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
	•••••	1
「ハ-4 埜似		1
左動トフツ	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

(株)海外商品計画研究所

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¹¹¹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。



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の) 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。



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 3b - 狭い間隔: 電界は主として表面のすぐ 上及び下(低い,)



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 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 の式は以下のようになります。

$$\varepsilon_{s} = \frac{\varepsilon_{res} \varepsilon_{g}}{\varepsilon_{g} - \frac{ng}{d} (\varepsilon_{g} - \varepsilon_{res})}$$
(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 のようになります。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{p} = \boldsymbol{\varepsilon}_{res} + \frac{ng}{d} \left(\boldsymbol{\varepsilon}_{g} - \boldsymbol{\varepsilon}_{res} \right) \tag{2}$$

両方のケースにおけるエポキシ樹脂の容積割合は以下の ようになります。

$$f_r = \frac{d - ng}{d} \tag{3}$$

これらの方程式において g及び 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 は g=6.11 及び res=3.40 の時の異なるエポキシの 容積割合における s g の変化です。 g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 gの値は gの値よりも 大きくなっています。割合が 0.6 の場合、 gは 4.2 で g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 gが使われました。もし計算に gが使われた ならば誤差は少なかったでしょう。しかし gを使用する とは図 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,	トラックの 下辺幅	トラックの 上辺幅		
		Ω	w _L , μm	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 の広がり方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、 基板表面に関係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。



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て終端すること 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。







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 様に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。



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 µ m の厚みを持ち 含有量は 38.9%です。これは図 9b にて g=122 µ m を意 味しています。ガラスが中心の場合は r_1 =39 µ m で r_2 =78 µ 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 µ 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 µ m、 r_1 =43 µ m、そして r_2 =86 µ m です。 43%(mod)と記された曲線では r1=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 多め平均誘電率が使用され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] Proeedings 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.

- Polar Instruments Ltd. <u>http://www.polar.co.uk</u>
 Wadell, Brian C. Transmission Line Design Handbook, Artech House 1991, p438
 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: 株式会社海外商品計画研究所 阪 理