

マイクロ波回路解析の考え方

山下榮吉
電気通信大学名誉教授

How to Grasp Microwave Circuit Analyses

Eikichi Yamashita

Professor Emeritus of the University of Electro-communications

ABSTRACT

Some history and technical suggestions on the basic concept of microwave circuit analysis and design are described for young engineers who are going to work in the field of microwave circuit design.

1. 技術は突如交替する

技術には栄枯盛衰の姿がある。生まれて間もなくは赤子のような未成熟な技術が次第に成長して、ある日突然のように繁栄している技術の座を奪ってしまうことは現実の歴史に多々見られる。したがって装置の解析や設計の基本的考え方も否応なしに変わる。

身近な一例を挙げよう。時計の歴史は機械技術の歴史でもあり、両者は進歩を共にしてきた。精密な加工の技術が進めば時計も正確に時を刻んだ。一方、トランジスタが出現して水晶共振回路と組み合わせれば時計が作れることが判った。しかし、最初は壁時計と置時計から出発した。

さらに半導体集積回路が出現し集積度も高くなった。電子回路時計は小型化し小誤差の腕時計が現れ、遂には機械式腕時計を量的に圧倒した。これは今日の時計店の店先を見れば明らかであろう。機械式は時計の精度を高めるほどコストがかかるが、半導体回路は多量に作れば作るほど、1個当

たりの製作費が安くなる利点があった。

一方で、せっかく育ててきた技術も思いがけない理由で日の目を見られない場合がある。20世紀半ばに、円形導波管の特定のモードにより電磁波を極めて低い損失で伝送できるという計算結果が発表された。しかも中心周波数をミリメートル波とすれば広帯域の情報伝送が可能となるので、来るべき大量情報の時代に適していると考えられた。約20年の研究開発が各国で進行し、60GHz付近で実験が行われて、システムの建設も近いと思われた。一方で急激に発展してきた光ファイバ伝送技術が優位となり、結局、長距離円形導波管ミリ波伝送システムは実用化しなかった。

このようにマイクロ波技術は急激な変化と発展の歴史を経てきた。回路設計の仕方もそれに対応して変遷してきた。

2. 20世紀における技術の交替

今年のテレビジョン番組を新撰組が賑わした。新撰組が京都で活躍した1864年

には、英国ではマクスウエルが電磁波の存在を予測していた。その後、電磁波の存在が実証され、その応用としてのマルコーニの無線電信技術が1895年に現れた。以後、20世紀の末までに種々の電磁波装置が考案され、その技術も大幅に変化してきた。設計技術の基本は変わらない回路もあったが、全面的に設計方法を考え直さなければならぬ回路も生じた。

この100年の間に変化した主要マイクロ波技術と設計概念を列挙してみよう。

(1) 縮小しながらも20世紀後半まで活躍した真空管の仕事は、現在トランジスタが多く引き受けている。真空管の中では、陰極から放出された電子がニュートンの運動方程式にしたがって動き、最後に陽極に到達する。電子を動かす電界は真空管内部の電極構造によって決定され、磁界は外部コイルまたは磁石によって与えられた。陽極には高電圧回路、陰極には加熱回路が必要となり、使用電力も大きいので全体としては放熱設計も必要であった。

一方で、マイクロ波のような短い波長の増幅回路を目指すには真空管全体を極度に小さくすることが必然であった。小さく作ることと放熱を十分に行うことは相反する要求であり、従来型の真空管増幅器設計には限界が見えた。しかし、新しい増幅原理の進行波管が生まれた。進行波管の構造は長い伝送路を含んでいるので熱問題をやや軽減し、さらに広帯域性も特徴とした。

最大の変化はトランジスタの発明であった。トランジスタは、真空でなく固体、しかも周期原子構造の結晶の組み合わせであるから、電子は新しい運動方程式により支配された。結局、ニュートン力学に代わり

量子力学が主役となってトランジスタが設計された。幸い、トランジスタの全体構造は小さく、真空管のように加熱する必要はなくなった。

(2) 20世紀半ばにおけるマイクロ波の応用の典型はレーダーであった。電磁波を遠方の標的に届かせて反射させるためマグネトロンマイクロ波出力は高いことが要求され、伝送する回路には高電力に耐える金属製の導波管が使用された。

トランジスタと導波管はどう見ても構造的に不釣り合いであり、小さい半導体素子にふさわしい伝送構造が必要であった。平面的に作られる電界効果トランジスタ(FET)に接続しやすい線路としては、平面的構造となる必然性もあった。

一方、多部品のトランジスタ回路を化学過程ですべて作る集積回路が低周波領域で実用化された。そこでの信号伝送は基板上の带状導体によって行われた。つまりストリップ状の導体が基板下部の大地導体と共に線路を形成して信号を送る形であった。マイクロ波領域では既にトリプレート・ストリップ線路が使われ始めていたので、基板上に作られたマイクロ波線路はマイクロストリップ線路と名づけられた。

マイクロストリップ線路はマイクロ波トランジスタ回路を平面的に作成するのに都合よい構造であったが、最初はその特性設計法の工夫が行われた。1960年代初めの状況では、不便で数少ない大型計算機を利用するか、比較的身近にある電動計算機を設計に利用するしか方法がなかった。何れの手段にしても必要メモリー容量が小さく計算時間の短い解析設計理論の開発が求められた。

それまで使われたトリプレート・ストリップ線路の場合は、均質媒質なので等角写像法によって特性インピーダンスを単純に計算できた。マイクロストリップ線路は不均質媒質なので等角写像法は単純には適用できなかった。まして多層媒質に対してはこの解析方法は無力であった。

フーリエ変換はマイクロストリップ線路の不均質平面境界条件、さらに多層境界条件を定式化するのに有力であり、変分原理とパーシバル定理を適用すると、多層構造を含めた広範囲のマイクロストリップ型線路の特性インピーダンスと線路波長を効率的に計算できることが明らかになった。

マイクロストリップ線路とトランジスタを組み込んで増幅回路を設計するには S パラメータが便利となり、トランジスタの性能表示に S パラメータが利用されるようになった。

(3) 人工衛星技術が発展するにしたがって、衛星と地上の間の通信技術も発展した。人工衛星に搭載できるアンテナの大きさと送受信技術の成熟度を考慮すれば、マイクロ波帯の電磁波が通信目的に適していることは当初から明らかだった。しかも装置の軽量性・信頼性まで考えればマイクロ波帯での集積回路 (MIC) の開発が望まれた。

基板、能動素子回路、受動素子回路を一体化して、フォトリソグラフィと化学処理過程により集積化した回路、つまりモノリシック・マイクロ波集積回路 (MMIC) の技術が確立するまでは、一部の回路のみ集積するハイブリッド・マイクロ波集積回路 (HMIC) が作られた。

MMIC の設計が出来るようになると、基板として多く使われる GaAs 材料が高価で

あることから、必要基板面積を最小化する設計も考えられた。これには素子間の距離を最短化しつつ結合を防ぐこと、基板周辺の空地を切り落としても性能を低下させないことが必要であった。

集積回路以前の個別回路では製作後の微細調整も可能であったので、設計者も事後調整を予定して考えた時代があった。しかし半導体回路の大量生産時代になると製作後調整は不可能となった。物理的にも微小過ぎて調整具を回路に入れようがなかった。しかも設計エラーに気がついた時には、既に大量に作られてしまっていて莫大な損失となった。したがって精密な設計法と高性能計算機による正確な設計が必須となった。

さらに、HEMT(高電子移動度トランジスタ)が出現し、低雑音マイクロ波増幅器が生産されるようになった。この増幅器を初段に使えば、家庭の小さなパラボラ・アンテナでも衛星放送を受信できることになった。

(4) 金属の箱の内部では電磁波の反射が繰り返されてエネルギーが外部に漏れにくい。しかも特定の周波数でこの現象が強調される。これは空洞共振現象である。20世紀半ばに活躍したマグネトロン発振管には空洞共振器群がたくみに利用され、導波管回路でも空洞共振器が活躍した。金属導体の損失が主体なので共振器の Q は高くなるが、全体の寸法は大きかった。

しかし、集積化したマイクロ波の平面的回路に立体的で大きな空洞共振器は似つかわしくなかった。不連続マイクロストリップ線路で共振回路を作ってみても誘電体損失が大きく、高い Q は得られなかった。

現在得られる誘電体共振器は損失少なく、つまり Q が高く、温度係数の小さい優れた

共振器である。このような共振器を実現するには材料開発に永い時間を必要とした。しかし、極めて小型なのでマイクロ波集積回路に装着するのに適する素子となった。

(5) トランジスタ製作のために高純度の半導体や多層構造体を生産する材料技術が発展した。誘電体共振器を作るために温度係数が小さく損失の極めて小さい材料の製作技術も進歩した。フオトリソグラフィによる微小回路も露出光の波長を短くすることにより益々微小化できるようになった。

(6) 真空管は加熱陰極を必要としたので、回路の雑音温度は本質的に高かった。トランジスタは加熱する必要がなく、別の雑音源があるとしても、格段に雑音温度が低くなった。初段増幅器の雑音指数を低めるためには超伝導冷却も有効であった。したがって真空管時代よりも微小電力の信号を検出できるようになり、受信機が高性能化した。

(7) アナログ信号でなくデジタル信号で情報を送れるように回路が変えられていった。回路は複雑にはなったが、その利点の一つは雑音を除いて信号を取り出すことが容易になったことである。これにより、さらに小さな電力の信号を読むことができた。低雑音の受信機技術とデジタル技術により、宇宙の彼方から人口衛星ロケットが送ってくる僅かな信号を検知できるようになった。

(8) 20世紀半ばには研究室の数値計算が手回しのタイガー計算機により行われた。計算に使う人力は大きく、疲れて計算間違いをするのは避けられなかった。やがて人力をモーターに代えた卓上計算機が現れた。つぎに論理素子としてトランジスタを採用した計算機が世に出た。論理素子を集積化

したLSIの採用により電子計算機が一挙に小さくなった。今日では教育目的に関数電卓があり、実用的な数値計算はワークステーションや大型計算機により行われている。記憶素子も進化して大容量の記憶装置を身近に備えることが可能になった。回路設計に必要な環境はかなり整ったといえる。

(9) 高速化した電子計算機と大容量記憶装置が身近になった現在では、解析に時間をとることや記憶量の多いことは余り気にならなくなった。むしろ複雑な条件と回路構造に対処出来ることが重要となった。この背景により有限要素法や有限差時間領域法がマイクロ波回路解析において活躍するようになった。

3. 電磁界解析と回路解析

電磁界に関するマクスウエル方程式は3次元空間座標と時間を含む4変数偏微分方程式であり、しかも電界、電束、磁界、磁束は空間ベクトル関数である。電磁界に関する問題の解はすべて得られているわけではない。特にアンテナは多種多様な3次元構造の場合が多いから、マクスウエル方程式を単純化せずに解かざるを得ない。一方で、マイクロ波回路の場合はマクスウエル方程式をかなり単純化して適用できる場合が多い。

時間因子として $\exp(j\omega t)$ を仮定すると、電磁界諸量はすべて複素数のフェーザーとして表される。アンテナにしてもマイクロ波回路にしても、複素数の数値計算は避けることができない。

マイクロ波回路では、真直ぐな線路が解析の基本である。複数の平行導体が線路を構成し、その線路断面の形と媒質が均一であれば、マクスウエル方程式は電信方程式

に単純化される。電信方程式から判ることは、線路軸に平行な電磁界成分を持たないTEM波が線路を伝搬することである。この電磁界の場合、線間電圧と線電流の比は線路の特性インピーダンスと呼ばれる。これは構造により決まる量である。TEM波線路の例としてはトリプレート・ストリップ線路がある。

マイクロストリップ線路は不均質の媒質を持つためTEM波ではなくなるが、TEM波に近い電磁界模様なので、準TEM波として近似計算が行われてきた。この近似により線路の特性インピーダンスと線路波長が得られるので、既存のデバイス設計理論も応用できるようになった。特にフィルタ設計に関しては既成理論に加えて分布定数回路向けの新たな設計法も工夫された。

無限長の真直ぐな線路の仮定により3次元の問題が2次元断面の問題と1次元線路の問題に分けられたのであるから、線路の不連続点などを正確に扱うことになれば、3次元のマクスウエル方程式の問題に戻って考えなくてはならない。

2次元断面の解析問題は線路の分布定数の決定問題に帰着する。その基本方程式はラプラス方程式に単純化されることが普通である。残った1次元の問題の一般解は線路上の進行波と反射波の和である。

4．線路上の反射現象

ある特性インピーダンスと線路波長を持つ線路上の波動は進行波と反射波の和が一般解であるが、境界条件として線路端の負荷インピーダンスと特性インピーダンスの比（正規化特性インピーダンス）を与えれば、進行波に対する反射波の大きさの比が導かれる。これが反射係数であり、複素数

で表される。

正規化特性インピーダンスは複素数面の右半平面上の一点として与えられる。このような半無限平面を数値的に取り扱う不便さはスミスチャートの利用により実用的に解消される。受動回路の反射係数は同じく複素数面上にあるが、受動回路の場合はその絶対値が1を超えることはない。1を超えれば増幅回路となるからである。正規化特性インピーダンスを、反射係数との関係式を利用して、反射係数面に等角写像すれば、スミスチャートとなる。

線路の任意点で並列あるいは直列インピーダンスを接続する場合、あるいは任意点における入力インピーダンスを求める場合、回路解析と設計用にスミスチャートが便利である。また図的に、直感的に、回路の機能を理解するのに役立つ図でもある。

5．定在波の波形

マイクロ波周波数では直接的に測れる電圧計も電流計もないので、進行波も反射波も、その大きさを測ることができない。しかし進行波と反射波の合成結果としての定在波は線路上で動かないので、その形に関する情報を得ることができる。線路上にプローブを近づけて電界により生じた電流をダイオードで整流すれば直流に近くなり、通常の電流計で電流、したがって定在波振幅、を読める。

電圧定在波振幅の最大値と最小値の比を電圧定在波比（VSWR）と呼ぶ。反射波の大きさは負荷インピーダンスの大きさによって決まるので、定在波の形から負荷インピーダンスの大きさを複素数として知ることができる。定在波電界の大きさを測定する手段には、ダイオード整流だけでなく電

界による結晶の屈折率変化現象もある。

6. Sパラメータ

ある箱の周りにいくつかの外部線路が接続されているとする。各線路の接続入口はポートと呼ぶ。箱の中の様子は判らないが、線形回路が入っているものとする。この時、あるポートに波が入れば各ポートから波の一部が現れる。各ポート入力に対する各ポート出力振幅の比例定数はS (Scattering) パラメータと呼ばれる。各ポートの入力波と出力波を列ベクトルとしてまとめて表現すれば、両者の比例関係式が書けて、その比例定数がS行列となる。その行列の要素はSパラメータである。

可逆回路で作られた箱については、S行列が対称行列になる。箱の中でエネルギー損失がない場合には、エネルギー保存則によりS行列はユニタリ行列となる。勿論、能動回路ではこのようなS行列の性質はない。

箱の内部の細部を表示しなくてもS行列があれば、入力に対して出力がどう反応するかが判る。S行列の値が周波数によってあまり変わらなければ、設計に便利である。トランジスタの内部等価回路は複雑であるが、増幅素子としての特性を簡単に表示するのにSパラメータの便利さが端的に生かされている。

7. 共役整合

電源の内部抵抗と負荷抵抗の値が等しい時に、電源から負荷へ伝達される電力が最大となる。電源が抵抗に加えてリアクタンスを持つ場合は、電源インピーダンスの共役値と負荷インピーダンス値が等しい時に、電源から負荷へ伝達される電力が最大となる。この原理を共役整合と呼ぶ。フエーザ

ーとSパラメータでマイクロ波回路を設計する場合、この原理は重要である。

8. 空間的構造対称とSパラメータ

線路の構造配置が空間的対称性を持つ場合は、Sパラメータも単純化されて算出が容易になる。例えば、マイクロストリップ線路による方向性結合器やブランチ・ラインなどは2本の対称軸を持つので、4分の1の構造についてだけ解析すれば、構造全体のSパラメータを導出できる。

9. シグナルフロー・グラフ

Sパラメータにより特性を表示できる幾つかの箱をカスケードに接続した場合、最初と最後の箱から現れる出力を知るためにシグナルフロー・グラフが有用である。このシグナルフロー・グラフを描いて活用するためには、進行波及び反射波の流れ方を表示する規則とグラフを単純化する規則を知らなければならない。

10. ナノ技術

フォトリソグラフィによる集積回路がさらに微小化してナノメートル技術に至っても、依然として使用周波数に対応した集中定数型の回路設計と分布定数線路型の回路設計の2通りとなろう。線路により伝送できる周波数帯域幅は、中心周波数に比例するから、極めて広帯域となる。極小化された集積回路を相互に効率よく接続するためには通常の配線は適せず、集積回路をさらに集積化するような形となろう。

このような高周波化はどこまで進むのか。光周波数では多くの半導体が誘電体と化してしまうことが、この限界を示唆している。

(講演時の説明には図式も利用する予定)