

Directional Coupler
方向性結合器 製作記
武安義幸 / JA6XKQ

まずは製作日記編を読んでいただき、既製品の方向性結合器を買ったほうが自分にとって「早い、安い、うまい」なのかどうかを判断されてから自作に取り掛かってください。

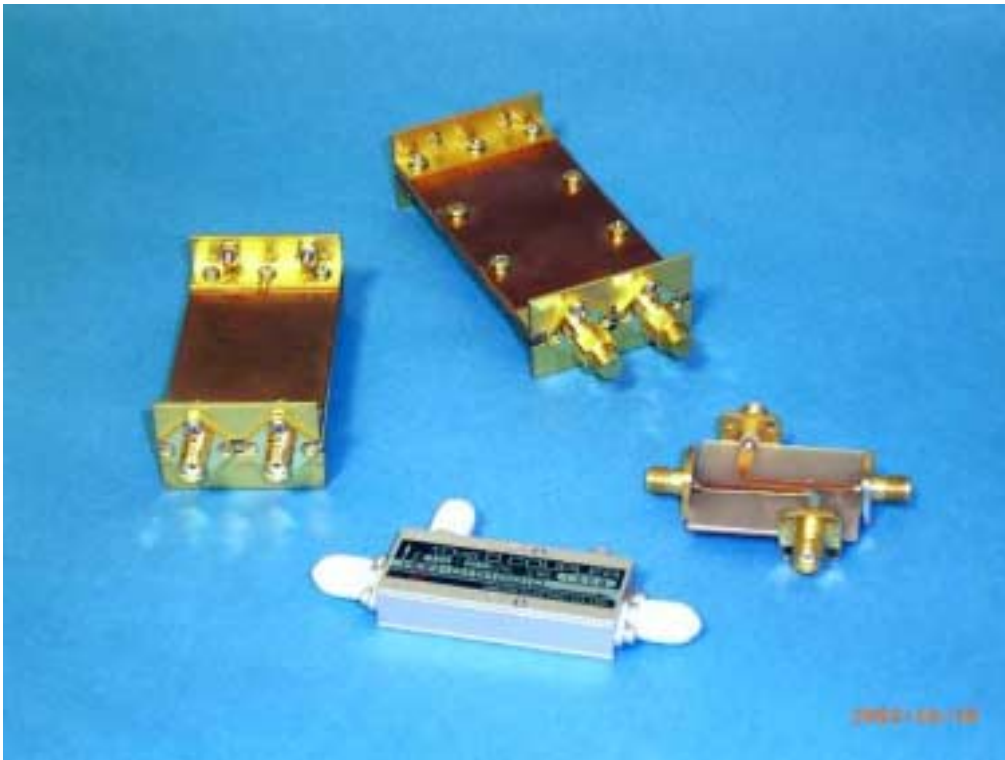


写真-1 : 自作三種(左:ガラエポ/トリプレート、中央:テフロン/トリプレート、右:ガラエポ/マイクロストリップ)と既成品(手前)

製作日記編

2002年8月13日

Tさん、
こんにちは。

懸案だった傘ボラを7月に完成させたのですが、フィードのマッチング調整をやろうとカップラの自作に手を出したのが運の尽き、、、 どうも上手くいかず(方向性がとれない)、7月中旬から悩んでいました。しかし、この夏休みに問題点をクリアできました。

途中から疑ったのは材料のプリント板の比誘電率。1.6mmと0.4mm厚のプリント板を各々2枚重ねて4ミリ厚のストリップラインを構成。ガラエポなので、比誘電率は4.3から4.7位だろうと決め込んでいたのですが、測定してみると何と5.7と6.1という値が!! 比誘電率が判明しているテフロン基板を測定すると、カタログ値が出てくるので測定自体は正しい様子。比誘電率を5.7で再設計するとそれまで6dB程度だった方向性が約18dBまで改善しました。結合度は1dBから2dB程度の誤差を許容すれば、比誘電率に対する感度は4.7も5.7も大差は無い。これは、片面のマイクロストリップでの予備実験。オープンなマイクロストリップだと周囲の影響を受けるので、本命はトリプレートのストリップライン。こちらは、これから再度製作する予定です。

途中、信号源として使っているクリスタルOSC(PCのクロック用)の周波数安定度に悩んだり、代替用としてノイズソースを作ったり、、、 (広帯域の)ノイズソースだと、例のドレークのダウンコ

ンバータのイメージ・リジェクションが悪いせいか、測定値が??な値を示したり、、、等と小物の割には(小物故に?)基本の所で悩み=楽しみました。

それでは、また。

武安

2002年8月15日

Tさん、

こんにちは。方向性結合器の続編、、、

>これは、片面のマイクロストリップでの予備実験。オープンなマイクロストリップだと周囲の影響を受けるので、本命はトリプレートのストリップライン。こちらは、これから再度製作する予定です。

トリプレートのストリップラインで作っていたものは、結合部を3連とした比帯域3倍(1GHzから3GHz)、結合度10dBのもの。まじめにエッチングするのが面倒なので、昨晚はカッターナイフで刻んだ先週の失敗作を、同様にカッターナイフでトリミングしてみました。

結果はGood。誘電率を低めに見積もっていたのでパターンを狭く削る方向で作業できたのが幸い。結合部を設計値に修正して、調整は専ら結合部からコネクタへのラインの幅で。調整のターゲットは方向性です。

まず、先日うまくいったもう一つのカップラでポートのリターンロスをチェック。これが悪いと方向性も悪い。パターンの幅を狭くし

て、大雑把にリターンロスを良くして、最後に方向性を確認。結果は、失敗作では3dB程度、修正直後は6dB程度だった方向性がおよそ20dBに改善できました。シミュレーションでどこをいじると特性がどうなるかを掴んでおいたのが功を奏しました。

2400MHzと2500MHzしかチェックしていませんが、20dBあるいはそれ以上はとれている模様。この類は、一声20dBをひとつの通過目安としています。物作りの環境/ダイナミックレンジが20dB程度であること一因です。この環境/ダイナミックレンジを広げることも思案中です。

誘電率のはっきりしないガラエポを、しかも2種類/4枚を重ねて使う限り、設計どおり無調整で、とはいかない。つぎは、誘電率の判明しているテフロン基板を2枚重ねで、工作性(ガラエポみたいに削れない)と精度の観点からエッチングでやろうかと思案中です。UV硬化のレジスト・スプレーは入手済み。

う～ん、Yahooで中古を見つけたほうが早かったかも、、、 商売で売っている中古品は高いですね。手がでません、足がでます。なんだかんだの投資額と時間は自作も同等額かかっているかも、、、

それでは、また。

武安

2002年8月16日

Tさん、

こんにちは。さらに続編、、、

>ガラエポなので、比誘電率は4.3から4.7位だろうと決め込んで
>いたのですが、測定してみると何と5.7と6.1という値が！！

どうしてこういう数値が出てくるのかと、ガラスエポキシのプリント板について資料調査をしてみました。

ガラスエポキシ=ガラス+エポキシ

前者の誘電率が約6、後者のそれが約3。それらを(基板の加工性、機械強度、熱強度、等々を考慮して)混合すると約4.3くらい。

とすると、私が使ったものはエポキシよりもガラスが多いものと推定されます。思い出してみると、プリント板の銅薄表面にガラス繊維の織り目模様が結構見えるなあ、と。

この板(1.6mm厚)はJAS-1の基礎実験をやっていた頃だから1984年頃に、秋月で購入したジャンク品です。0.4ミリ厚は昨年、同様に秋月で購入のジャンク品。上記の点から判断すると、1.6mm厚のほうは不良品としてハネられた物ではないでしょうか、、、? 0.4ミリ厚も不良品の可能性はありますが、その薄さを考慮すると強度の観点からエポキシ樹脂よりもガラス繊維を多くするという点に合理性を考えることもできます。

いずれにしても結論は、ストリップラインをやるには基材の素性を明らかにしてから、という教訓を得ました。

武安

2002年8月20日

Tさん、

こんにちは。続報の続き、、、

>この板(1.6mm厚)はJAS-1の基礎実験をやっていた頃だから
>1984年頃に、秋月で購入したジャンク品です。0.4ミリ厚は昨
>年、同様に秋月で購入のジャンク品。上記の点から判断する
>と、1.6mm厚のほうは不良品としてハネられた物ではないで
>しょうか、、、? 0.4ミリ厚も不良品の可能性はありますが、そ
>の薄さを考慮すると強度の観点からエポキシ樹脂よりもガラス
>繊維を多くするという点に合理性を考えることもできます。

私はスカではなくアタリを引いたのかも、、、 誘電率6のガラエポは商品として存在するとのことを職場の同僚から聞きました。私の板は日立何とかというメーカーなのですが、まさにそこが出しているとのこと。松下何とかも出しているらしい、、、

誘電率6の目的ですが、ストリップラインのサイズを短くできる。誘電率のルートで効くので、 $(4.5/6)^{0.5}=0.86$ 14%短くできます。また、ガラスが多いので低損失。って、最初から判っていれば嬉しかったのですが。:-)

薄い基板も、強度と基板の小型化をねらったものというのが正解のようです。

先週末はテフロン基板をフォトエッチングしていました。エッチング液の温度管理がまずく、0.2mmの隙間が上手くできず。昨晩は、コネクタ周辺の取付け金具の加工(やすり掛け)。今晚は、穴あけの予定。

一発で所望の特性がでると嬉しいなあ、、、

武安

2002年8月20日

Tさん、
こんにちは。続報の続きの訂正、、、

>誘電率6の目的ですが、ストリップラインのサイズを短くできる。
>誘電率のルートで効くので、 $(4.5/6)^{0.5}=0.86$ 14%短くできま
>す。また、ガラスが多いので低損失。って、最初から判ってい
>れば嬉しかったのですが。:-)

低損失というのは間違いかもしれない、、、 調査中。

武安

2002年8月20日

Tさん、
こんにちは。続報の続きの訂正の取り消し、、、 かな？

>続報の続きの訂正、、、
>
>誘電率6の目的ですが、ストリップラインのサイズを短くできる。
>誘電率のルートで効くので、 $(4.5/6)^{0.5}=0.86$ 14%短くできま
>す。また、ガラスが多いので低損失。って、最初から判ってい
>れば嬉しかったのですが。:-)
>

> 低損失というのは間違いかもしれない、、、 調査中。

日立化成のサイトで調べていたのですが、そのものずばり誘電率6(近辺)というのは見つからず。かわりに(ガラエポ系で)誘電率10というものが、、、

その特性グラフを見て、グラフの比較ラインをとり間違えていた。誘電率10のものが普通のいわゆるガラエポよりも低損失。これを逆だと間違えたのでさっきの訂正の「間違いかもしれない」というコメントでした。どうも納得いかないので、「かもしれない」と伏線を入れました。

定性的に言って、ガラスのほうがエポキシよりも低損失なはず、、、したが、「続報の続き」のコメントは正しいと思います。

武安

2002年8月22日

Tさん、
こんにちは。続報の続きのアップデート、、、

>先週末はテフロン基板をフォトエッチングしていました。エッチ
>ング液の温度管理がまずく、0.2mmの隙間が上手くできず。昨
>晩は、コネクタ周辺の取付け金具の加工(やすり掛け)。今晚
>は、穴あけの予定。
>一発で所望の特性がでると嬉しいなあ、、、

組上げて特性を見てみると、所望の特性とはいかず、、、 やは

り、結合度は良いのですが、方向性が悪いものとなりました。

予想通り、コネクタ部の整合が悪くなっています。ガラエポの時には、厚みをSMAコネクタの同軸内径と(できるだけ)一致するように約4ミリとしたのですが、今回はテフロン基板2枚分の約3.2ミリしかなく、必然的に不整合が生じてしまいます。

その不整合もパターンを狭くする調整だろうと考えて、(補正を事前に設計できないので)単純な設計値で物を作っておきました。

コネクタの中心ピンを半田付けするパターンをピンの直径まで細くして、さらに、結合部とのトランジションのパターンに少しテーパを掛けることで、約18から20dB程度(改善前は約6dB)の方向性を得ることができました。

広帯域な特性を見ながら、もう少しじってみようと思います。

コネクタ部の不整合を定量的に設計に盛り込めると、言うこと無しですが、、、再現性の高いものが出来たらお披露目します。

武安

製作準備編

学んだことは、方向性結合器に限らずストリップラインを作るには、材料の誘電率を正確に知ること。素性のはっきりしたもの、

要はデータ付きの材料(プリント基板)が入手できるようなら次に述べる手順は不要です。

誘電率の測定

プリント基板のキャパシタンスを測って、比誘電率を求めます。(手っ取り早い方法として、、、JISで測定法が規定されていますし、誘電率測定だけで論文が書けます)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

C	:	キャパシタンス (F)
ϵ_0	:	真空中の誘電率 (8.854×10^{-12} F/m)
ϵ_r	:	比誘電率
S	:	電極の面積 (m ²)
d	:	電極間隔 (m)

さて、キャパシタンスを何で測るか？ 私はテスター付属の機能を使用しました。誘電率には周波数依存性があるので、正確には、目的の周波数で測定すべきですが、「無いものねだり」なので諦めます。とは言うものの、周波数依存性がどれほどのものであるのかは、アタリをつけておきましょう。ストリップラインの寸法パラメータを計算するときに、誘電率に対する寸法の変化率を確かめます。例えば、FR-4というガラスエポキシの多層材料は、

1MHz : 4.7~4.8

1GHz : 4.2~4.3

などという値が材料メーカーの技術資料に掲載されています。
製作日記編に書いたように、データ付きのテフロン基板をこの
手法で測定してみると、データとほぼ同等の値が得られたので
良しとしています。

設計

方向性結合器を構成するストリップラインを設計します。理論や
数式をすっ飛ばして、便利な道具や人様の努力/成果を有難く
使わせて頂くことにします。つまり、フリーのCADやオンライン・
カリキュレータを利用します。

私はCADとして、Ansoft社の Ensemble と Serenade を使用して
います。詳しくはインターネットで検索してみてください。オンライ
ン・カリキュレータのお勧めは、

Bilkent大学(トルコ)電気・電子工学科

<http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/programs/magnetic/dcoupler/dcoupler.htm>

I-Laboratory

<http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool.htm>

これらのサイトを利用することで、以下に述べる習作を作ること
ができます。

習作

0.2mmギャップのストリップラインを作るのにUV硬化レジストを
使ってエッチングしたり、トリプレート製のストリップラインで多段結
合の広帯域方向性結合器に最初から取り掛かるのは大変です
から、基板がオープンなマイクロストリップラインでシングル結合
のものを、エッチングを使用せずに作ってみましょう。

設計仕様の例は次のとおりです。

段数	:	一段
Z_0	:	50 Ω

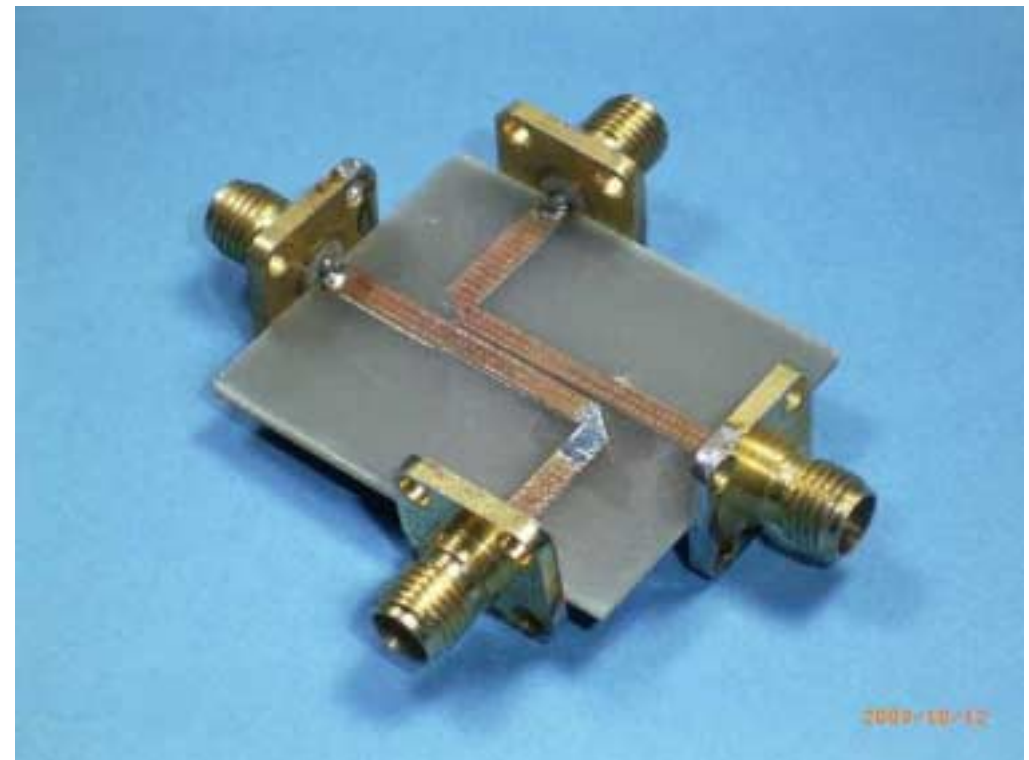


写真-2 : 習作

結合度 : 10 dB
 基板の比誘電率 : 4.3 ... 単なる例
 中心周波数 : 2400 MHz

基板の比誘電率は先に述べた方法、あるいは基板添付のデータを使用します。結合度と周波数はお好みで、...、ただし、結合度については極端に密な、例えば3dBとか、極端に疎な、例えば40dBなどという値は現実的ではありません。10 dBから20 dBが作り易く、また使い易いと思います。ちなみに、結合度40 dBと

といえば、方向性結合器自体のシールドをしっかりとしないと空間結合、いわゆる飛込みの影響で何を測っているのか判らなくなることでしょう。この習作はシールドのないマイクロストリップラインですから、推して知るべし、...

図-1に示すオンライン・カリキュレータで仕様例を計算すると次のような設計パラメータが計算されます。(奇数モードと偶数モードのインピーダンスも計算されますが、興味あるかたはオンライン・カリキュレータの理論編を読まれてください)

w/h : 1.632
 s/h : 0.124
 length : 1.44 cm

w/h と s/h は基板の厚み(h)に対する比で示されています。w は結合ラインの幅、s は結合ライン間のスペース、length は結合部の長さです。基板の厚みが1.6 mm であれば、

$$w = 1.6 \times 1.632 = 2.61 \text{ mm}$$

$$s = 1.6 \times 0.124 = 0.198 \text{ mm}$$

となります。さて、この寸法ですが、どこまで正確に工作しないといけないのでしょうか？ 2.6 mm と 0.2 mm ならばできそうです。この丸めた数値で特性を逆算してみましょう。オンライン・カリキュレータのメインメニューには設計(Design)と解析(Analysis)がありますので、後者の解析を使って確認することができます。

結果として、結合度が 9.94 dB、中心周波数が 2389.75 MHz な

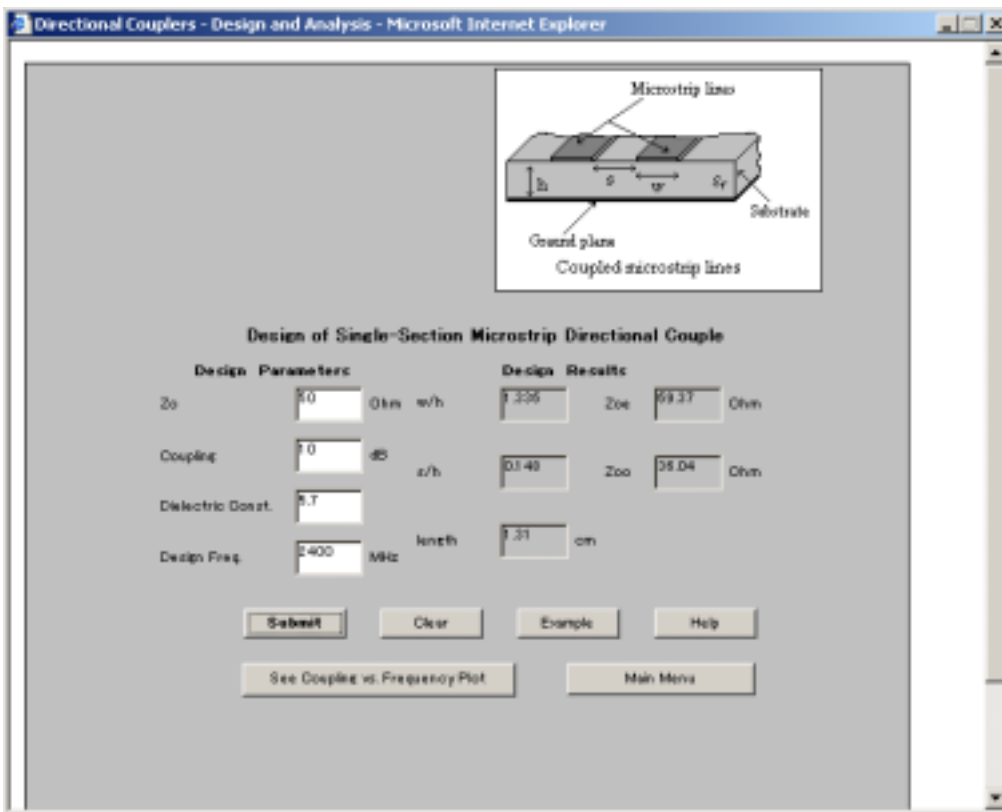


図-1 : Bilkent大学のオンライン・カリキュレータ

る値が出てきました。十分に許容値だと思いますし、違いが判る測定系をそもそも持っていません、..

次に設計すべきは、結合部からコネクタまでのラインです。このラインの特性インピーダンスは 50Ω 、長さは任意です。この設計には、I-Laboratory のオンライン・カリキュレータを使用します。

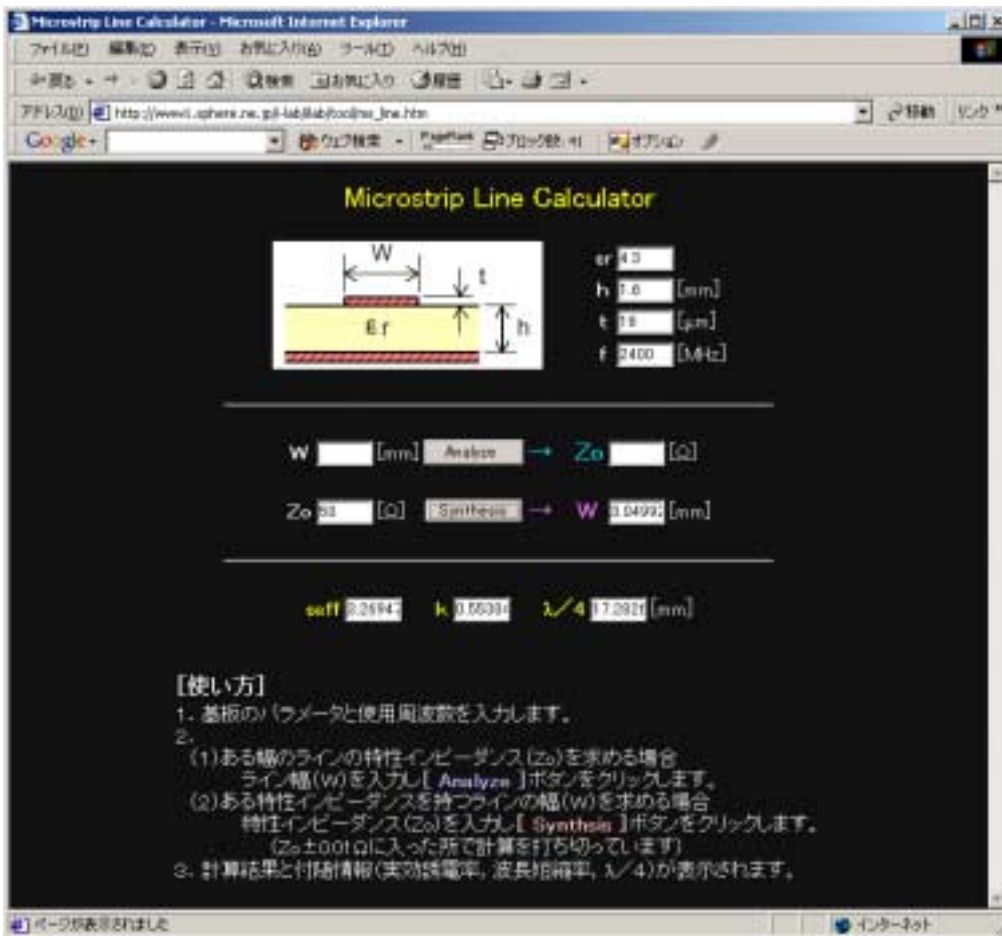


図-2 : I-Laboratoryのオンライン・カリキュレータ

(C) 2003, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

先ほどと同様に、基板の比誘電率、基板の厚み、銅箔の厚み、中心周波数を入力し、所望の特性インピーダンスを与えると、マイクロストリップラインの幅を計算してくれます。

比誘電率を4.3、基板の厚みを1.6 mm、銅箔厚みを16 μm 、中心周波数を2400 MHzとすると、 50Ω のライン幅は3.049 mmと計算されました。

以上の計算結果をプリント板に配置する訳ですが、コネクタとラインの配置を“コの字形”(\llcorner の形)にはしないほうが特性がよくなります。これは、曲がりの部分でインピーダンス劣化を生じ、

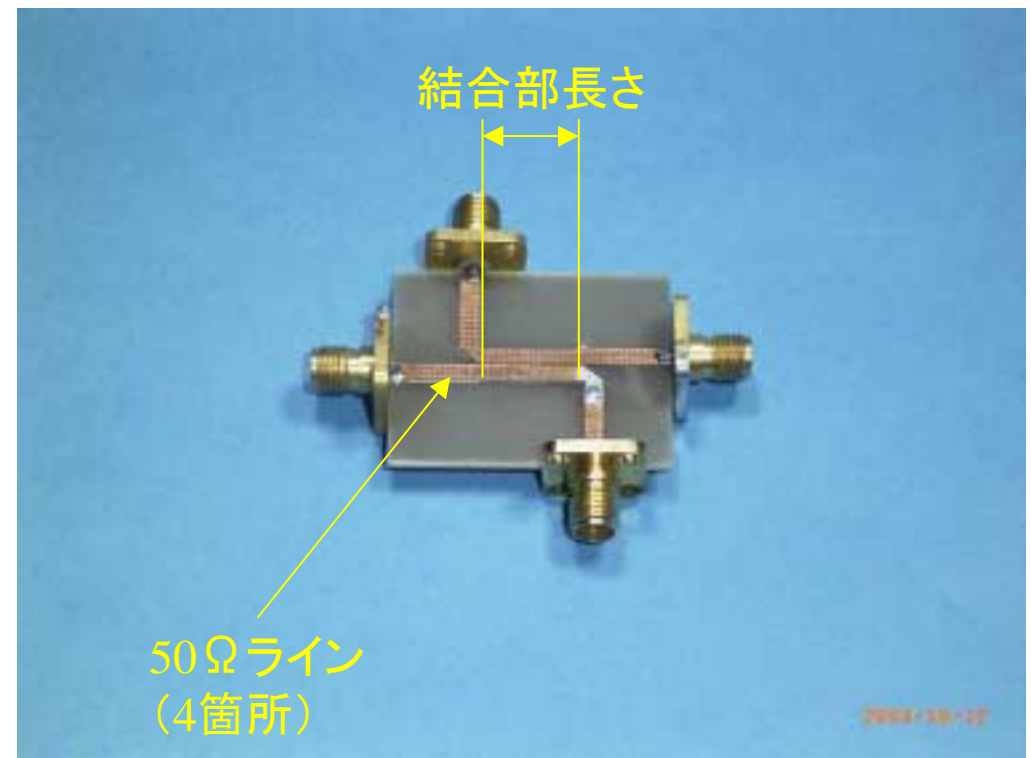


写真-3 : 結合部長さの定義

(C) 2003, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

方向性(ディレクティビティ)が悪化するからです。写真の習作では、作りやすさと曲がりを少なくするという観点で妥協したものです。

プリント板に寸法をけがき、カッターナイフで銅箔に切れ込みを入れて、剥離させる銅箔を半田ごてで加熱しながら、ピンセットやラジオペンチなどで余分な銅箔を取り除きます。これで、0.2 mm程度の工作精度は確保できます。当然、エッチングで精度を出すに越したことはありません、、、

さて、コネクタをつけてでき上がり、、、なのですが、無調整で方向性が満足できるか？ 結合度だけならば、設計値の±1 dBくらいには入っていると思います。

方向性が悪い理由は、マイクロストリップラインとコネクタの接合部分のミスマッチが主原因です。CADでシミュレーションすると良く判るのですが、方向性は、結合部分とポート取り出し部分のマッチングに大きく依存します。

したがって、方向性を調整する場合は、結合部分は設計とおりにしておいていじらずに、コネクタへのラインで調整します。

習作では50 Ωラインの幅が3mmです。一方、コネクタのセンターピン直径は1.3mm程度であり、両者は大きく異なります。また、そもそも、同軸とマイクロストリップラインでは電磁界モードが異なりますので、単純な直結ではミスマッチを起こしてしまいます。

調整の目安としては、50 Ωラインを結合部側からコネクタ側へ

向かってテーパー状に細くしていきます。もしリターンロスを測定できるのなら(それなら「ニワトリと卵」であって、最初から方結を作ろうなどとは思わないだろう、、、)、まずはポートのリターンロスを大まかに改善して、その後方向性を見ながら調整すると良いでしょう。

注: 「コネクタ側から結合部に対して」との旧版での誤記を、朱記の如く訂正します。つまり、結合部側が太く、コネクタ側が細くなります。ただし、あくまでも調整の目安です。(2004年8月25日 BTさん、ご指摘を感謝)

方向性を見るには、完全終端と完全反射のダミーロードを用います。前者はいわゆる50 Ωのダミーロードです。後者は、理想的にはショートを用いますが、アマチュア的にはコネクタをオープンにすることも十分だと思えます。

方向性結合器とクリスタルOSCのマーカがあれば、受信系そのものを検出器としてリターンロスの目安をつけることができますので、自作か既製品かは別として、ひとつ準備されることをお勧めします。

／／
☆