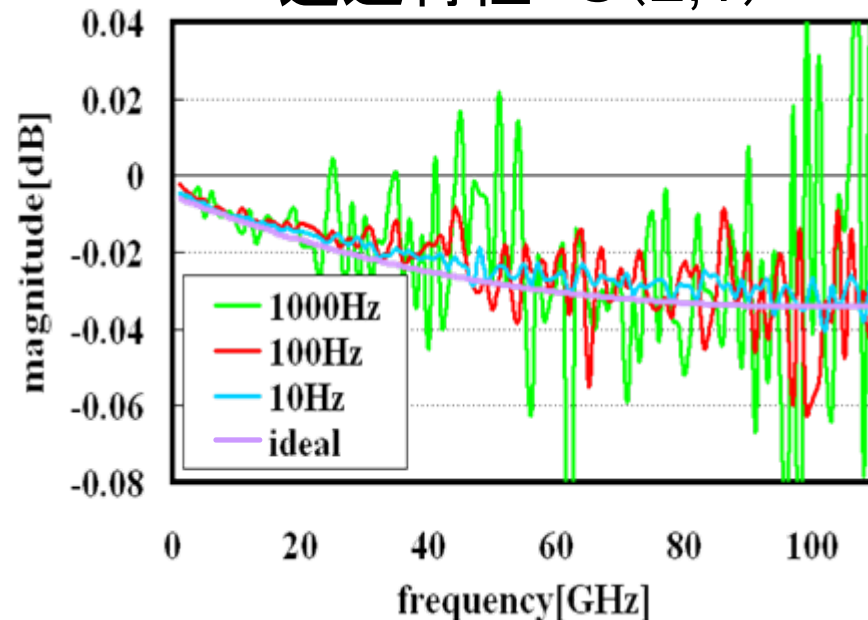


高周波でIFバンド幅の差による影響が顕著に

反射特性 $S(1,1)$



通過特性 $S(2,1)$



キャリブレーション目標値(校正後のISS Thru)

$$S(1,1) < -60\text{dB}$$

$$S(2,1) < -0.025 \pm 0.003\text{dB} @ 40\text{GHz}$$

$$S(2,1) < -0.030 \pm 0.005\text{dB} @ 60\text{GHz}$$

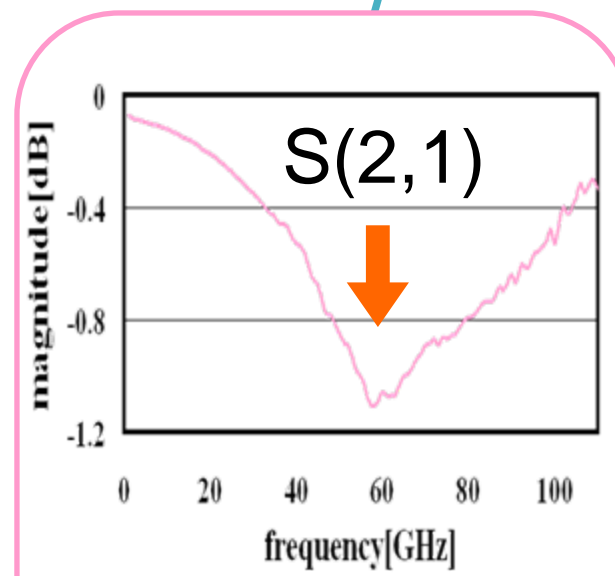
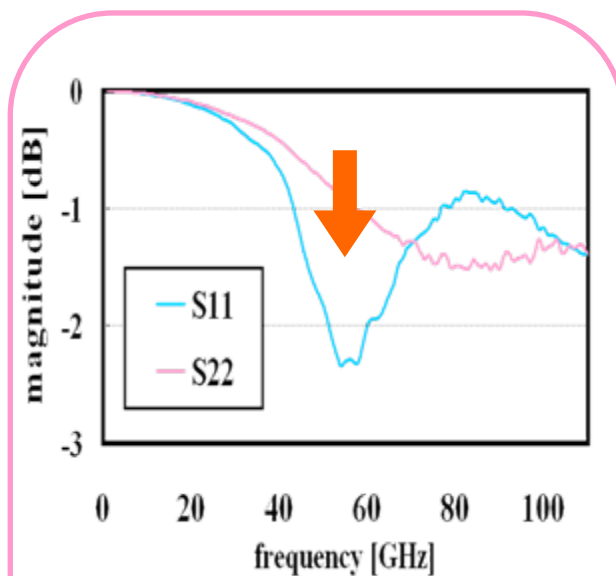
$$S(2,1) < -0.035 \pm 0.010\text{dB} @ 110\text{GHz}$$

- 背景・目的
- SOLTとLRM系の違い
- IFバンド幅の影響
- 測定値の共振
- De-embedding method
- まとめ

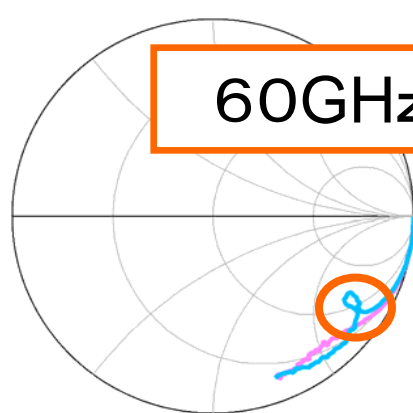
- ・De-embedding用のOpenの反射特性
- ・伝送線路の通過特性



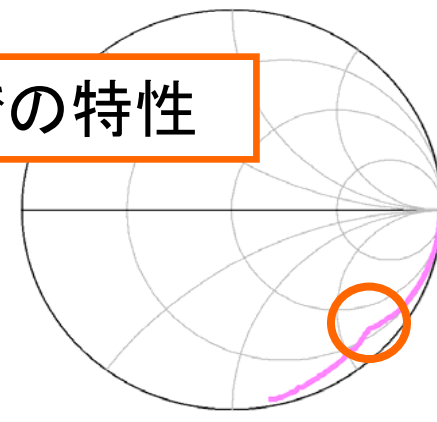
60GHz付近の周波数帯でおかしな特性が得られた。



60GHz付近での特性



Open



伝送線路

考えられる原因



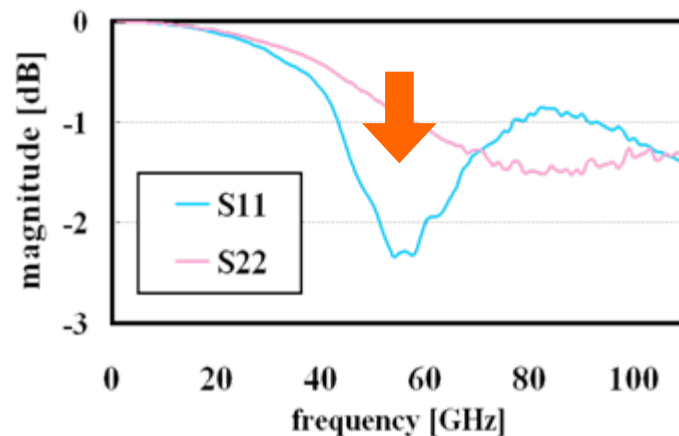
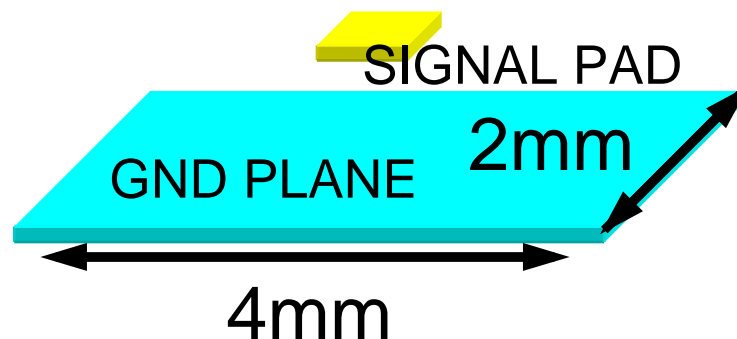
TEGのGNDを
つなげて共有

アンテナのような放射が起きて、
エネルギーがシリコン基板に吸収
されている

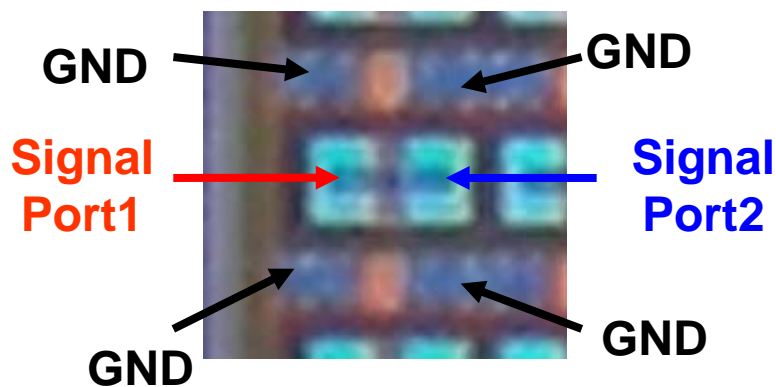
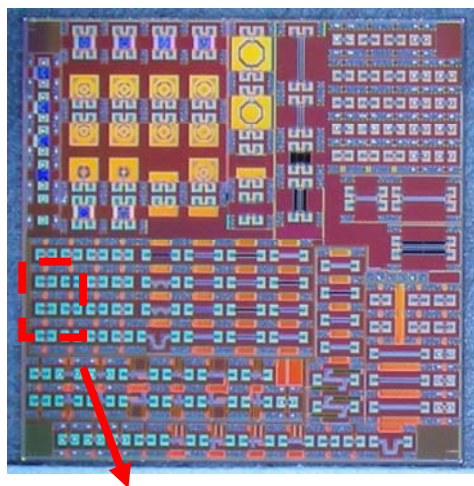
対策

TEGのレイアウトではGNDの長さを
長くしすぎず、共振に気をつける？

GNDの面積が大きい

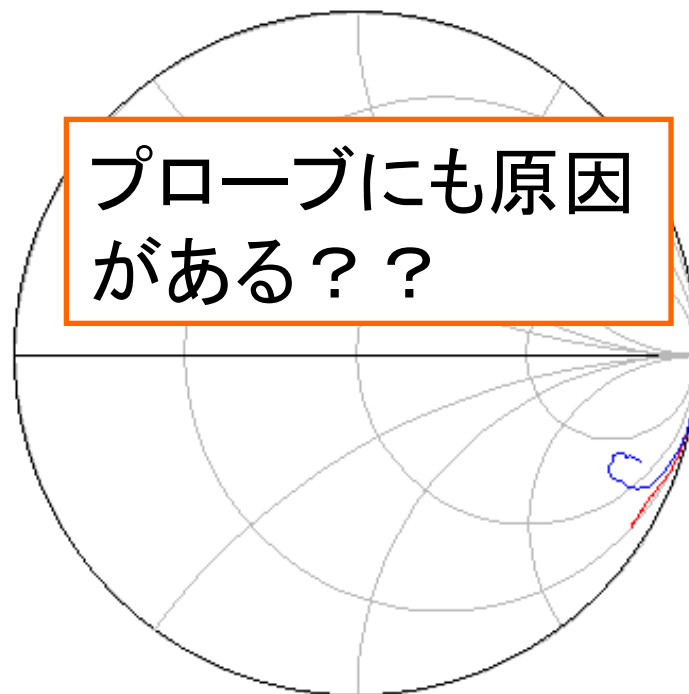


CHIPの内側と外側にある
Portで40GHz以降の特性
が異なる



OPEN-PADの特性
100MHz ~ 67 GHz

プローブにも原因
がある??



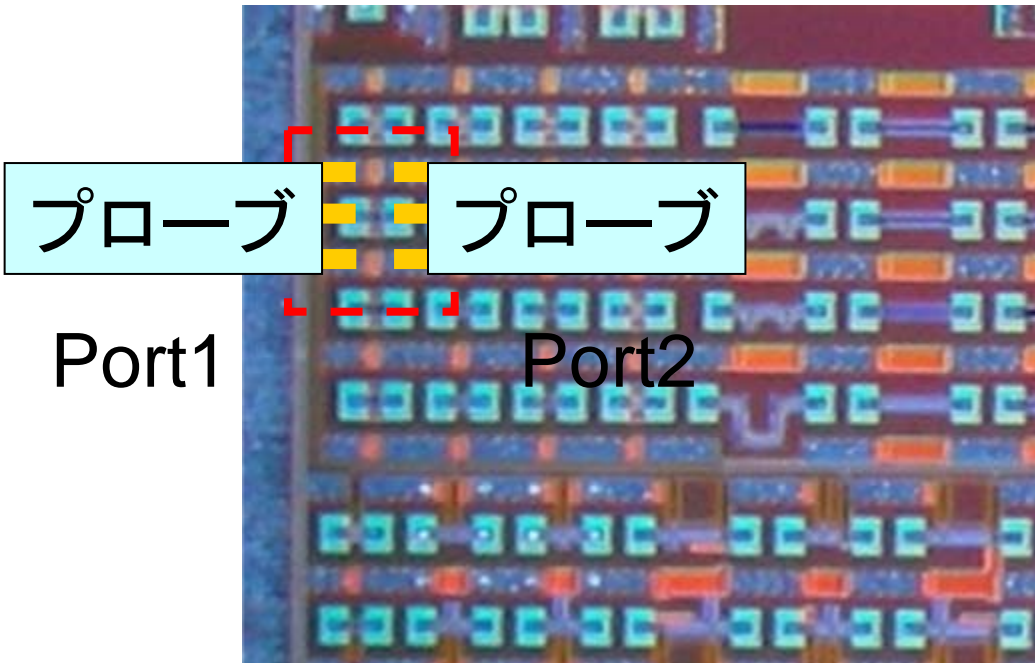
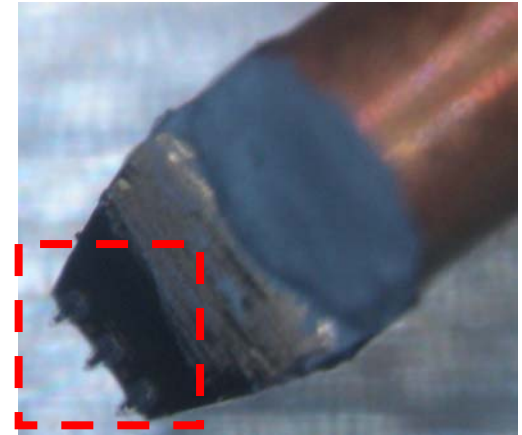
赤線: S11

青線: S22

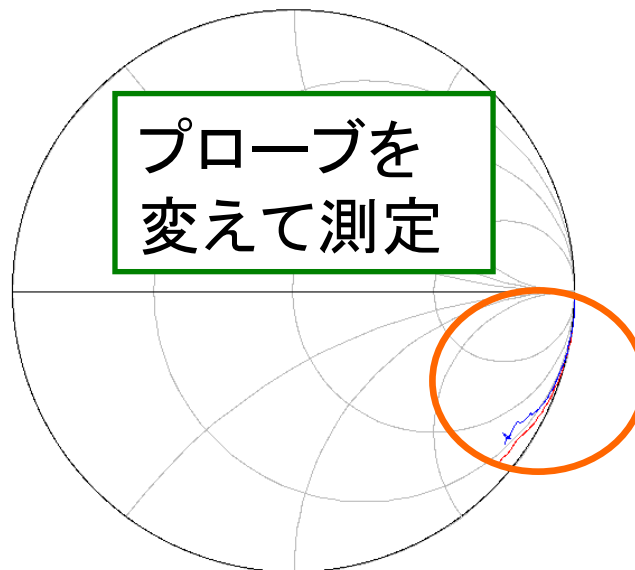
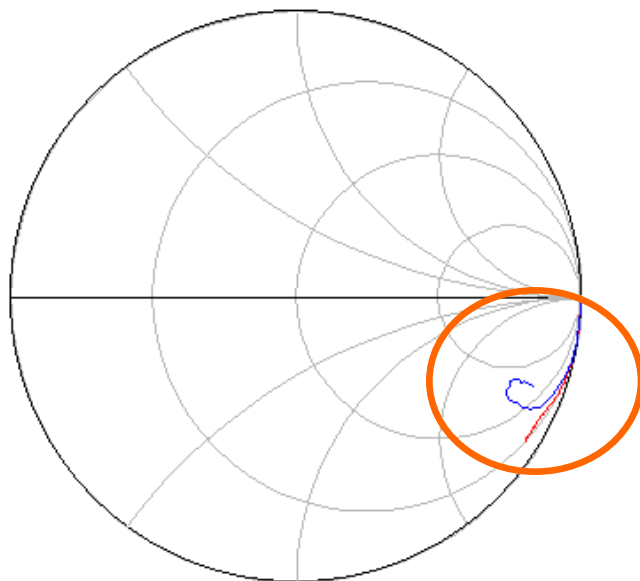
考えられる原因

プローブ裏側のシグナル部分と基板のGNDとの間で共振が起きている

プローブの裏側



形状の違うプローブを用いたところ、特性の改善が見られた



赤線 : S11
青線 : S22

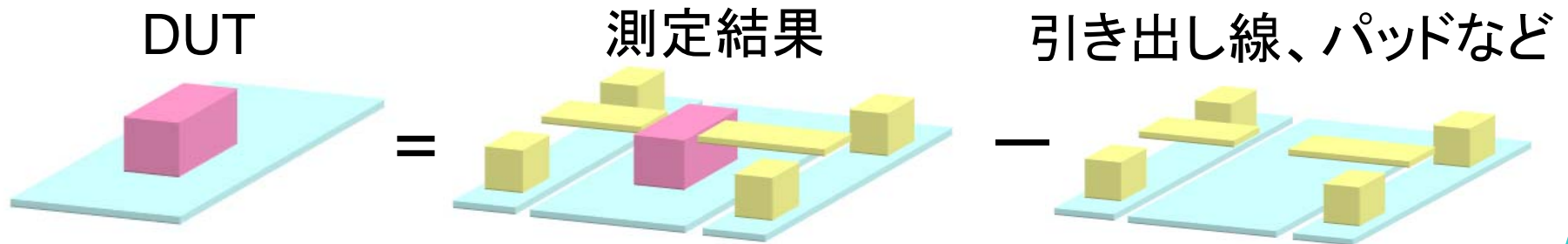
プローブの形状によって共振が起きていると考えられる

対策 プローブ直下にGNDが来ないようにレイアウトを気をつける？

- 背景・目的
- SOLTとLRM系の違い
- IFバンド幅の影響
- 測定値の共振
- De-embedding method
- まとめ

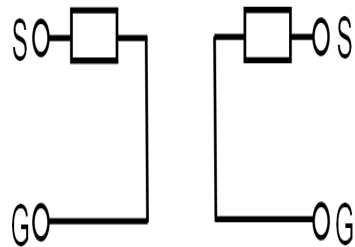
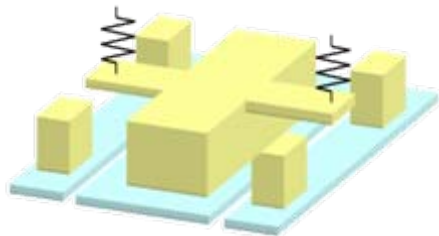
De-embedding

測定結果からパッドなどの影響を差し引く

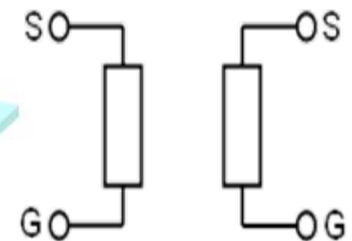
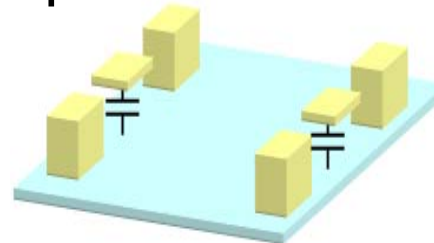


De-embedding用にダミーパターンを用意、等価回路に置き換える

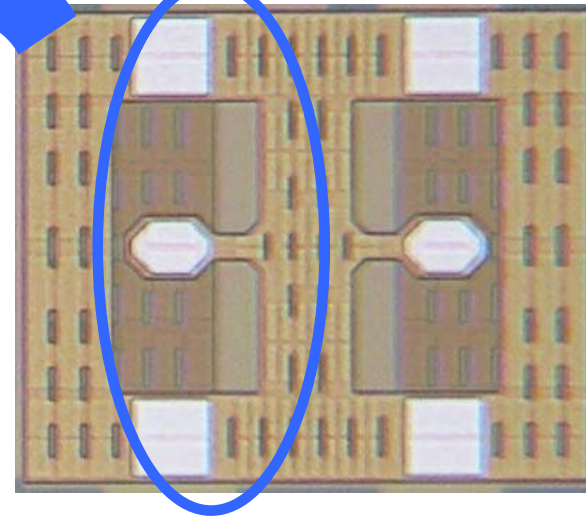
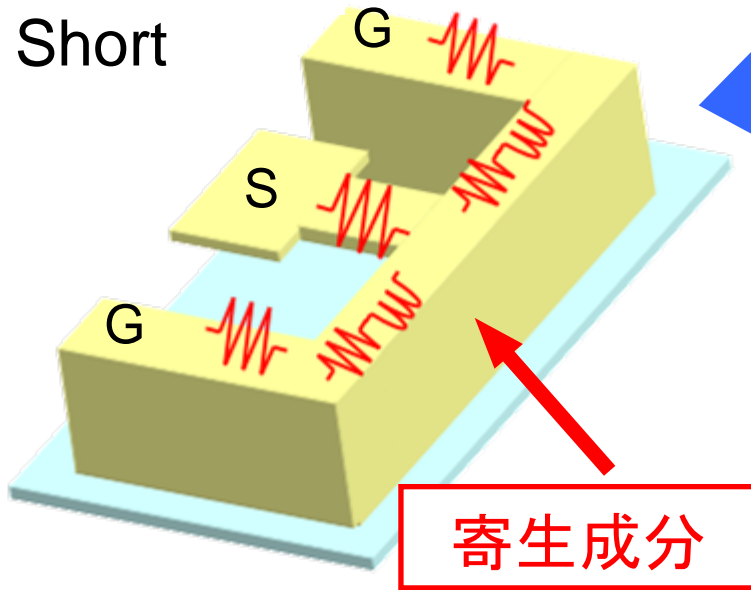
Short



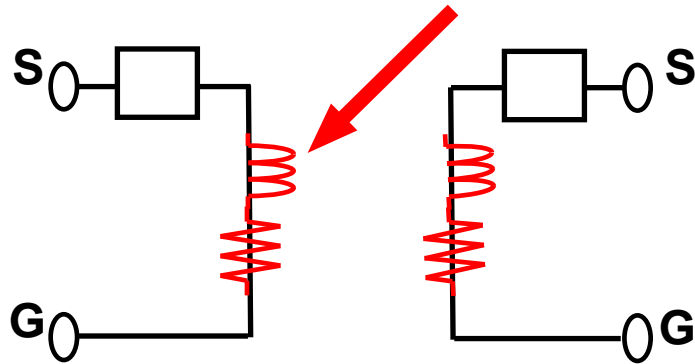
Open



ミリ波帯では...
Short



実際のレイアウト



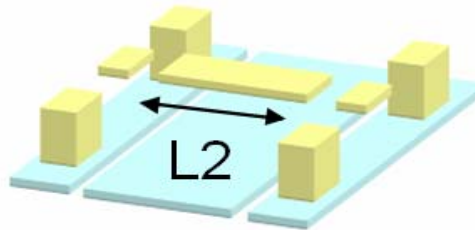
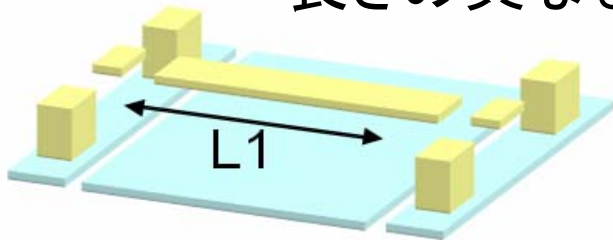
等価回路

等価回路で考慮されていない
寄生成分

→thru を用いたDe-embedding

Step1

長さの異なる伝送線路を用意



$$T_{L1}^m \equiv T_P T_{L1} T_P$$

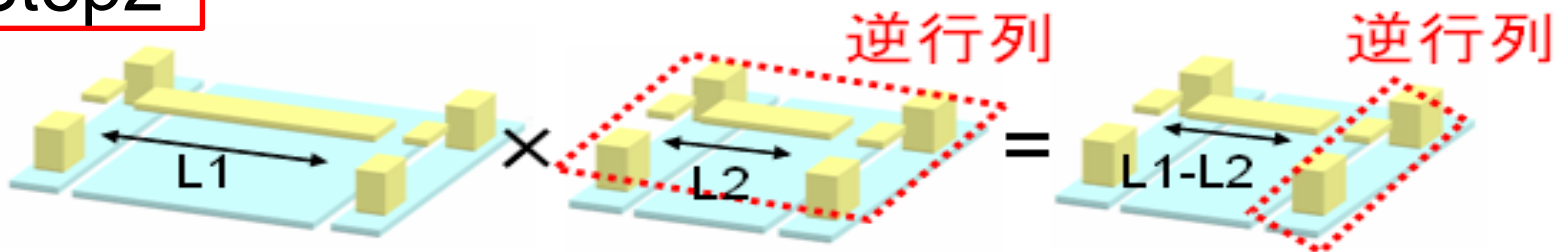
$$T_{L2}^m \equiv T_P T_{L2} T_P$$

 $T_{L_i}^m$: 長さ L_i の線路の実測のTパラメータ

 T_{L_i} : 長さ L_i の線路のTパラメータ

 T_P : パッドのTパラメータ

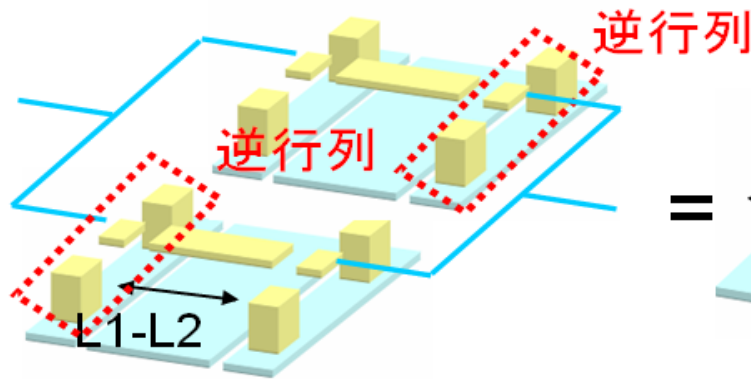
Step2



$$T_{L1-L2}^h \equiv T_{L1}^m \times [T_{L2}^m]^{-1} = T_P T_{L1} T_{L2}^{-1} T_P^{-1} \equiv T_P T_{L1-L2} T_P^{-1}$$

 T_{L1-L2}^h : 長さ $L2-L1$ の線路のTパラメータ

Step3



$Y_{L1-L2}^h : T_{L1-L2}^h$ のYパラメータ

$Y_{L1-L2} : T_{L1-L2}$ のYパラメータ

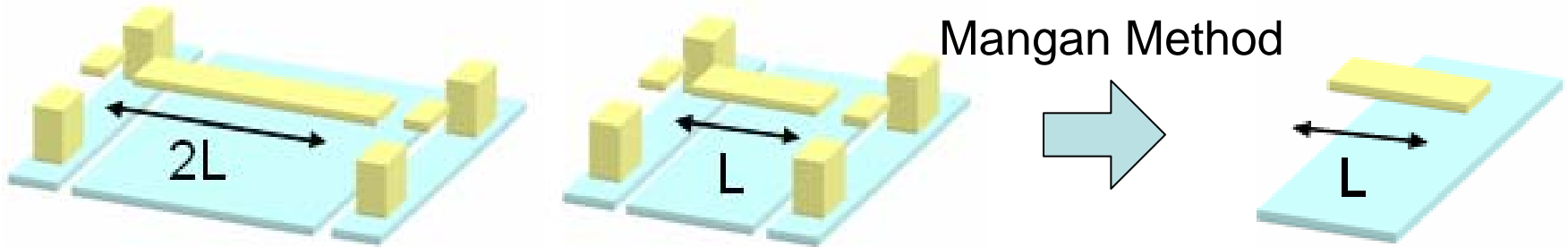
$$Y_{L1-L2} = \frac{Y_{L2-L1}^h + Swap(Y_{L2-L1}^h)}{2}$$

$$Swap \left[\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \right] \equiv \begin{pmatrix} a_{22} & a_{21} \\ a_{12} & a_{11} \end{pmatrix}$$

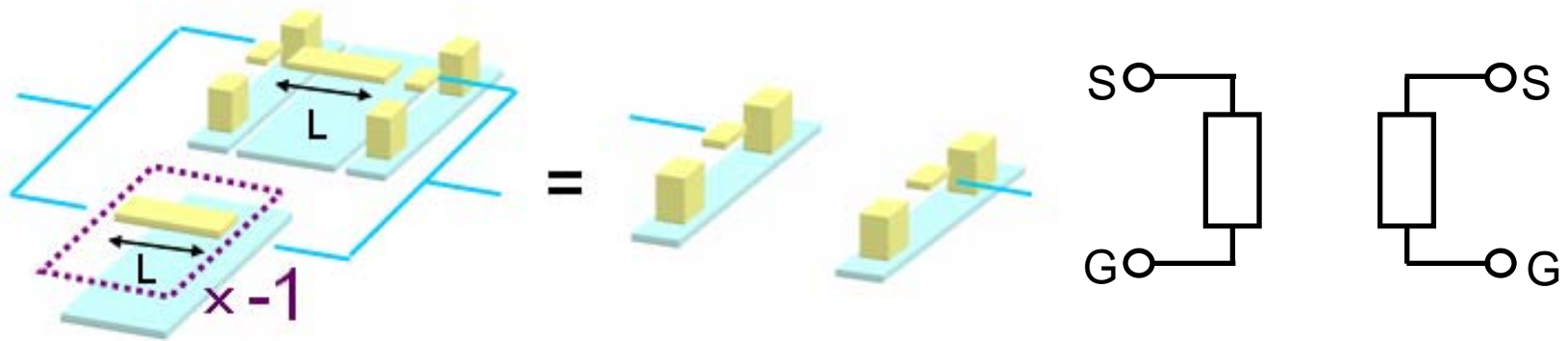
伝送線路しか De-embedding できない

Manganの手法を応用し、あらゆるデバイスをDe-embeddingする方法を紹介

Step1



Step2

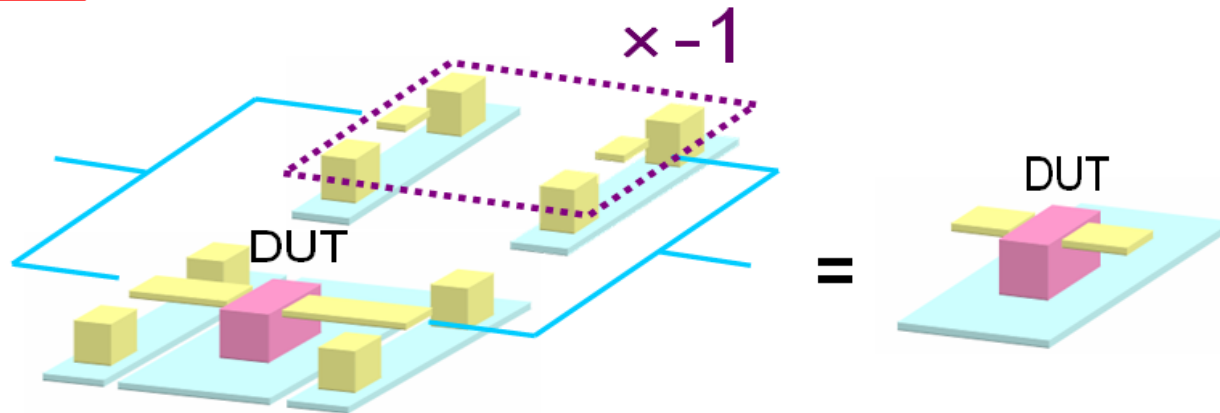


$$Y_{PAD} = Y_L^m - Y_L$$

線路部分を打ち消しパッドの部分のみを求める

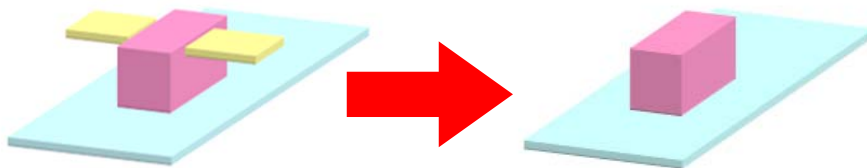
等価回路モデルに置き換え、パッドのパラメータを得る

Step3



$$Y_{DUT} = Y_{DUT}^m - Y_{PAD}$$

Yパラメータでパットの成分を引く。

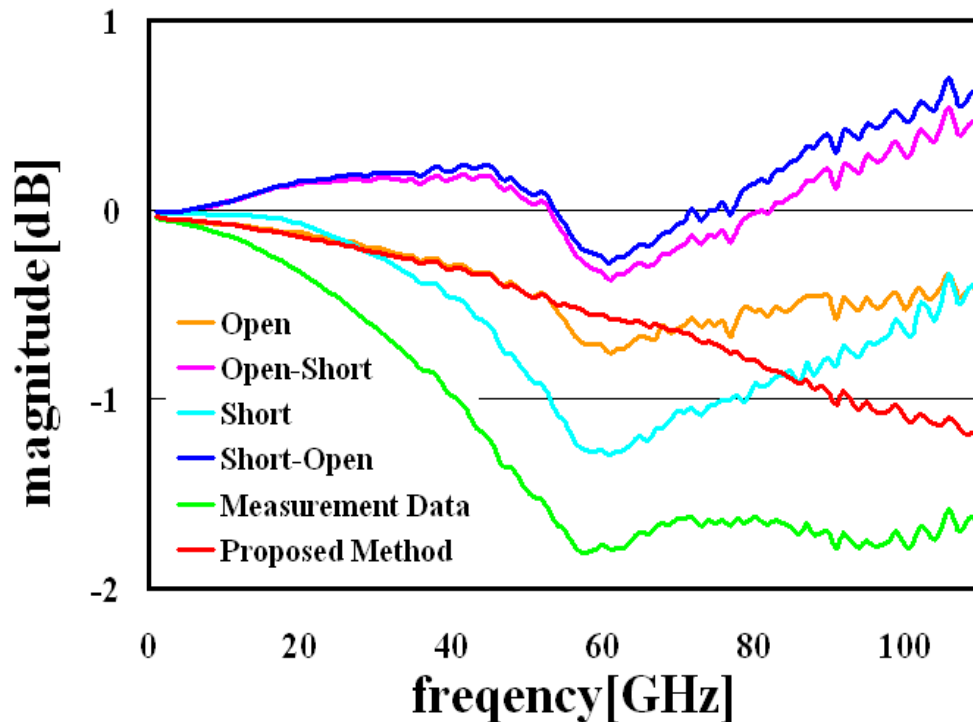


引き出し線の部分はMangan
の手法で別に求めた線路を
使って引くことが可能。

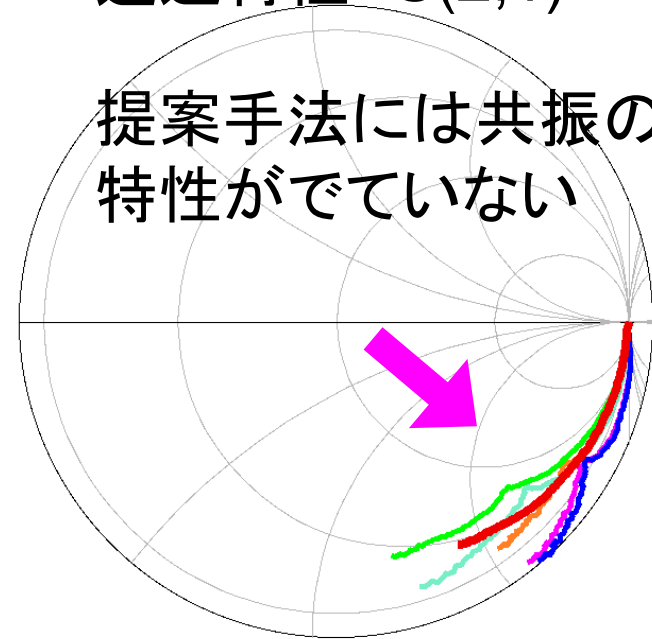
➡️ どんなデバイスでも De-embedding が可能

測定条件

- ・ 伝送線路をDe-embedding
- ・ 共振の見えるTEGを使っている (Open等)

通過特性 $S(2,1)$

提案手法には共振の特性がでていない



Open → 共振の影響が見えやすい

共振の影響を差し引くことができる

- SOLTとLRRMのキャリブレーションの違いによって測定に影響が見られると予想されたが、 $\sim 110\text{GHz}$ では影響が見られないことを確認した。
- IFバンド幅の設定の違いによるキャリブレーションへの影響をみた。測定精度および測定時間の観点からIFバンド幅10Hz、アベレージングなしが適当である。
- 試作したTEGで測定値の共振がみられた。GNDの共振、プローブの共振が考えられる。
- Manganの手法を応用し、伝送線路を用いてあらゆるデバイスをDe-embeddingする方法を紹介した。