

高速アナログ設計でのボード寄生成分の測定 (Measuring Board Parasitics in High-Speed Analog Design)

Rea Schmid

High Speed Products

概要

高速アンプを使った回路設計が成功するかどうかは、プリント基板(PCB)の寄生成分について理解し、識別できるかどうかにかかっています。PCB寄生成分のことも考慮しながら設計のシミュレーションを行えば、製造中の思わぬトラブルを防止できます。本アプリケーション・レポートでは、標準的

なオシロスコープと低周波波形ジェネレータを使用してSPICEシミュレーション用の有益な情報を収集することにより、プロトタイプまたは最終製品としてのPCボードの設計における寄生成分を容易に測定する方法について説明します。

目次

1 高速回路の設計	2
2 キャパシタンスのソースを判断する	4
3 キャパシタンスとインダクタンスの測定技法	4
4 測定の注意とヒント	7
参考文献	7

図

図 1. 900MHz周波数アンプ, ゲイン2の段の回路例	2
図 2. 寄生反転ノード・キャパシタンス付きの、900MHz周波数、ゲイン2のビデオ・ライン・ドライバの回路例	2
図 3. 電流帰還アンプの時間領域プロット	2
図 4. HP8116Aのファンクション・ジェネレータを使用したキャパシタンスのテスト測定回路	3
図 5. 三角波 V_1 に対する V_2 を計算する	3
図 6. 2Vランプ波(三角鋸波)と出力方形波を示すオシロスコープ・グラフ	4
図 7. 寄生トレース・インダクタンスの測定	4
図 8. 寄生インダクタンス・テスト励振および応答波形	5
図 9. キャパシタンス測定用のスコープ・プリアンプ	6
図 10. インダクタンス測定用のスコープ・プリアンプ	6

この資料は日本テキサス・インスツルメンツ(日本TI)が、お客様がTIおよび日本TI製品を理解するための一助としてお役に立てるよう、作成しております。製品に関する情報は随時更新されますので最新版の情報を取得するようお勧めします。TIおよび日本TIは、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。また、TI及び日本TIは本ドキュメントに記載された情報により発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。

1. 高速回路の設計

ICのベンダーやメーカーはしばしば、回路設計によりデバイスが仕様どおりの性能を実現できる可能性を高めるために、任意のICデバイスをPCB上で適切にレイアウトすることを推奨しています。回路設計は具体的なアプリケーションに合わせてカスタマイズされるため、起こるトラブルは寄生ボード成分の形をとる可能性が高くなります。たとえば図1の回路では900MHz、ゲイン2のアンプを使用していますが、200MHzより高い帯域を持つアンプはどれもPCB寄生成分の影響を非常に受けやすくなっています。

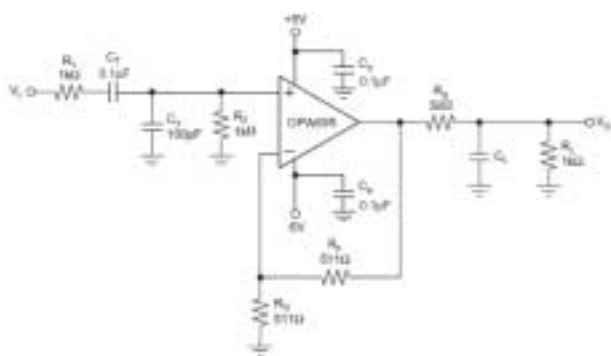


図 1. 900MHz周波数アンプ、ゲイン2の段の回路例

一見すると、このアンプの設計は比較的適切に見えます。しかし、この回路には複数の問題点があります。PCBのレイアウトだけでなく、セレクトされた部品の実際の高周波モデルにも問題があります。部品の高周波モデルを獲得するのは一般的に難しいことではありません。これらのモデルはメーカーのデータシートから入手可能です。これらはまた、ある種のネットワーク・アナライザにあるインピーダンス関数を使用して測定できます。図2はアンプと、アンプの反転入力に接続しているプリント回路トレースから追加された寄生キャパシタンスのみを示しています。このわずかなキャパシタンス C_M が、アンプの性能に重大な影響を与える可能性もあります。ここでの課題は、性能に影響を与える可能性のある、PCBトレースのキャパシタンスおよび/または、高速レイアウトに伴うインダクタンスを測定することになります。

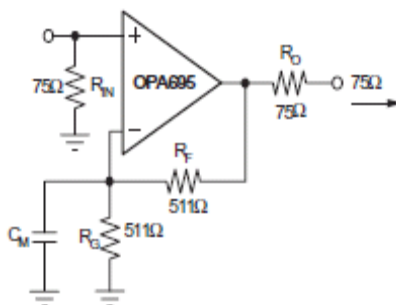


図 1. 寄生反転ノード・キャパシタンス付きの、900MHz周波数、ゲイン2のビデオ・ライン・ドライバの回路例

高周波での正確な寄生成分をPCBから抽出するのは非常に困難な可能性があります。この反復プロセスは、注意深い測定を何時間も行う必要を伴うかもしれません。高速アンプはかなりの程度で、I/Oピンにある寄生キャパシタンスの影響をより受けやすくなっています。たとえば電流帰還アンプの反転ノードでの過剰キャパシタンスは、アンプ出力のリングングという結果になります。この影響は図3の時間領域プロットに見られますが、ここでは図2のシミュレーションにある3つの異なるレイアウト寄生 C_M 値が想定されています。

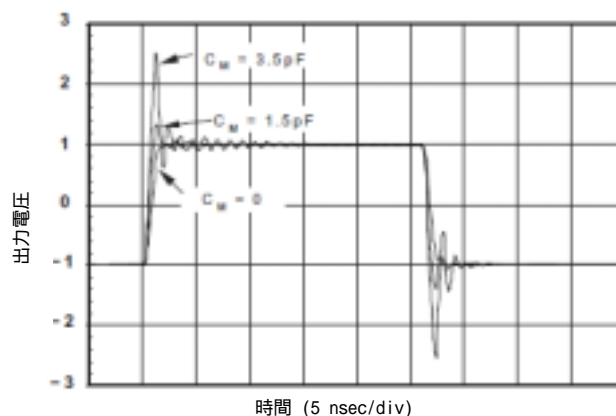


図 1. 電流帰還アンプの時間領域プロット

2. キャパシタンスのソースを判断する

エンジニアとしての経験を積んでいるかどうかに関係なく、高速電流帰還オペアンプ(CFA)や電圧帰還オペアンプ(VFA)についての、これらの寄生成分は見落としやすいものです。

寄生キャパシタンスを低抵抗値(R_g)と並列に追加すると、望ましくない結果が生じます。キャパシタンスが R_f (帰還抵抗)と並列な場合、なぜ全帯域が得られないのかという疑問が生じます。それではエンジニアや設計者が寄生キャパシタンス自体を判別したり、最終的なボード設計に寄生キャパシタンスがどのように影響するかを判断するにはどうすればよいでしょうか?キャパシタンスを測定し、このデータをシミュレーション回路に組み込めばよいのです。

典型的な例として、図2にOPA695高帯域アンプ(ゲイン2)を示します。これは511Ωの帰還抵抗(R_f)と511Ω以下のゲイン設定抵抗(R_g)を使用しています。

(図2に示すように)間違った場所に数pFのキャパシタンスを追加すると、A/D、D/A またはビデオ・ライン・ドライバ・アプリケーションの高速セトリングを得ようとするときに、大きく異なった結果が生成されます。

最初の回路解析が、ボード・レイアウトに起因する寄生キャパシタンスを明らかにすることはまずありません。これらの値は、プロトタイプレイアウトから最終設計に至るまでの間にしばしば変化します。単純な回路理論を使用すれば、このキャパシタンスまたはインダクタンスを判断するためのわかりやすい測定システムを開発できます。

3. キャパシタンスとインダクタンスの測定技法

テスト波形として大きな三角波信号を使用すると、レイアウトのキャパシタンスとインダクタンスを非常に容易に測定できます。このプロセスの第一歩は、図4に示すように寄生キャパシタンスを分離させることです。この単純な回路から、回路 C_M における未知の寄生成分を抽出する技法を定義できます。

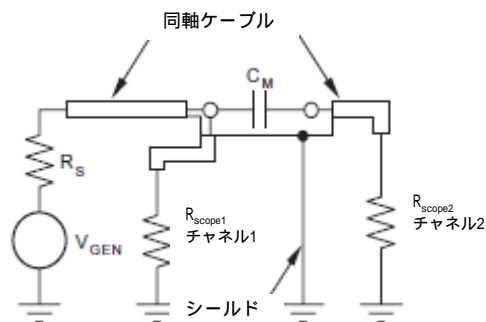


図 1.4. HP8116Aのファンクション・ジェネレータを使用したキャパシタンスのテスト測定回路

図4に示すように、この例ではHP8116Aのファンクション・ジェネレータ(V_{gen})が接続されています。2本の同軸ケーブルの中心導線がPCBトレースとセンス・ラインにはんだ付けされて、チャンネル2を通してグラウンド(または関心の対象となる他のプレーン/トレース)に達しています。シールドは、図4に示すように接合されています。2本の測定用ケーブルがオシロスコプのチャンネル1と2に接続され、入力50Ω 終端を示すように設定されています(R_{scope1} , R_{scope2})。

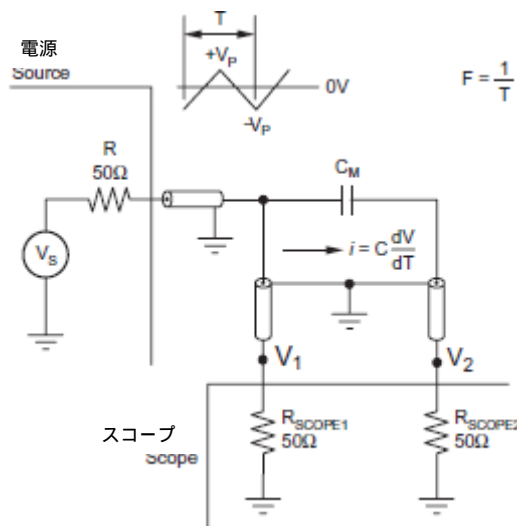


図 1.5. 三角波 V_1 に対する V_2 を計算する

図5の解析回路を見て V_1 が三角波であることを認識すれば、未知のキャパシタンスを流れる電流を容易に計算できます。式は次のように単純なものです。

$$i = C \frac{dV}{dt} \tag{i}$$

三角波の総dV/dTは、ピーク・トゥ・ピークの値が解析に使用された場合、半サイクルごとの傾きの2倍になります。総期間Tの三角波については、dV/dTは次のようにして容易に導き出せます。

$$\frac{dV}{dT} = \frac{2 \cdot V_{1pp}}{T} = V_{1pp} \cdot F \cdot 4 \quad (2)$$

未知の寄生キャパシタンスを通して終端抵抗(もう一方の50Ωスコープ入力)へ到るのは、このV₁でのdV/dTに起因する電流のみなので、この第2のスコープ入力で測定された電圧は次のようになります。

$$V_{2pp} = (50\Omega)C \frac{dV}{dT} = (50\Omega)C \cdot V_{1pp} \cdot F \cdot 4 \quad (3)$$

これを解くと、測定点V₁とV₂でのピーク・トゥ・ピーク電圧の比率に基づいた等式として、未知のCについての式が得られます。

$$C_M = \frac{V_{2pp}}{V_{1pp}} \cdot \frac{1}{4(50\Omega)F} \quad (4)$$

例えば、メーカー提供のデモ・ボードの反転ノード上の寄生キャパシタを、10MHzでの2V_{pp}三角波を使用して測定したところ、図6に示す波形が得られました。

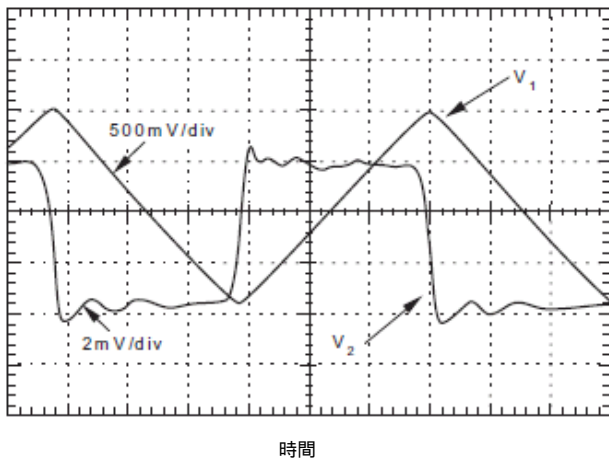


図 1.図 6. 2Vランプ波(三角鋸波)と出力方形波を示すオシロスコープ・グラフ

このデータを式4に当てはめると、次のようになります。

$$C_M = \frac{5.8mV}{1.9V} \cdot \frac{1}{4(50\Omega)F} \quad (5)$$

or $C_M = 1.5pF$ (with $F = 10MHz$) (6)

同様の技法がトレース・インダクタンスの見積もりにも利用できますが、その場合はdI/dT倍の未知のLを生成して電圧を作り出す必要があります。図7に、使用される測定回路を示します。

ここでは、2つの電圧成分によって作り出される小電圧を測定するためにスコープ入力がセットアップされる一方、電源が三角波電流を駆動してデッド・ショートに非常によく似たものにします。この場合、小トレース抵抗(R_M)に起因するIR成分とトレース・インダクタンス(L_M)に起因するL・dI/dT項の両方が存在することになります。

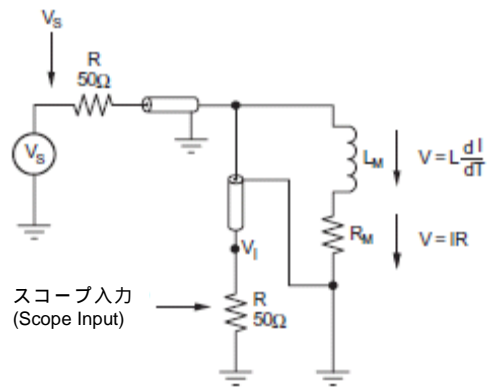


図 7 寄生トレース・インダクタンスの測定

図8は、結果として V_1 で見られる波形です。電圧(V_{Lpp})における大きなステップは、三角波のピークで正の dI/dT が負の dI/dT にシフトすることが原因と考えられます。小さい三角波は、テスト中のトレースへ入る三角波電流の半サイクルごとにに対する抵抗要素に起因するものです。トレースへ入る電流は、その50Ω出力インピーダンスによって分圧される電源電圧(V_S)にほぼ近いものとして見積もることができます。スコープに入る50Ω測定バスは、基本的にははるかに低いインピーダンスによってシャント(分路)されるため、式の一部にはなりません。励振電圧 V_{Spp} の正しい値を使用することが、ここでは一番重要となります。たとえば、5Vppの出力を作り出すためにHP8116をプログラミングすることは、実際には図8に示す目的のために10Vppの励振を作り出していることとなります。

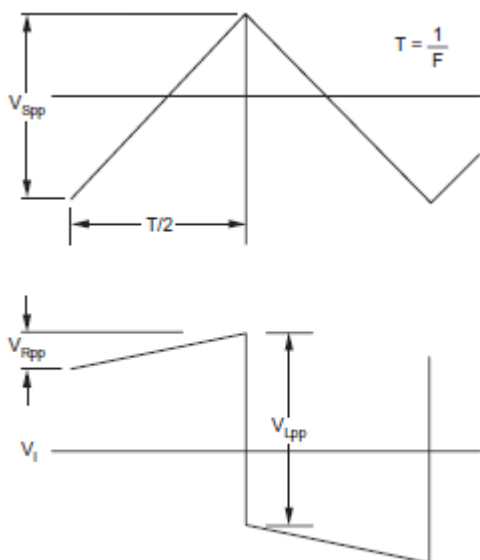


図8 寄生インダクタンス・テスト励振および応答波形

三角波の半サイクルごとに、

$$\frac{V_{Spp}}{R} = I_{test} \quad (7)$$

の三角波が作り出され、テスト中のトレースに入ります。半サイクルに対して、この dI/dT は $V_{Spp}/(R \cdot T/2)$ になります。励振三角波の各ピークごとに傾きの極性が変化して dI/dT が倍になり、図8に示す V_{Lpp} ステップが作り出されます。そのステップは、次の式によって提供されます。

$$V_{Lpp} = \frac{L_m \cdot 2 \cdot V_{Spp}}{R \cdot T} = \frac{L_m \cdot 4 \cdot V_{Spp}}{R \cdot T} = \frac{L_m \cdot 4 \cdot F \cdot V_{Spp}}{R} \quad (8)$$

L_m について解くと、

$$L_m = \frac{V_{Lpp} \cdot R}{4 \cdot V_{Spp} \cdot F} \quad (9)$$

半サイクルに対する電流における変化全部により、図8に示すようなレスポンス波形の抵抗部分が作り出されます。

$$V_{Rpp} = \frac{V_{Spp}}{R} \cdot R_m \quad (10)$$

R_m について解くと、次のようになります。

$$R_m = R \cdot \frac{V_{Rpp}}{V_{Spp}} \quad (11)$$

4. 測定の注意とヒント

ケーブルのキャパシタンスがこの測定技法と互いに影響し合わないようしておくために、比較的低い(10MHzより低い、および可能ならば2MHzより低い)周波数、かつ大きな振幅が使用されます。ただし結果として測定された電圧は、かなり小さくなる可能性があります。非常にゲインの高い帯域を持ち、低ノイズで、高いDC精度のスコープ・プリアンプを使用すれば、非常に低いキャパシタンスやインダクタンスを測定する場合に測定の正確さを向上させることができます。図9と10は、このスコープ・プリアンプを非常に上手く選択した場合を示しています。図9と10の違いは、キャパシタンス・テストまたはインダクタンス・テストの電源インピーダンスが異なることを前提として、DCバイアス電流の解除をどのように達成するかという点のみです。図5に R_{scope2} として、および図7で R として示されている50Ω抵抗は、図9と10では入力終端50Ωとなります。

この例のプリアンプで使用されているOPA847は、 $0.9\text{nV}\sqrt{\text{Hz}}$ より低い入力ノイズ電圧と並外れて高いDC精度を持つ、3.9GHzゲイン帯域幅積を提供します。図9と10に示すような非常に高いゲイン(アンプ用で201V/V)では、帯域がほぼ18MHz近くにまで減らされます。周波数が2MHzより低い励振三角波とともに使用すれば、これは必要な電圧ステップを測定するのに十分なレスポンス高調波を通すのに適当となります。スコープ波形上のノイズを制限するには、その20MHz帯域オプションを利用することも推奨されます。図9のプリアンプは図5の V_2 の所に、図10のプリアンプは図7の V_1 の所に挿入されます。

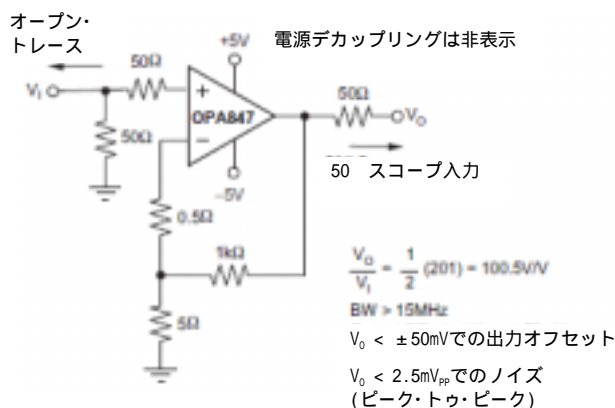


図9 キャパシタンス測定用のスコープ・プリアンプ

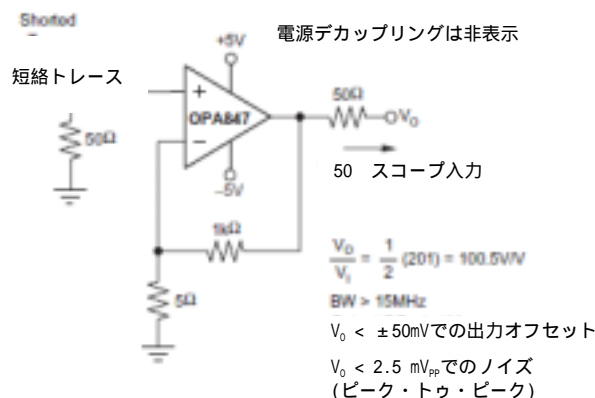


図10 インダクタンス測定用のスコープ・プリアンプ

参考文献

1. Quint, D.W., Aziz, A., Kaw, R. and Ferezalonso, F.J. Measurement of R, L and C Parameters in VLSI Packages. Hewlett-Packard Journal, October, 1990. Pp. 73-77.