

Polar Instruments 参考技術資料

FR-4 基板におけるトラックの差動インピーダンスの計算

目 次

概要	1
はじめに	1
FR-4 基板	1
差動トラック:磁界分布	2
層と差動インピーダンス	3
おわりに	3

Polar Instruments Ltd

OPPC(株)

概要

FR-4 の差動伝送線路においてインピーダンスの予測値と実測値には相違が生じます。これは特に表面マイクロストリップ構造において目立ちます。そしてこの現象は基板材質の性質によって生じるのでエポキシ樹脂とガラス繊維の層構造が考慮される必要があります。境界要素磁界解析を使用する計算法はその層構造での電界の分布が明確な誘電率を決定するのでインピーダンスに影響するということを提示します。よって FR-4 は差動インピーダンスを計算する際一様な誘電体としては考慮できません。

はじめに

前回の文献^[1]で著者は正確且つ経済的なプリント配線板トラックのコントロール・インピーダンスの計算について述べました。この方法はストリップライン、表面マイクロストリップ、埋込マイクロストリップの構造でのシングルトラック及び差動トラックのインピーダンスを計算するのに取り入れられています。計算ソフトの精度を試すために FR-4 基板上に 27 の差動トラックを持つテストクーポンを含んだ数枚のパネルが製造されました。それらは 3 つの異なる間隔を持つトラックがそれぞれ 3 つの異なるトラック幅を持つものでした。それぞれ同じ幅もつトラックを 3 本ずつ含んだ、ストリップライン、表面マイクロストリップ、埋込マイクロストリップを持つパネルが作られました。それぞれのトラックの差動インピーダンスが測定された後トラックを切断し断面寸法を測定しました。インピーダンスはこれらの寸法を用いて計算され実測値と比較されました。以前^[1]報告されている通りストリップライン及び埋込マイクロストリップの予測値と実測値の正確な相関は誘電率 4.2 を用いて得られました。ところが表面マイクロストリップの予測値と実測値の理に適った相関を得るには誘電率 4.8 が必要でした。図 1 は一般的な表面マイクロストリップ・パネルの差動インピーダンスの予測値と実測値の誤差を示しています。

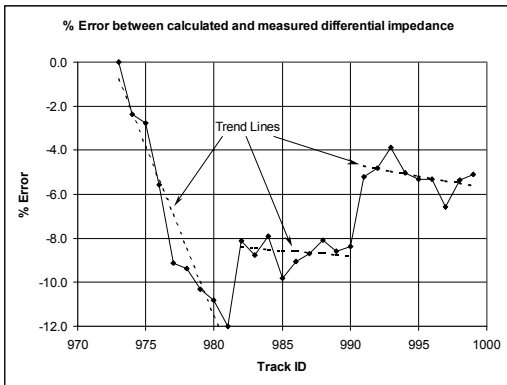


図 1 - 表面マイクロストリップの差動インピーダンスの予測値と実測値の誤差

計算されたインピーダンスはこの図及び他の図にて参考として用いられ、グラフ上の点は ID 番号で表されたそれぞれのトラックのものであります。細かく調べると誤差には(それぞれのトラック幅にひとつずつ)3つの傾向(Trend)がありました。それぞれのトラック幅において誤差の大きさはトラック間隔が広がるに従い増えています。これらの傾向が図 1 に表されています。それ以外の表面マイクロストリップ・パネルでも同様の傾向が確認されました。これらの傾向は非常に現実的であり製造工

程のばらつきによるものではありません。この現象を説明するメカニズムを以下に記しました。

ストリップライン及び埋込マイクロストリップ・トラックのパネルも(特に細いトラックにおいて)そのような線を描いていますが、その傾向の度合は表面マイクロストリップのそれ程ではありません。

FR-4 基板

これらの基板は図 2 で表される幾つかの基礎層から成っています。

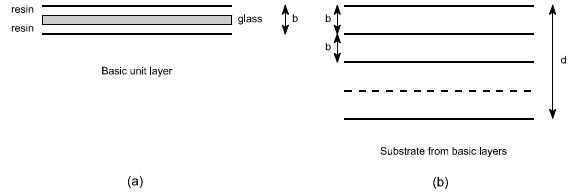


図 2 - 基礎基板構造

意図として繊維ガラスはエポキシ樹脂に囲まれた一様な厚みの堅いガラス層として考慮されます。多くの基礎構成は層の厚みに依存します。図 3 は概略的にシングルエンド・トラック及び差動トラックの電界のパスを示しています。図 3a のシングルエンド・トラックでは電界線は層に対しおおよそ垂直です。図 3b と図 3c の差動トラックでは電界線は層に対し平行です。図 3c ではトラックの間隔が広がるにつれて電界は層に浸透することを示しています。この浸透の変化は平均誘電率が変化することを意味しています。

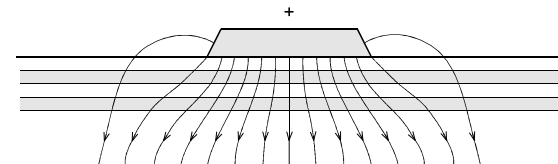


図 3a - シングル・トラック：本質的に並列繊維層

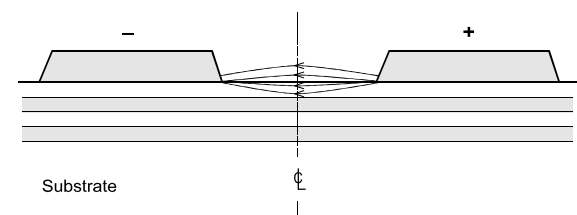


図 3b - 狭い間隔：電界は主として表面のすぐ上及び下(低いε_r)

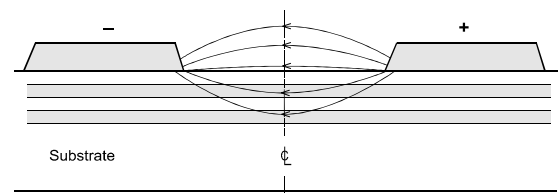


図 3c - 適度な間隔：電界は数層まで浸透

図 4 は平均誘電率の概算に使用される 2 枚のコンデンサ・プレート間の層配列を示しています。

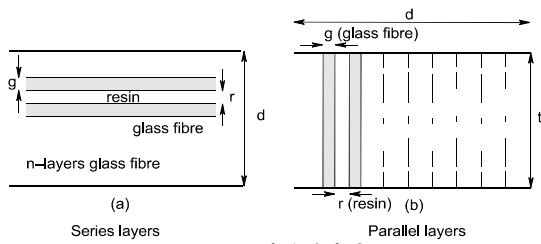


図4 — 平均誘電率を決定する層配列

図4aはシングルエンドの場合、図4bは差動の場合を表しています。図4aに見られる直列層において平均誘電率の式は以下になります。

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_{res} \epsilon_g}{\epsilon_g - \frac{ng}{d} (\epsilon_g - \epsilon_{res})} \quad (1)$$

図4bに見られる並列層において平均誘電率の式は以下になります。

$$\epsilon_p = \epsilon_{res} + \frac{ng}{d} (\epsilon_g - \epsilon_{res}) \quad (2)$$

両方のケースにおけるエポキシ樹脂の容積割合は以下になります。

$$f_r = \frac{d - ng}{d} \quad (3)$$

これらの方程式において ϵ_g 及び ϵ_{res} はそれぞれのガラス繊維とエポキシ樹脂の誘電率です。

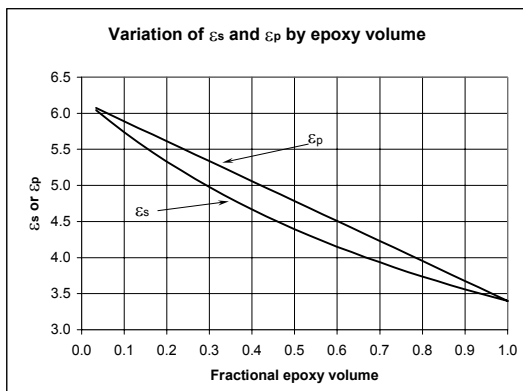


図5 — エポキシ量による ϵ_s と ϵ_p の変化

図5は $\epsilon_g=6.11$ 及び $\epsilon_{res}=3.40$ の時の異なるエポキシの容積割合における ϵ_s と ϵ_p の変化です。 ϵ_s の曲線はワーデル^[3]に与えられたものに類似しています。与えられたエポキシの容積割合においては ϵ_p の値は ϵ_s の値よりも大きくなっています。割合が0.6の場合、 ϵ_s は4.2で

ϵ_p は4.5となっていて、これは約7%の増加です。図1では計算に ϵ_s が使われました。もし計算に ϵ_p が使われたならば誤差は少なかったでしょう。しかし ϵ_p を使用すると図1の傾向を説明できなくなります。

差動トラック：電界分布

図3bと3cはトラック間の間隔が広がる際のトラック間の電界がガラス層とエポキシ層内を不均等に広がることを概略的に表しています。電界の分布をより詳しく調べる為に図6と表1で表されている代表的なトラックの中心線(CL)上の電界は境界要素解析(BEM)を用いて計算されました。基板の誘電率は4.2で一定であるものと仮定しました。図7はその電界の分布を表しています。正規化(Normalize)された位置0.0はグラウンド層で1.0は基板表面です。全ての電界値は正規化されているのでそれぞれのトラックの最高点は1.0です。

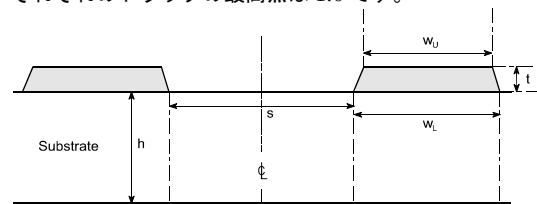


図6 — 表面マイクロストリップのパラメータの略図

表1 — 電界分布

トラックID	間隔 s , μm	差動インピーダンス, Ω	トラックの下辺幅 w_L , μm	トラックの上辺幅 w_U , μm
975	132	130.95		
977	258	163.83	118	90
980	372	183.98		
982	190	133.27		
986	376	165.79	184	152
989	740	201.97		
992	256	136.18		
995	500	167.52	244	216
998	1000	202.72		

注) 基板の高さ, h , 1450 μm

トラックの厚み, t , 48 μm .

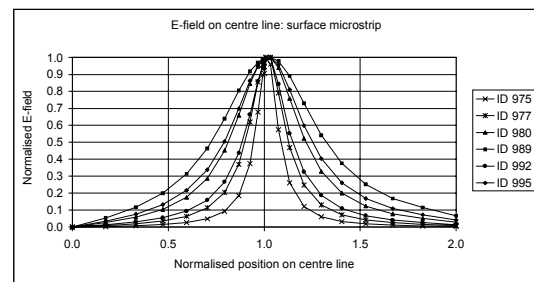


図7 — 2本の差動マイクロストリップ・トラック間の中心線を横切る電界の分布

トラックID975、977、980に関して、図7ではトラック間隔が広がるにつれて電界の広がりが増すことを示しています。その他の曲線は広幅トラックに関しては分布の広がりが多少大きいことを示しています。使用された基板のガラス繊維の正規化された幅は0.08です。この距離は図8で示されています。狭いトラック間隔においてガラス幅は電界分布の幅に類似しています。よって、基板表面に関するガラス繊維の実際の配置は電界分布及びインピーダンス値に大きく影響すると予測されます。

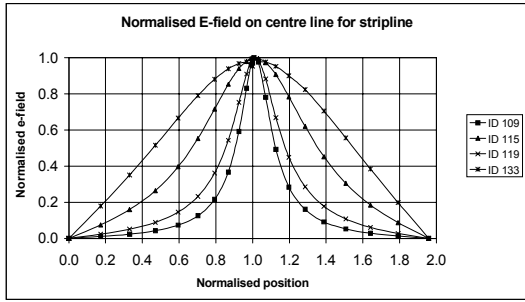


図 8 - 差動ストリップライン・トラックの中心線上の電界分布

図 8 は幾つかのストリップライン差動トラックの電界分布を示しています。トラック間隔が広がるにつれて中心線上の電界の分布幅も広がります。事実最も広い分離 (ID133)において、広がりがあまりに大きいのでトラックからの幾らかの電界はグラウンド層上に終端することを暗示しています。これは基板の層構造は問題ではないことを意味しています。図 3a にて示されているように幾つかの電界線は層を通り抜けてしまう為、ストリップラインにおけるインピーダンスの実測値と計算値の理に適った関係が成り立つでしょう。

層と差動インピーダンス

エポキシとガラスに交代層の影響を評価する為に、BEM が使用され表面マイクロストリップの差動インピーダンスが予測されました。図 9 はその一般的な配列です。

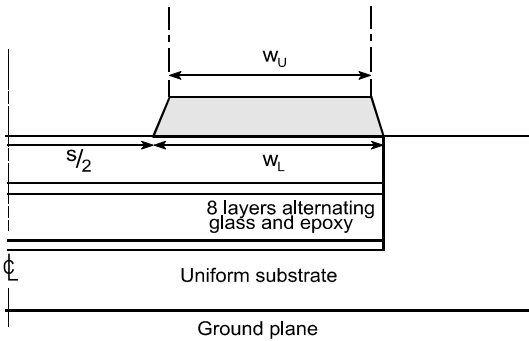


図 9a - 計算用層構造の表現

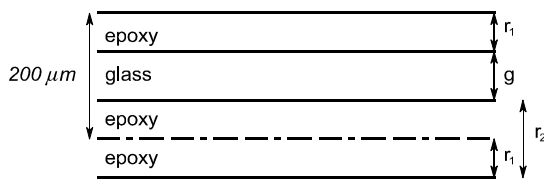


図 9b - 層の寸法の詳細

計算の大きさと長さを制限する為に図に示される基板内 8 層(エポキシ又はガラス)のみが使われました。これは 4 枚の基礎 FR-4 単位層に相当します。個々の層はトラックの端部まで伸びています。エポキシ層とガラス層の誘電率は個々に使用されました。その他の層の誘電率は一律に 4.2 に仮定されました。図 10 は幾つかの代表的なトラックに関して誘電率 4.2 の一様な基板を仮定して計算されたインピーダンスと比較された誤差を示しています。更に図 10 では同じトラックに関しての実用的な結果を示しています。

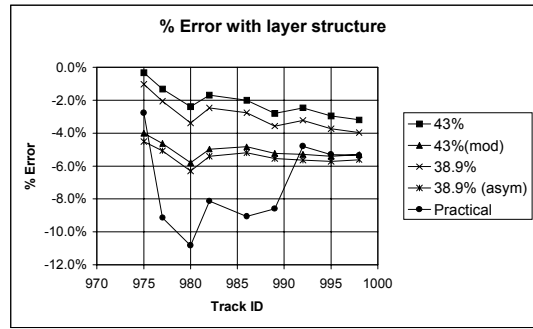


図 10 - 表面マイクロストリップの差動インピーダンス用層構造の影響

基礎 FR-4 単位層(コード 7628)は 200 μm の厚みを持ち含有量は 38.9%です。これは図 9b にて $g=122 \mu m$ を意味しています。ガラスが中心の場合は $r_1=39 \mu m$ で $r_2=78 \mu m$ です。これらの値の曲線には 38.9%と記しました。ガラスが空気面により近ければ非対称的な層が得られます。38.9%(asym)と記された曲線では $r_1=20 \mu m$ です。その他の寸法は変更されませんでした。43%と記された曲線では $g=114 \mu m$ 、 $r_1=43 \mu m$ 、そして $r_2=86 \mu m$ です。43%(mod)と記された曲線では $r_1=0$ 、よってガラス繊維は空気界面上にあります。

図 10 では全ての曲線が 1 項で述べた傾向を示しています。これは層構造が一様な基板を仮定して計算されたものから差動インピーダンスの値を修正することを示しています。トラックの間隔が広がればトラック間の電界の分布も大きくなるので電界はより多くのエポキシ又はガラスの層を通り抜けます。ガラス繊維が基礎 FR-4 単位層の中心からオフセットの場合、誤差は約 4%増加します。このオフセットは幾つかの基礎単位から基板への製造時に生じます。

計算においては個々の基礎層は全く同じように影響を受けました。実際には基板内の単位層は異なります。この製造のばらつきが実際の結果が何故修正された層構造を用いて計算されたものとは異なるかということの理由です。

これらの計算は層構造とその変わりやすさが特に表面マイクロストリップ差動トラックにおける差動インピーダンスの値を決定する重要な要素であることを示します。妥協案としては、少なくとも表面マイクロストリップ構造における層の影響を平均化するため差動インピーダンス計算ソフト^[2]では誘電率の値を約 14%増加されます。

おわりに

ガラス繊維/エポキシ樹脂の層構造は特に表面マイクロストリップにおいて差動インピーダンスの値に影響を及ぼすことが示されました。この影響はトラック幅とそれらの間隔及びエポキシ樹脂とガラス繊維間の実際の層配列に依存します。層の影響を補うために特にマイクロストリップにおいては差動インピーダンス計算ソフトにて大きめの平均誘電率の値を使用することを推奨します。

参考

- [1] Burkhardt, Andrew J., Gregg, Christopher S., Staniforth, J. Alan – Calculation of PCB Track Impedance.
- [2] Proceedings of the Technical Conference IPC Expo '99, Long Beach, Mar 14-18, 1999, pages S19-5-1 to S19-5-6.
- [3] **CITS25** – Differential Controlled Impedance Calculator.
- [4] Polar Instruments Ltd.
<http://www.polarinstruments.com>
- [5] Wadell, Brian C. – Transmission Line Design Handbook, Artech House 1991, p438
- [6] Brebbia, C. A. – The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press 1978.

著者 : Alan Staniforth, Gary Rich, and Chris Gregg –
Polar Instruments Inc. San Mateo, CA

翻訳 : OPPC 株式会社 阪 理