

<APMC 2010 基礎講座>

7. 上手に動かすマイクロ波回路の勘所

日本無線(株)
五十嵐一文氏

12月10日(金) 13:00~14:30

上手に動かすマイクロ波回路の勘所

五十嵐 一文

日本無線株式会社

東京都三鷹市下連雀5-1-1

igarashi.kazufumi@jrc.co.jp

あらかし - マイクロ波回路技術に携わる学生や若手技術者を対象として、回路を上手に動かすために必要な知識と考え方をわかりやすく説明する。実際に現場でよく使われる回路を題材に、複雑で難解な式を避けて図表を用いながら、高周波技術の入門段階にある技術者にセンスと想像力の向上を促す。特にグラウンドや電源、配線、部品の影響など設計では見えにくく、試作の際にトラブルとなりやすい要素を重点的にピックアップし、解説する。

キーワード - 分布定数回路、伝送線路、不連続、基板材料、電子部品、フロアプラン、グラウンド、電源、構造

I. はじめに

近年、携帯電話に代表される移動通信サービスの進化と発展は人々の生活を大きく変えた。アナログ方式による通話中心の時代は遙か遠い昔に過ぎ、デジタル方式による膨大なデータを瞬時に届けるシステムが広大な帯域を奪い合っている。無線機器はグローバルで厳しい競争にさらされ、ライフサイクルは短くなり、開発のスピードは増して、あたかも消耗戦と言えるような状況に至っている。その潮流は携帯端末や家庭内機器から、インフラ機器へも広がりつつある。

こうした開発競争のなか、無線技術の最前線に位置するマイクロ波技術はシステムの成長に呼応すべく進化と発展を遂げてきただろうか。言うまでもなく RFIC や MMIC の普及は、機器の小型・低コスト化に大きく寄与している。こうした IC の登場により、高周波・マイクロ波回路開発の負荷が軽減されたのは紛れもない事実である。しかし、機器の開発現場は以前とそれほど変化がないように見える。感度不良やスプリアス、異常発振や局発停止、雑音や環境条件に変動する特性など、相変わらず手戻りの多い作業に追われてはいないだろうか。

本講座の狙いは、マイクロ波技術に携わる学生や若手技術者が、こうした予想外のトラブルや手戻りに見舞われることなく上手に回路を動かせるよう、設計手順やノウハウを整理し、伝えることである。

II. マイクロ波回路の基本要素[1][2]

A. 分布定数回路

マイクロ波回路において、信号を伝送する線路は分布定数回路が基本である。これは動作周波数が非常に

高いため、伝送線路の物理長に対して波長が短くなり、線路全体にわたって電圧・電流分布が均一にならないことによる。こうした伝送線路の性質を理解し、電気的な特性を把握することは上手に回路を動かす上で、重要な一歩となる。

分布定数回路の損失まで考慮した電気回路モデルを図1に示す。回路全体に分布している電気回路の要素を表現するため、微小な区間に区切られた伝送線路は集中定数回路で近似できる。微小な区間とは伝搬する波長に対して十分小さいことを意味し、電気回路的な解析を可能とする。

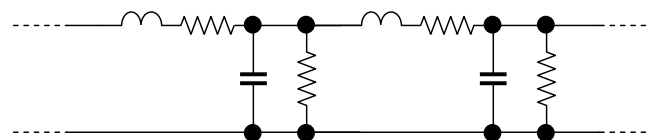


図1 分布定数回路モデル

図1のモデルから、微小な区間で切り取った伝送線路の等価回路を図2に示す。

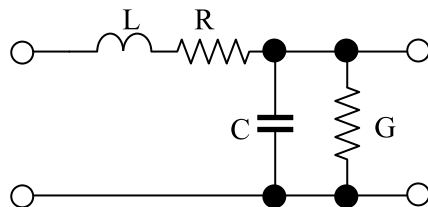


図2 分布定数回路微小区間の等価回路

特性インピーダンスは次のように表される。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

ここで、無損失($R=0$, $G=0$)の場合

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

となり、伝送線路の周波数依存性がなくなる。実際には必ず損失があるので無限の広帯域特性は実現不可能である。

B. 実際の伝送線路

伝送線路の典型的な形態は同軸線路とマイクロストリップ線路である。同軸線路とマイクロストリップ線路は見かけ上、まったく異なる物理構造を持っているが、伝搬モードがよく似ている(TEMと準TEM)点は興味深い。

図3に同軸線路の断面(x-y面)について電磁界の関係を示す。電気力線は実線、磁力線は点線である。マイクロ波の信号は紙面に対して垂直の方向(z方向)に伝搬する。

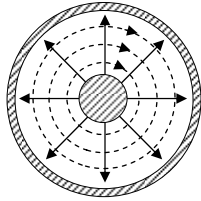


図3 同軸線路

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_{10} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

但し、 a : 内導体径, b : 外導体径, ϵ_r : 比誘電率
 Z_0 : 特性インピーダンス
 λ_0 : 自由空間中の波長, λ : 管内波長

同軸線路の伝搬モードがTEMである場合、電磁界はx-y面内にのみ存在し、z方向の成分はない。また、電界は円周方向に均一であり、導体表面の電流密度も同様となる特長がある。

同軸線路の外導体をz方向に切り開いて平面状にすると図4のマイクロストリップ線路のイメージとなる。

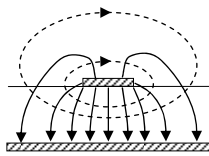


図4 マイクロストリップ線路

$$Z_0 = 30 \ln \left[1 + \frac{4h}{w_0} \left\{ \frac{8h}{w_0} + \sqrt{\left(\frac{8h}{w_0} \right)^2 + \pi^2} \right\} \right] \quad (5)$$

※近似式の一例

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (6)$$

但し、 h : 基板厚, w_0 : 線路厚みゼロの等価線路幅
 ϵ_{re} : 実効比誘電率
 Z_0 : 特性インピーダンス
 λ_0 : 自由空間中の波長, λ : 管内波長

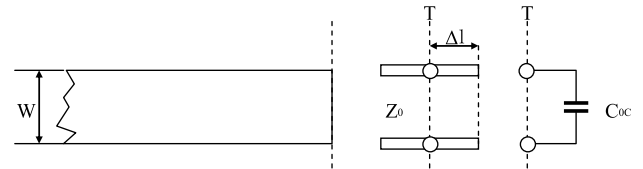
マイクロストリップ線路の伝搬モードはTEMに似ているが、高い周波数においてz方向への電磁界成分を有することから準TEMとして扱われている。また、同軸線路と異なり、線路幅方向に不均一な電流分布を有していて、特に線路端で電流密度が高い分損失が増える傾向にある。

線路を伝搬する信号の波長の短縮率は同軸線路の(4)式とマイクロストリップ線路の(6)式で微妙に異なっている。前者は全ての電気力線が誘電体中にあるが、後者は必ずしもそうならず、電気力線が線路から空気→誘電体→グラウンドで閉じられる場合、比誘電率は等価的に小さくなる。比誘電率と実効比誘電率の違いはこの点に由来している。実効比誘電率は比誘電率と線路幅、基板厚の関係で定まり、それによって特性インピーダンスも異なる値となる。また、実効比誘電率は周波数が高くなると大きくなる性質がある。これは周波数の上昇に伴い、線路直下の誘電体に電界が集中することによる。

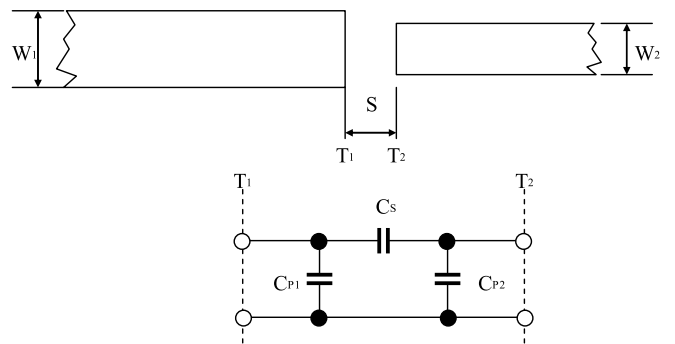
C. 回路不連続の影響

マイクロ波回路は一種の線路だけで回路を構成することはできない。折り曲げや分岐など様々な不連続部が存在し、それが回路特性に影響する。こうした部分を等価回路で表現し、どのような影響があるかイメージできるようにしておくのが大切である。以下に基本的な回路部品の一部とその等価回路を示す[3]。

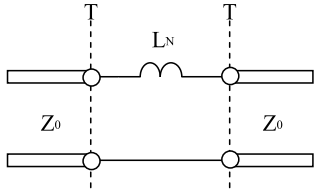
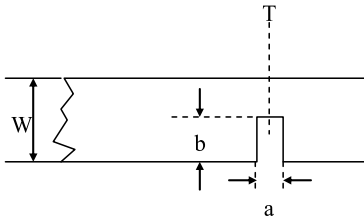
①開放



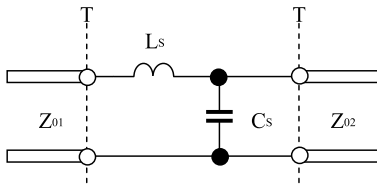
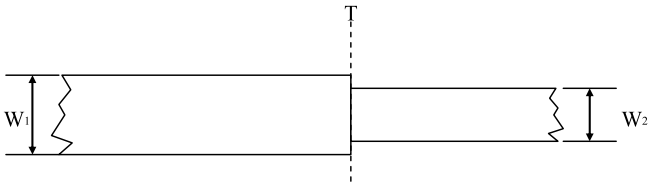
②ギャップ



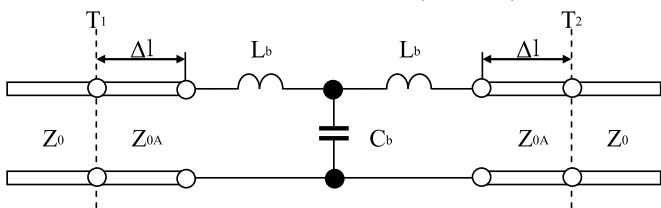
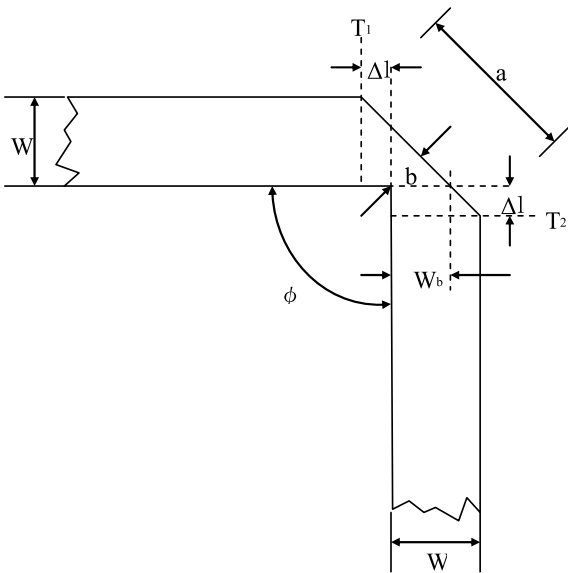
③ ノッチ



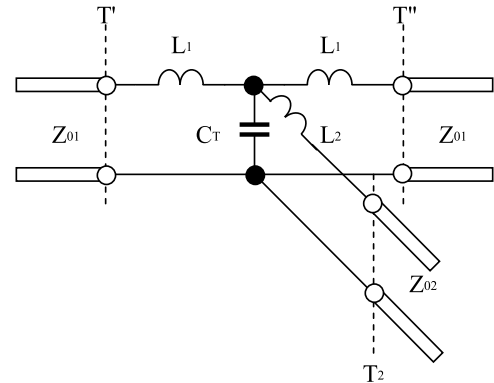
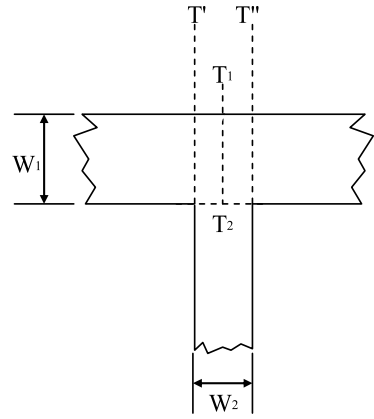
④ ステップ



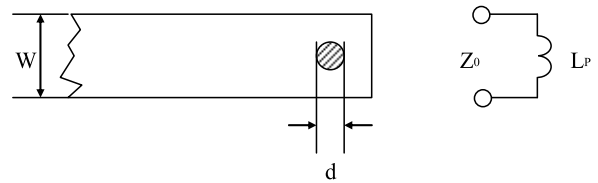
⑤ ベンド



⑥ T分岐



⑦ 接地



マイクロ波回路で用いられる不連続部は他にも様々なバリエーションがある。ようはその部分にどのようなトポロジーでどんなリアクタンス成分がぶら下がるのか、イメージできるのが望ましい。回路シミュレータはその理解を促進する有益なツールである。しかし、過信は禁物である。

III. 高周波基板

マイクロ波回路を設計する場合、分布定数回路を基本とし、線路の素性を把握して不連続を考慮することが大切であると説明してきた。したがって、高周波基板はマイクロ波回路における最重要部品の一つであることが理解できたと思う。

設計者は基板材料と後述する基板構成について積極的に提案して議論し、安易に変更しない姿勢が大切である。よく使われるマイクロストリップ線路では、基

板の比誘電率(ϵ_r)と厚み(h), 線路幅(w_0)は設計の根幹である。もしそれが開発途中で大きく変更されるようなことになると, 大きな手戻りが発生して開発へのインパクトは計り知れない。特に注意しておくべき点である。

A. 材料

高周波基板は装置の用途, 周波数や電力, 環境条件(温度/湿度/振動)など様々な要素に加え, コストを勘案して決定する。

高周波基板の材料を選ぶときに気をつけなければならないパラメータとポイントを表1にまとめておく。

表1 高周波基板材料のパラメータとポイント

パラメータ	ポイント
比誘電率(ϵ_r)	<ul style="list-style-type: none"> ・カタログ値は測定周波数に注意。使用周波数近傍で測定した数値を入力するのが望ましい。 ・比誘電率のばらつきは特性に影響するので, 一定の範囲内に管理されている材料を選びたい。
誘電正接($\tan\delta$)	<ul style="list-style-type: none"> ・損失に関係するのでできるだけ小さいものが望ましい
吸水率	<ul style="list-style-type: none"> ・マイクロ波回路で高Qの回路(共振器など)に影響を与えることがある。できるだけ小さいものが望ましい。
線膨張係数	<ul style="list-style-type: none"> ・基板と他の部材で係数が異なると熱的な繰り返しストレスによる半田クラックや破壊を招くことがある。係数を揃えたり, 差を小さくしたりする。

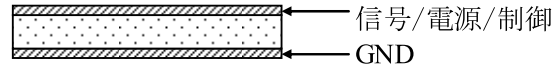
B. 多層化と基板厚

マイクロ波回路は基板材料の性格から, 多層化しにくい傾向があった。PTFE(polytetrafluoroethylene)やセラミックはその代表であろう。さらに, 信号線やグラウンドを内層に配線したくない事情もあって, マイクロ波回路の多層化はデジタル系の回路に比べて遅れ気味に推移してきた。しかし, 小型高密度化の潮流と樹脂材料の進化はそうした障害を取り除き, 今日では多層化の問題はほとんど解消されている。

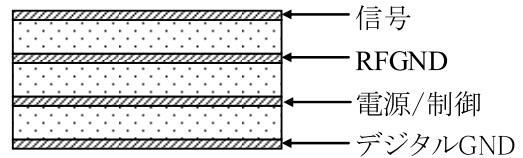
多層高周波基板は信号とグラウンド, 電源をどの層に割り当てるかがポイントとなる。両面基板でマイクロストリップ線路を形成する場合は表面が信号と電源と制御, 裏面がグラウンドとなるが, 多層基板の場合は第1層を信号とすると, グラウンドと電源と制御は他の任意の層に配置できる。その様子を図5に示す。

II章で説明したマイクロストリップ線路の寸法関係を思い出して欲しい。例えば, 動作周波数が高くなると管内波長が短くなって線路幅に近づいてくる。例えば $\lambda/4$ 長が線路幅と同程度まで近づくと, パターンで

作りこんだマイクロ波回路を精度よく機能させるのは難しい。そうならないよう波長に対して線路幅を細くするには, 比誘電率が高い基板材料を用いたり, 信号とグラウンド層を近づけたりするのが有効である。ただし, 内層にグラウンドを設ける場合, 基板外部との接続方法が重大な関心事となることを忘れてはならない。



i) 両面基板の例



ii) 4層基板の例

図5 基板多層化と配線層

IV. 電子部品

分布定数回路に関する話題はここでひとまず置いて, 次は回路に用いる電子部品に目を向ける。マイクロ波回路は受動素子(抵抗, コンデンサ, インダクタなど)と能動素子(トランジスタ, FETなど)を高周波基板に実装して, コネクタにより外部から信号や電源を供給し, 所定の制御を行うことによって所望の出力を得るといった機能を実現しなければならない。ここでは基板に実装する電子部品について, 図面では見えない要素がどのようなものか触れておく。

A. 寄生素子

電子部品は動作周波数が高くなるにつれて, 図面のシンボルで表された挙動とは違った特性を示すようになる。それは部品の構造に由来する寄生素子の影響によるものであり, メーカーのカタログには周波数特性で表現されていることも多い。ここでは電極の導体抵抗や電極間の静電容量といった寄生成分が, 部品の等価回路でどのように表現されるかを理解する。

①受動素子

マイクロ波回路で用いられる代表的な受動部品であるチップ部品の等価回路を図6に示す。

チップコンデンサとチップインダクタには自己共振周波数が存在する。自己共振周波数は等価回路を見てわかるように, コンデンサなら真性のCと寄生のLによる直列共振, インダクタなら真性のLと寄生のCによる並列共振である。この共振点を境に, コンデンサのインピーダンスは容量性から誘導性へと変わり, イ

インダクタのインピーダンスは誘導性から容量性へと変化する。その様子を図7にそれぞれ示す。

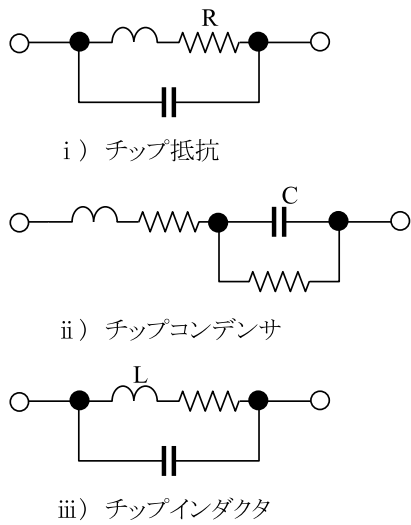


図6 チップ部品の等価回路

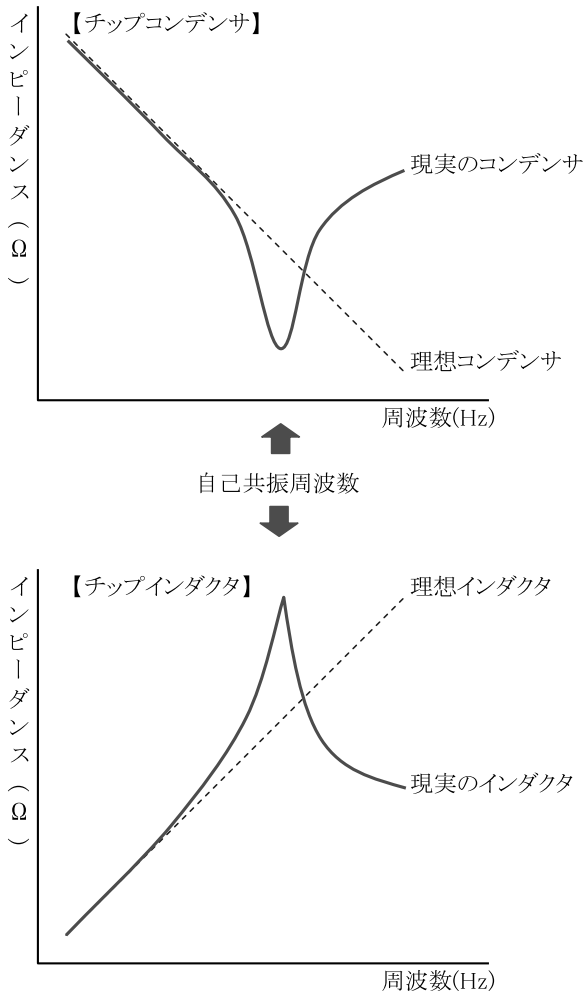


図7 チップ部品の周波数挙動

コンデンサもインダクタも自己共振周波数までの帯域で使用するのが安全である。しかし、アンプや発振器などの回路では、部品の自己共振周波数を超えるところで動作するケースもあり、使用周波数帯域外における特性にも十分に注意を払う必要がある。

②能動素子

トランジスタやFETなどのディスクリート部品による回路は、もっぱらSパラメータによる設計が主流である。素子内部の寄生成分はSパラメータに含まれていて見落とす心配はない。しかし、メーカーから提供されるSパラメータを使って設計すると、ほとんどの場合、計算値と測定値が合わない結果となる。その原因は提供されたSパラメータの取得条件が、実際の使用条件と合っていないからである。

こうしたトラブルを避けるために、詳細設計に着手する前に、能動素子のSパラメータ実測を推奨する。具体的には、実際に使用する高周波基板に素子の実装パターンと必要であれば校正キットを作りこんで組み立て、ネットワークアナライザで測定すればよい。このとき特に注意しなければならない事項を以下にまとめておく。

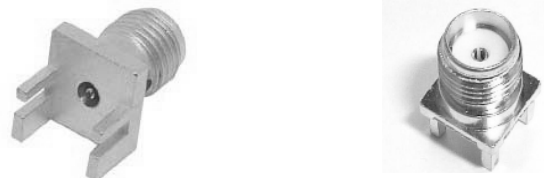
- ①本番に使用する高周波基板を使うこと
- ②基板厚と線路幅は本番と同じにすること
- ③グラウンド周りの条件を本番の条件に合わせる
- ④校正基準面を定められる校正キットを用意すること

なお、受動素子も必要なものについては同様にSパラメータの実測を推奨する。

B. コネクタ

マイクロ波回路と外部の間で信号を入力したり、出力したりする場合、何らかの接続手段を必要とする。そこで登場するのがコネクタである。ここでは電源線や制御線のコネクタに関する説明は割愛し、マイクロ波信号のやりとりに使う高周波コネクタに限定する。

マイクロストリップ線路で構成されている回路に接続するコネクタはII章で説明したように、同軸系が相性としていい。図8に高周波同軸コネクタの例としてマイクロ波帯でよく使われるSMAコネクタを例示する。



平行タイプ

垂直タイプ

図8 基板装着型SMAコネクタの例

いずれも基板に取り付けて半田付けするタイプであるが、内導体の軸が線路に平行のものと垂直のものを紹介する。機能的にはどちらも同じであるが、周波数特性を考慮すると平行タイプのほうが有利である。

基板と同軸コネクタの接続点は、より正確には「マイクロストリップ同軸変換」である。互いに似たような電磁界モードを有しているが、接続点是不連続を有するモード変換を行っている。不連続はⅡ章で説明したマイクロ波回路同様に要注意である。また、コネクタはカタログに記載されている数字を信じてしまいがちであるが、条件によっては目標性能に達しないことがある。それはコネクタそのものの特性ではなく、基板設計の問題によって引き起こされているケースが多いことに注意して欲しい。特にグラウンド周りのパターンニングや実装状態は不連続の危険性をはらんでおり、要注意である。

V. フロアプラン

マイクロ波回路を設計するにあたり、分布定数回路の基本から高周波基板の選び方、電子部品の隠れた素性など、様々な要素について学んできた。ここからは機器全体の視点からマイクロ波回路を見てみよう。スタート点はフロアプランである。フロアプランとは使用する部品のラインナップとインターフェイスから信号の流れを整理し、機器のコンセプトに基づいた敷地面積・形状を議論して、配置と配線経路を決定する重要な作業である。

A. ラインナップ

仕様に定められた性能・機能を実現するための回路や IC の選定を行う。増幅器、混合器、発振器、切換器、減衰器、検波器など、マイクロ波回路も無線機に仕立て上げるには様々な部品を用意しなければならない。ここで大切なことは出来上がる回路の最終形をイメージすることである。そのためには各段のレベルを算出したレベルダイヤを作成しておくといよい。

B. インターフェイス

マイクロ波に限らず、回路には信号の入力と出力、電源の入力、制御のやりとりなど、関係する他の回路ブロックと相互に接続する機械的電氣的なインターフェイスがある。こうしたインターフェイスは設計初期の段階で決定し、後で変更しない意識が重要である。機械的条件では接続部の種類と形状、ピン数など、電氣的条件では入出力レベル、電源の種類と電圧、制御手順とタイミングなどに注意を払うこと。これらは設計が進んだ段階で変更すると、大きな混乱を招いてしまいがちなので、念入りに検討と摺り合わせを行う。

C. 面積と形状、配線

部品のラインナップとインターフェイスが決まったら、大まかに回路全体の面積を見積もる。面積見積には IC や抵抗、インダクタ、コンデンサといった部品だけでなく、配線に必要な面積も忘れずに入れておく。

次に物理的な寸法と入出力、グラウンド、電源の位置と配線を意識しながら部品を仮配置する。一般には信号の経路を短く、まっすぐに接続したい意識が働くので、回路全体が細長くなる傾向にある。基板面積に余裕がある機器はそれほど問題にならないが、携帯端末や家庭内機器の場合は経路を折り曲げたり、配置密度を上げたりする必要に迫られるだろう。こうしたケースでは、回路ブロックや部品相互のアイソレーションが劣化してトラブルになりやすい。そうならないための注意点を以下に示す。

- ①信号の入出力を近づけたり、交差させたりしない
- ②電源線や制御線を信号と交差させない
- ③グラウンドを分離したり、切り欠いたりしない

D. リターンパス

回路に与えたり、回路から取り出したりする信号は一方通行ではなく、必ず戻り道(リターンパス)がある。それは信号のみならず、電源や制御も同様である。高周波信号を通すマイクロストリップ線路のリターンパスはグラウンド層であり、その幅は線路幅に比して数倍に広がっている。リターンパスを軽視すると想定外のトラブルに見舞われることがあるので注意する。

VI. グラウンド (アース)

マイクロ波回路に限ったことではないが、グラウンドの扱い方に回路動作は大きく左右される。グラウンドに関する議論は様々な場面で取り上げられているが、ものづくりに有効に反映されず、トラブルに発展してしまうのは悲しいことである。ここではグラウンドの役割から実際の回路への適用例、トラブル事例などを紹介する。

A. 役割

グラウンドの役割は主として以下の3点である。

- ①電位を決定する際の基準となること
- ②リターンパスの経路となること
- ③放熱板となること

これらの役割を果たすためにグラウンドは、面積を広く、インピーダンスを低く、熱抵抗を低く、作られなければならない。基本は基板サイズいっぱいのベタグラウンドである。

B. グラウンドビア

マイクロ波回路の接地はグラウンドビアを用いるのが一般的である。グラウンドビアはⅡ章で説明したようにインダクタンス成分を持っている。この成分はビア径と基板厚の関数で、ビア径を大きく、基板厚を薄くすると減らすことができる。基板厚は簡単に変更できないので、ビア径を大きくしたり、数を増やしたりして極力減らす努力をすべきである。

C. グラウンドの不連続

マイクロストリップ線路の不連続による影響はⅡ章で説明した。このときのグラウンドは理想的な状態を仮定している。通常では意図的にスリットを入れて分離したり、開口したりしない限り、不連続となることはない。しかし、気付かずに不連続となってしまうのはよくあるケースで、問題が起きて何が悪いのかわからないことも多い。

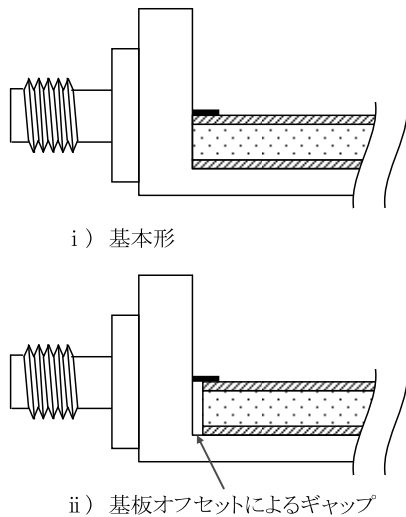


図9 同軸コネクタで問題になる例

図9は両面基板にマイクロストリップ線路を構成して、同軸コネクタを取り付けたケースに装着した例を示す。i)は基板とケースが密着した基本形である。これに対し、ii)は基板がケースからオフセットした状態で装着した例である。この場合、コネクタの中心導体と基板の線路の間にギャップを生じ、コネクタのグラウンドから基板のグラウンドに至る経路に物理的な長さが生まれる。これは電氣的に大きな不連続となる。

プリント板を製作する際に、基板端まで銅箔があると色々面倒なことがあるので、基板端から一定の幅でパターンをオフセットするようにレイアウトルールを設けていることが多い。ところが、マイクロ波回路ではこれが大きな不連続になる。図10は基板端に直接SMAコネクタを半田付けする例であるが、グラウンドだけでなく、信号も不連続になっている。グラウンド

と信号の両方に大きなインダクタンス成分が直列に挿入される格好になって周波数特性に大きく影響する。

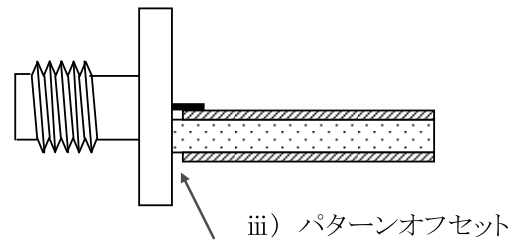


図10 基板製作で問題になる例

この場合、コネクタハウジングと裏面グラウンドを半田付けて回避する手段もある。しかし、熱容量が大きいので加熱の不足による接合不良や、過剰による銅箔剥離など余計なトラブルを引き起こすことも多々あるので注意が必要である。また、こうしたトラブルを防ぐため基板側にグラウンドタブを設けたコネクタもあるので用途に応じて適切に選んで欲しい。

D. 内層グラウンドの扱い

Ⅲ章で多層基板を用いれば内層にグラウンドを配置できると説明した。例えば4層板で第1層に信号を配線した場合、グラウンド層は他の2/3/4層のどこでもかまわない。ただし、マイクロストリップ線路の板厚(h)の許される範囲内に限られる。例えば第2または第3の層にグラウンドを配置するとしよう。このとき、そのグラウンド層と外部はどのように接続したらいいだろうか。

第1または第4の層のように露出していないので、実際には全層を貫通するスルーホールや他の手段によって、内層からアクセス可能な層までグラウンドを引き出す必要がある。引き出されたグラウンドは真のグラウンドに対して直列に入るインダクタンス成分や抵抗成分が存在することに注意する。

E. 1点アース

1点アースは、グラウンドの抵抗により回路の各グラウンド間に電位差が生じるのを防ぐ目的で用いられるテクニックである。図11に簡単なモデルを示す。いずれの回路もグラウンドを基準に動作し、それぞれの回路に流れる電流(I_a, I_b, I_c)による電位変動が他の回路に干渉しない。事実、直流や低周波回路では鉄則と言われるほど有効である。しかし、マイクロ波回路ではどうだろうか。回路のグラウンド線が長くなるというだけでも特性劣化が心配にならないだろうか。

マイクロ波回路の場合、接地はグラウンドビアを使って素子や端子の直下でとる方法がベストである。

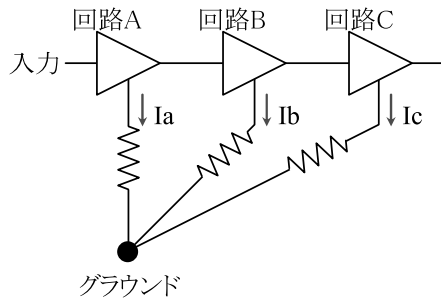


図 11 1点アース

F. 共通インピーダンス

共通インピーダンスは1点アースとペアで登場する話題で、トラブルの一因として悪者扱いされている。図12に簡単なモデルを示す。このケースではR1とR2が共通インピーダンスとなり、回路Aと回路Bが影響を受ける。

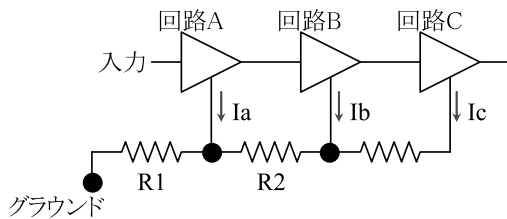


図 12 グラウンドの共通インピーダンス

しかし、マイクロ波回路ではどうだろうか。先に回路の接地は素子や端子の直下でとるのがベストであるとした以上、共通インピーダンスを容認しているように思われるかもしれない。

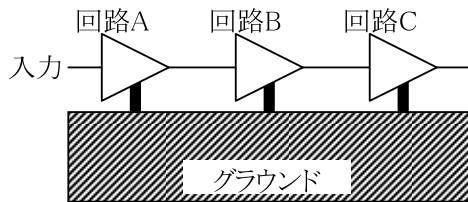


図 13 グラウンドの共通インピーダンス

図13はマイクロ波回路のグラウンドをイメージしたが、グラウンドの共通インピーダンスを低くすれば実害は発生しない。回路にとってもグラウンドとの良好な関係が確保され、設計どおりの動作を期待できる。

G. グラウンドの分離と接続

4層以上の多層基板で、内層に配置したグラウンドを意図的に分離して、アナログとデジタルでアイソレーションを確保するケースがある。層内で分離するだけでなく、層まで分けるパターンも見かける。これはデジタル系の高速で大振幅のクロック成分などが、ア

ナログ系に混入しないように配慮した結果である。では、分離したグラウンドはどこでどのように接続したらいいだろう？アナログもデジタルも基準となる電位は同一なので、どこかで接続しなければならない。1点アースか、ベタグラウンドか、層分離なら層間ビアをびっしり打って接続するか、いずれも一長一短がある。この問題は回路によって様々な解決方法があり、どれが正解と言い切れないのが現実である[4]。

VII. 電源

A. 電源線

回路に電圧を与え、電流を供給する配線が電源線である。グラウンドを伝って戻ってくる電流のことを考えるとグラウンドと同じだけの能力があるのが望ましいが、通常はそのように優遇されることはない。したがって、電源線にまつわるトラブルも多い。

電源線は回路に供給する電流を基本に配線幅が決められることが多い。直流回路だと配線幅が1mmで銅箔厚が35μmなら電流の上限は1Aが目安である。これにしたがって配線幅を決めると、たいがいはかなり細い電源線になることだろう。細い線は言うまでもなくインピーダンスが高いのである。であれば様々な信号や雑音を拾ってしまう危険性も高いので、伝送線路同様に慎重に扱うべきである。さらに電源線は回路から見たときに共通インピーダンスになることが多い。グラウンドと違ってインピーダンスが高い電源線は回路間の干渉を避ける工夫が必要になる。

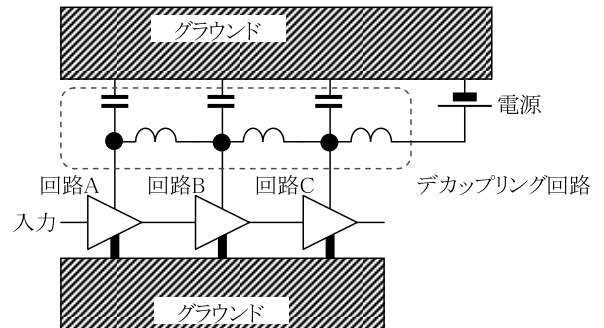


図 14 マイクロ波回路の電源配線

図14は電源配線のモデルである。これまで使ってきた図に電源とデカップリング回路を追加している。

電源はマイクロ波回路の出力側から電流を供給する。これは通常出力側の回路は入力側に比べて扱う電力が大きく、電流も大きいことから、より電源に近いところに直流のリターンパスを作るとグラウンド電位変動の低減に有利だからである。

図14には明記しなかったが電源線は細いストリップ状になることが多い。不要な信号を伝送しないように

動作周波数の $\lambda/4$ 間隔でバイパスコンデンサを配置するようにしたい。さらに、回路シミュレータで電源配線を入力して回路と一緒に計算しておくことと安心である。

B. デカップリング回路

デカップリング回路はマイクロ波回路間の結合を疎として、アイソレーションの劣化を防ぐ回路である。図14において、入力された信号は回路A→回路B→回路Cで順に増幅されると仮定する。このとき回路Bで増幅された信号の一部は電源端子にリークする。リークした信号は電源線を伝って回路Aに戻っていく。同様に回路Cで増幅した信号の一部も電源線を伝って、回路Aに戻っていく。デカップリング回路はこうしたリーク成分が前段に戻ることで引き起こされる、異常発振などのトラブルを未然に防ぐ役目を果たしている。なお、図14のコンデンサは回路の直近に配置し、端子の直下でグラウンドに接続する。また、インダクタは電源電圧に余裕があれば抵抗でもかまわない。

C. バイパスコンデンサ

バイパスコンデンサの役割は主として以下の3点である。[4][5]

- ①回路動作にとって必要な信号を損失最小限、かつ、最短ループで回るようにバイパスする
- ②雑音など動作に不要な信号を、回路に至る前でバイパスしてグラウンドに逃がす
- ③回路電流の変動をコンデンサに蓄積した電荷で補償し、電源線に波及する雑音を低減する

- ①はエミッタ接地やソース接地の回路で高周波信号を接地する。エミッタやソースに接続されているバイパス抵抗をバイパスする部分が好例である。
- ②はデカップリング回路や電源出力の直近、電源線の中途に取り付けられているコンデンサである。接続されている位置によって、それぞれバイパスする信号に違いがあることに関心を持つこと。
- ③はもっぱらデジタルICのVcc/Vdd端子の直近に配置されるコンデンサである。これは端子の直近に配置しないと有効に機能しない。Vcc/Vdd端子側はよくても内層に入れたグラウンドが遠ければ同様に利きが悪くなるので注意すること。

VIII. 構造

マイクロ波回路は基板と配線、部品に加えて構造も回路の一部であると言われることがある。それは配線の引き回しや部品実装に伴って生まれる不連続部からの輻射が、筐体内で特性に影響するからである。「蓋をしなければ全く問題ないのに」とか「ケースのココを指で押さえると調子がいいのに」とか、形になった

段階におけるトラブルは担当者を大いに悩ませる。解決策を模索するあまり、大事な回路を壊してしまうことも珍しくない。ここではそうした問題を解決する糸口を紹介する。

A. 不連続部からの輻射

II章で説明した回路の不連続部はどれも信号を空間に輻射する性質を有している[6]。これらの輻射は線路幅(W)と基板厚(h)、動作周波数に依存する。線路幅と基板厚が小さいほど、また、動作周波数が低いほど輻射は小さい。同様にIV章で説明したマイクロストリップ同軸変換も不連続部から輻射する性質がある[6]。

こうした不連続部からの輻射は回路が開放状態にある場合はさほど問題にならない。輻射電力は微弱なので損失も微弱であり、輻射した電力が悪さをする心配も無用である。しかし、回路が狭い空間内に閉じ込められている場合は別である。輻射した電力は行き場を失って空間内で定在波となり、回路のあちこちにカップリングし、特性を乱すからである。

B. シールドケース

マイクロ波回路は一般的にシールドケースの中に収められる。このときシールドケースの幅が動作周波数に対して大きい(カットオフ周波数より動作周波数が高い)と内部の空間を伝搬する電磁界モードが存在し、不連続部からの輻射で回路や入出力端子間のアイソレーションが劣化する。

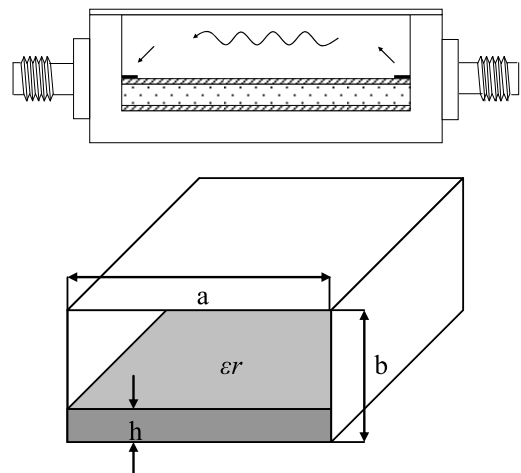


図15 金属ケース内の伝搬

図15はそうしたモデルの一例である。ここではコネクタの不連続による輻射と定在波の発生、カップリングのイメージを示している。このとき、ケース内部は動作周波数において一種の伝搬路となっている。これはケースが導波管とよく似た構造となり、カットオフ周波数以上で動作する回路を中に収めると、内部の不連続によって輻射したエネルギーが内部を伝搬する。今、伝搬方向に垂直の断面での寸法を、幅 a 、高さ b 、基

板厚を h 、比誘電率を ϵ_r とする。このときの伝搬モードは LSM と LSE と呼ばれるハイブリッドモードである[7]。このようなモードによる不要伝搬を避けるには図 14 のような誘電体装荷導波管のカットオフ周波数を動作周波数以上まで上げるのが手っ取り早い。幅 a と高さ b を小さくすればカットオフ周波数は上昇する。なお、動作周波数が高くなればなるほど、この手法はうまくいかないことも言い添えておく。

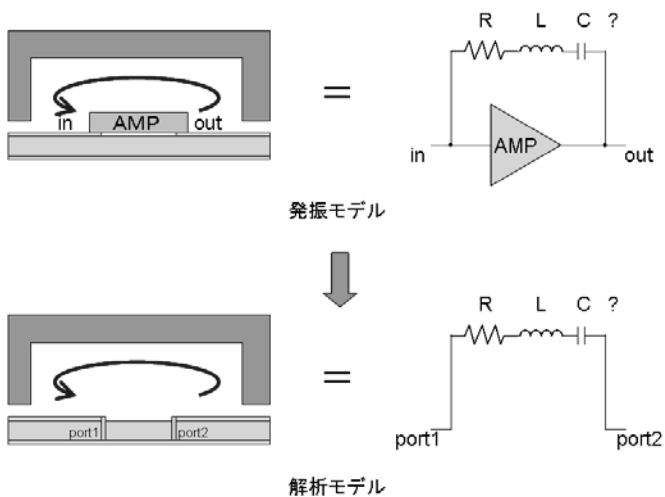


図 16 増幅器発振のケース

図 16 は閉じた空間内に輻射したエネルギーが伝搬して、特定の周波数で発振条件を満たすケースである。利得 25dB のアンプを実装した例で、調整を終えて蓋をしたら発振したので電波吸収体で対策していた。電磁界シミュレーションにより、入出力アイソレーションが 10dB 程度しか得られない構造であることが判明したので、ケース寸法を狭め、共振周波数を動作周波数以上に追いやって問題を解決した。もちろん電波吸収体も不要となった。

C. シールドキャップ

ここまではマイクロ波回路が金属ケースのような電気壁に囲まれた空間に収められる場合の注意点について説明してきた。次はマイクロ波回路の上から金属キャップを被せてシールドする構造について説明する。そこで注意しなければならないのは主に以下の 4 点である。

- ①部品面グラウンドパターンの接地状態
- ②隣接ブロック間とのアイソレーション
- ③キャップとグラウンドの間のできるスリット
- ④電源/制御線の配線

シールドキャップを被せるにしても部品面のグラウンドがきちんと接地できていないと意味がない。接地にはグラウンドビアを使うが、どのようなビアをどのよ

うに配置したらよいだろうか。一般的にグラウンドビアの径は $0.3\text{mm}\phi \sim 1\text{mm}\phi$ がよく使われる。これは基板厚との関係で、穴径対基板厚の比（アスペクト比）を 1 より大きくしてインダクタンスを減らすためである。次にグラウンドビアの間隔であるが、動作周波数の $\lambda/10$ 以下が望ましい[7]。

隣接ブロックとの間でアイソレーションを確保したい場合、物理的な隔離をとるのが最良であるが、一般的には困難である。グラウンドビアをブロック間に配置してアイソレーションをとることを考える。部品面パターンとグラウンドが対向すると、平行平板モードの伝搬がアイソレーションを劣化させる。それを抑圧するにはグラウンドビアを 2 列配置するのがよい[8]。

シールドキャップを部品面グラウンドパターンに装着する方法は、半田付けが簡便で有効であるが、装着後の調整ができなくなる難点もある。それを嫌ってネジ止めのケースを被せることもあるが、注意深く設計して精度よく製作し、慎重に取り付ける必要がある。それを怠るとキャップとグラウンドの間にスリットができて、不要輻射の原因となりやすいので注意する。

キャップでシールドされている空間は電氣的に閉じている。そこに電源線や制御線を安易に通すと、線を伝って信号が漏洩してしまうことがある。シールド壁を貫通する箇所はこうした漏洩を避ける配慮と工夫が必要である。

IX. むすび

以上、マイクロ波回路技術に携わる学生や若手技術者を対象として、順に必要な知識と考え方を具体的な事例を添えてわかりやすく説明した。実際の現場ではさらに多種多様なトラブルが待ち受けているだろう。しかし、基本的な考え方に忠実であれば、回路を上手に動かすのはそれほど難しくないのである。本講座がこれからの時代を開拓する次代のエンジニアにとって課題克服と問題解決の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] Brian C. WAdell, *Transmission Line Design Handbook*, Artech House, Norwood, MA, 1991
- [2] 川崎繁男, 中谷彰文, 「マイクロ波平面回路の CAD 設計 I - 受動回路」, リアライズ社, 1996 年
- [3] 小西良弘, 「実用マイクロ波技術講座—理論と実際—第 2 巻」, ケイラボ出版, 2001 年
- [4] 伊藤健一, 「アースと熱」, 日刊工業新聞社, 1973 年
- [5] 伊藤健一, 「アースとパソコン」, 日刊工業新聞社, 1978 年
- [6] 小西良弘, 「実用マイクロ波技術講座—理論と実際—第 1 巻」, ケイラボ出版, 2001 年
- [7] 上野伴希, 「無線機 RF 回路実用設計ガイド」, 総合電子出版社, 2004 年
- [8] Eric Holzman, *Essentials of RF and Microwave Grounding*, Artech House, Norwood, MA, 1991