

ミックスド・シグナル・システム用のプリント基板、ガイドラインの遵守がレイアウト設計を成功に導く

著者：May Anne Porley、アプリケーション・エンジニア
Kevin Chesser、プロダクト・アプリケーション・エンジニア

概要

本稿では、ミックスド・シグナル・システムを実装するプリント基板（以下、ミックスド・シグナル基板）のレイアウト設計について説明します。主に、コンポーネントの配置、基板のレイヤ、グラウンド・プレーンの3つの項目について、実用的な解説を行うことにします。本稿で示す内容は、ミックスド・シグナル基板のレイアウト設計に関するガイドラインとして位置づけられます。実用的なアプローチを取り上げているので、どのような経歴の技術者にとっても有益な情報になるはずです。

はじめに

ミックスド・シグナル基板を設計するにあたっては、そのための基本的な知識が不可欠です。その種の基板では、信号の干渉を完全に防ぐことはできないまでも、最小限に抑えることが非常に重要になります。現代のシステムは、デジタルとアナログの両方の領域で動作するコンポーネントで構成されています。システム全体にわたってシグナル・インテグリティが確保されるよう、慎重に設計を行わなければなりません。

基板のレイアウトは、ミックスド・シグナル・システムの開発工程において重要な意味を持つ作業です。そのため、着手にあたって気後れする方もいるでしょう。コンポーネントの配置は、そのための第一歩にすぎません。例えば、基板のレイヤについても、慎重に管理する必要があります。基板のプレーン層の間には、気づかないうちに寄生容量が形成されているかもしれません。それらに起因する干渉を最小限に抑えるにはどうすればよいのでしょうか。このように、検討しなければならない項目は数多く存在します。

ミックスド・シグナル基板のレイアウト設計においては、グラウンディングも重要な要素になります。グラウンディングは、エレクトロニクスの業界で頻繁に議論される話題です。しかし、標準化されたアプローチを確立するのは、あらゆる技術者にとって単純な作業にはなり得ないでしょう。例えば、グラウンディングという基板レイアウト上の問題が、ミックスド・シグナル・システムの性能に影響を与えてしまうこともあります。グラウンディングは決して見過ごしてはならない項目の一例です。

コンポーネントの配置

家を建てる場合には、家具の配置などについて考える前に基本的な間取りについて考えておく必要があります。それと同様に、ミックスド・シグナル基板を設計する際には、コンポーネントの配置について考える前に、全体のフロア・プランを作成することが重要です。この作業は、システム全体のインテグリティに影響を及ぼします。例えば、大きな信号の干渉を回避する上で重要な意味を持つはずです。

特に高速信号を扱う回路が存在する場合には、フロア・プランを作成する際に回路図上で信号の経路をたどることをお勧めします。コンポーネントの位置も、設計における重要な側面になります。システムにおける各コンポーネントの最適な配置を見極めるには、重要な機能ブロック、信号、ブロック間の接続について把握しておかなければなりません。例えば、コネクタは、基板の端に配置するのが望ましいと言えます。一方、デカップリング用のコンデンサや水晶発振器など、ミックスド・シグナル・デバイスに関連するコンポーネントは、できるだけそのデバイスの近くに配置する必要があります。

アナログ・ブロックとデジタル・ブロックの分離

アナログ信号とデジタル信号については、共通のリターン・パスを最小限に抑える必要があります。そのためには、アナログ回路ブロックとデジタル回路ブロックを分離し、アナログ信号とデジタル信号がなるべく混在しないようにする必要があります。

図1に示したのは、アナログ回路とデジタル回路がうまく分離できている例です。アナログ・セクションとデジタル・セクションの分離を図る場合には、以下のようなことについて考察する必要があります。

- ▶ オペアンプや電圧リファレンスといった敏感なアナログ・コンポーネントは、アナログ・プレーンの内部に配置するようにします。一方、ロジック制御回路やタイミング・ブロックなど、ノイズの大きいデジタル・コンポーネントは、アナログ・プレーンから分離されたデジタル・プレーンに配置する必要があります。
- ▶ システムによっては、ミックスド・シグナルでデジタル系の消費電流が少ないA/Dコンバータ(ADC)またはD/Aコンバータ(DAC)が1個だけ使用されることがあります。そうしたケースでは、そのADC/DACをアナログ・プレーン内に配置するアナログ・コンポーネントと同じように扱うことができます。
- ▶ 消費電流の多いADCとDACを複数使用する場合には、アナログ電源とデジタル電源を分割することが推奨されます。つまり、 AV_{CC} はアナログ・セクションに接続し、 DV_{DD} はデジタル・セクションに接続する必要があります。
- ▶ マイクロプロセッサ/マイクロコントローラは、占有面積が大きいことに加え、多くの熱を発する可能性があります。これらのコンポーネントは、放熱しやすいように基板の中央に配置します。同時に、それらに関連する回路ブロックの近くに配置する必要があります。

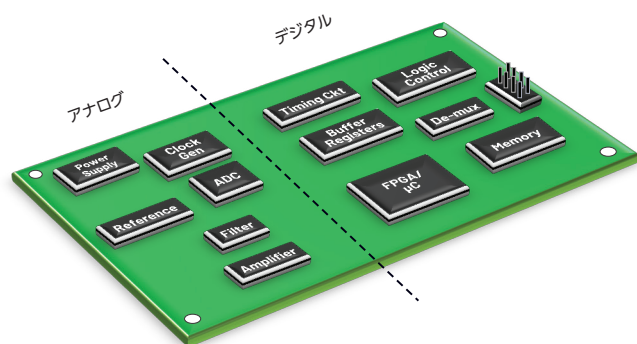


図1. アナログ回路とデジタル回路の分離

電源ブロック

言うまでもなく、電源は回路の重要な要素です。したがって、慎重に扱う必要があります。経験則として、電源ブロックは回路のその他の部分から分離しつつ、電力の供給先となるコンポーネントの近くに配置する必要があります。

複雑なシステムでは、複数の電源ピンを備えるデバイスが使用されるはずです。そのような場合、デジタル回路に起因する大きな干渉を避けるために、アナログ・セクションとデジタル・セクションのそれぞれに専用の電源ブロックを用意するとよいでしょう。

電源の配線については、電流が制限されることを避けるために、インダクタンスを低減しなければなりません。そのため、幅が広く短いパターンを使用して直接的な接続を実現する必要があります。

デカップリングの方法

電源電圧変動除去比(PSRR)は、システムの目標性能を達成するために検討しなければならない重要なパラメータの1つです。この指標は、電源電圧の変動に対するデバイスの感度を表します。最終的には対象となるデバイスの性能を左右するものでもあります。

最適なPSRRを維持するには、周波数の高いエネルギーがデバイスに印加されるのを防がなければなりません。そのためには、電解コンデンサとセラミック・コンデンサを組み合わせ、デバイスの電源を低インピーダンスのグラウンド・プレーンに適切にデカップリングします。

適切なデカップリングを施すというのは、回路が適切に動作できる低ノイズの環境を構築することです。そのための基本的な考え方として、最短の経路を設けることにより、電流が簡単に戻れるようにすることが重要です。

各デバイスについては、高周波成分のフィルタリングに関する推奨事項を必ず確認しなければなりません。以下に、これに関するチェックリストを示します。一般的なデカップリング方法とその正しい実装方法に関する手引きとして活用してください。

- ▶ 電解コンデンサは、過渡的な電流に対応して電荷を蓄積し、電源の低周波ノイズを最小限に抑える役割を果たします。一方、インダクタンスの小さいセラミック・コンデンサは、高周波ノイズを低減するために使用します。フェライト・ビーズの使用は任意ですが、同デバイスを使うことで高周波ノイズを更に隔離してデカップリングする効果が得られます。
- ▶ デカップリング・コンデンサは、デバイスの電源ピンのできるだけ近くに配置します。追加される直列インダクタンスを最小限に抑えるために、デカップリング・コンデンサは、ビアまたは短いパターンを介して面積の大きいグラウンド・プレーンに低インピーダンスで接続する必要があります。
- ▶ 値が小さい方のコンデンサ（一般的には $0.01\mu\text{F} \sim 0.1\mu\text{F}$ ）は、デバイスの電源ピンのできるだけ近くに配置します。対象となるデバイスが、同時にスイングする複数の出力を備えている場合、そのような配置を行うことで、動作が不安定になるのを防ぐことができます。電解コンデンサ（一般的には $10\mu\text{F} \sim 100\mu\text{F}$ ）は、デバイスの電源ピンから 1 インチ（2.54cm）以内の位置に配置します。
- ▶ より簡単な実装方法として、パターンを用意する代わりに、コンポーネントの GND ピンの近くのビアを使用するというものがあります。図 2 に示すように、デカップリング・コンデンサをグラウンド・プレーンに T 字の形で接続します。

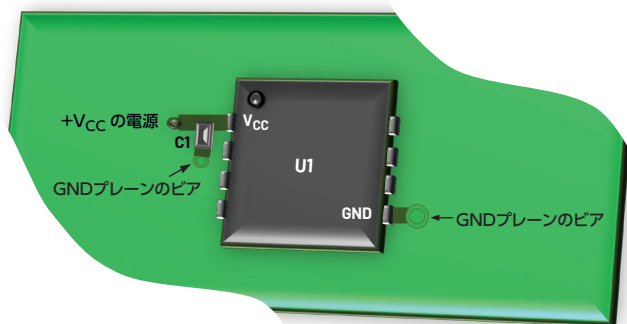


図 2. 電源ピンのデカップリング方法

基板のレイヤ

コンポーネントの配置とフロア・プランを決定したら、基板設計の次の次元に進むことになります。つまり、基板のレイヤについて考えるフェーズに移ります。そのレイヤにより、システム設計において許容できる電流のリターン・パスが決まります。そのため、配線を行う前にレイヤについてぜひとも考察すべきです。

基板のレイヤとは、基板を構成する銅層の垂直構造のことです。それらのレイヤによって、基板全体の電流と信号が管理されることになります。

図3は、基板のレイヤを視覚的に表したものです。表1に、標準的な4層基板における各層の役割についてまとめました。

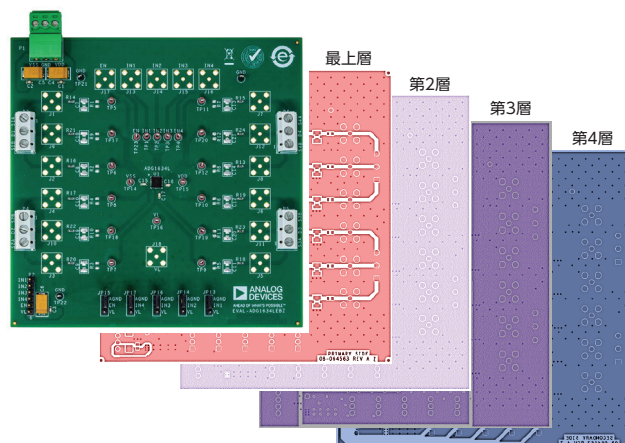


図 3. 4層基板の例

表 1. 標準的な4層基板における各層の役割

層	層の種類
1	デジタル信号／アナログ信号（最上層）
2	グラウンド
3	電源プレーン
4	補助的な信号（最下層）

一般に、高性能のデータ収集システムは、4層以上の基板を使って実現されるはずですが。最上層は、デジタル信号／アナログ信号に使用されるケースが多く、最下層は補助的な信号に使われます。第2層（グラウンド層）は、インピーダンスが制御される信号のリファレンス・プレーンとしての役割を果たします。また、IR（電流・抵抗）降下の低減と最上層のデジタル信号のシールドを実現するためにも使われます。残る第3層は電源プレーンとして使用されます。

電源プレーンとグラウンド・プレーンは、プレーン間の容量を追加で生成するために、互いに隣接させるべきです。プレーン間の容量は、電源における高周波成分のデカップリングに役立ちます。

ミックスド・シグナル基板におけるグラウンド層の設計に関しては、以前とは異なる推奨事項が示されるようになりました。これまで長きにわたり、グラウンド・プレーンはアナログとデジタルの間で分割するというのが理にかなった方法だとされてきました。しかし、現在のミックスド・シグナル・デバイスに対しては新たなアプローチが推奨されています。適切なフロア・プランを作成すると共に信号の分離を図ることによって、ノイズの大きい信号に伴うあらゆる問題を回避することができます。

グラウンド・プレーンは分割すべきなのか？

ミックスド・シグナル基板のレイアウト設計において、グラウンディングは重要な作業です。標準的な4層基板において、リターン信号用の低インピーダンスのパスを確保するために、グラウンド・プレーン専用の層を少なくとも1つ用意しなければなりません。すべてのICのグラウンド・ピンを、低インピーダンスのグラウンド・プレーンに正しく配線／接続することで、直列インダクタンスと抵抗を最小限に抑える必要があります。

ミックスド・シグナル・システムでは、アナログ・グラウンドとデジタル・グラウンドを分割することが標準的なグラウンディング方法となっています。しかし、デジタル系の電源電流が少なく抑えられたミックスド・シグナル・デバイスについては、単一のグラウンドによって管理するのが最も良い方法だと言えます。今後は、各ミックスド・シグナル・デバイスの電流の要件に応じ、どのようなグラウンディングが最も適切なのか考察する必要があります。設計者が検討すべきグラウンディングの方法は2つ存在します。以下、それぞれについて説明します。

単一のグラウンド・プレーン

ミックスド・シグナル・システムの中には、デジタル系の電源電流が少ないADCまたはDACを1個だけ使用するものがあります。その場合、単一のグラウンド・プレーンを使用するのが最も良い方法です。単一のグラウンド層を使用することの重要性を把握するには、リターン電流について理解しておかなければなりません。リターン電流はグラウンドに流れる電流であり、それによってデバイス間をまたがる完全なループが形成されます。ミックスド・シグナル・システムに対する干渉を防ぐためには、基板レイアウト全体にわたって各リターン・パスを追跡する必要があります。

ここで、図4の簡単な回路をご覧ください。この図から、(分割されたグラウンド・プレーンと比較した場合の) 単一のグラウンド・プレーンのメリットを見てとることができます。ご覧のように、信号の電流はリターン電流と同じ値で逆向きに流れます。リターン電流はグラウンド・プレーンの最もインピーダンスの低い経路を流れて信号の供給側のデバイスに戻ります。

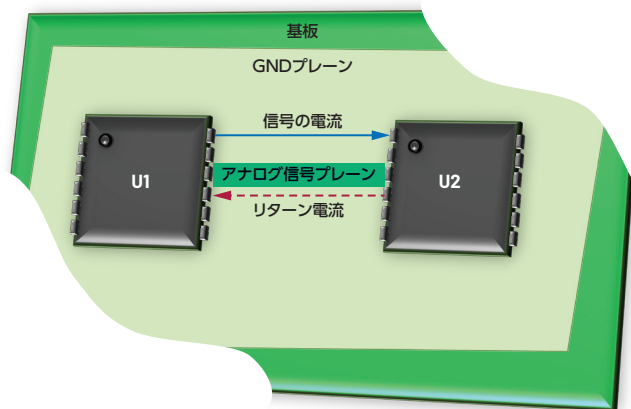


図4. 単一のグラウンド・プレーンを使用するシステムのリターン電流

低周波の信号の場合、リターン電流は最も抵抗の低い経路を通ります。通常、その経路はデバイスのグラウンド・リファレンス・ポイントの間の直線経路になります。しかし、高周波の信号の場合、リターン電流の一部が信号経路とは逆向きに流れようとします。この経路を通るとインピーダンスが低くなり、信号の電流とリターン電流によって形成されるループのサイズが最小になります。

アナログ・グラウンドとデジタル・グラウンドの分割

複雑なシステムの場合、単一のグラウンドを安易に採用するべきではありません。そのような場合には、グラウンドを分割する方法の方が適切である可能性があります。グラウンド・プレーンをアナログとデジタルの2つに分割するというのは、広く使われているグラウンディングの方法です。この方法であれば、デジタル系の消費電流が多い複数のミックスド・シグナル・デバイスを含む、より複雑なシステムにも適用できます。図5に示したのは、システムのグラウンド・プレーンを分割した例です。

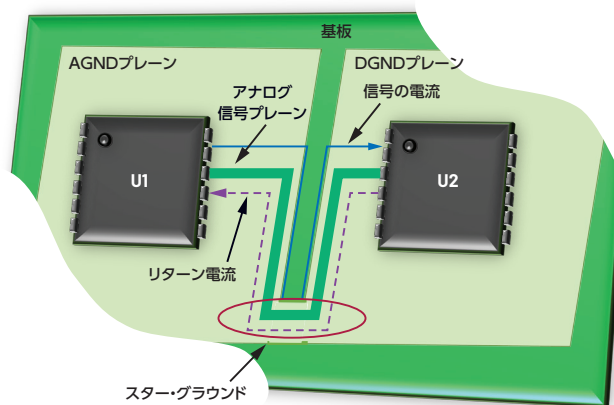


図5. システムのグラウンド・プレーンを分割した例。リターン電流の経路も示してあります。

システムのグラウンド・プレーンを分割した場合、グラウンドの緊密性を確保する最も簡単な方法は、グラウンド・プレーンの分割線を取り除く（完全に独立させるのではなく、1ヵ所は接続しておく）ことです。それにより、リターン電流がそのスター・グラウンドを介して、より直接的な経路をたどれるようにします。スター・グラウンドとは、ミックスド・シグナル・システムのレイアウト設計において、アナログとデジタルのグラウンド・プレーンを互いに結合する部分のことです。

一般的なシステムにおいて、スター・グラウンドは、アナログとデジタルのグラウンド・プレーンの間をつなぐシンプルで細く連続的な接合部だと考えることができます。設計がより複雑な場合、スター・グラウンドは、グラウンド・ヘッダへのジャンパ・シャントによって実装されるのが一般的です。スター・グラウンドにヘッダとジャンパ・シャントを使用するのは、多くの電流に対応するためではなく、両方のグラウンドのリファレンス・レベルを同一にすることを主な目的とします。

各種のデバイスのデータシートには、グラウンドに関する推奨事項が記載されていることが多いでしょう。その内容を必ず確認し、グラウンディングの仕様に従うことで、グラウンドに関連する問題が生じないようにしなければなりません。

AGNDピンとDGNDピンを備えるミックスド・シグナル・デバイスについては、それらのピンをそれぞれに対応するグラウンド・プレーンに接続してかまいません。スター・グラウンドの1点で、両方のグラウンドは接続されているからです。それにより、ノイズの多いデジタル系の電流は、デジタル電源からDGNDプレーンに流れてデジタル電源に戻ってくるまでの間、敏感なアナログ回路から隔離されることになります。AGNDプレーンとDGNDプレーンの分離は、多層基板のすべての層で行う必要があります。

グラウンドに関するその他のプラクティス

ミックスド・シグナル・システムにおいて適切なグラウンディングを実現するために役立つ補足事項を以下に示しておきます。

- ▶ スター・グラウンド（ポイント）における接続には、幅の広い銅パターンを使用します。
- ▶ グラウンド・プレーンに細いパターンが使われていないことを確認します。細いパターンによる接続は好ましくありません。
- ▶ 必要に応じてアナログとデジタルのグラウンド・プレーンを接続できるように、パッドやビアを用意しておくことで便利です。

まとめ

ミックスド・シグナル基板のレイアウト設計は、簡単な作業ではありません。コンポーネントに関するフロア・プランを作成するのは、出発点にすぎません。ミックスド・シグナル・システムの最適な性能を達成するために、基板のレイヤ構造を適切に管理し、適切なグラウンドを確立することも、レイアウト設計における重要な要素です。コンポーネントに関するフロア・プランの作成は、システム設計全体のインテグリティを確立する上で重要な意味を持ちます。基板のレイヤを最適化する作業は、基板全体の電流と信号の管理に役立ちます。最も有効なグラウンディングの方法を選択することは、システムの性能を高め、ノイズの大きい信号やリターン電流に伴う問題を防ぐことにつながります。

謝辞

本稿では、Eric Carty、Genesis Garcia、Giovanni Aguirri、Brendan Somers、Stuart Servis、Leandro Peje、Mar Christian Lacida、Yoworex Tiuの各氏を含む多くの方々の取り組みを基にした情報を示しました。

参考資料

Walt Kester「[The Data Conversion Handbook（データ変換ハンドブック）](#)」Analog Devices、2005年

John Ardizzone「[高速プリント回路基板レイアウトの実務ガイド](#)」Analog Dialogue、Vol. 39、No. 9、2005年9月

Ralph Morrison「[Grounding and Shielding Techniques（グラウンディングとシールドングのテクニック）](#)」John Wiley & Sons, Inc.、1998年

Thomas O'Shea「[AN-1349 アプリケーション・ノート：ADM2582E/ADM2587E（RS-485/RS-422）トランシーバのEMI放射を最小限に抑えるためのPCB実装ガイドライン](#)」Analog Devices、2018年8月

「[MT-101 Tutorial Decoupling Techniques（チュートリアル：デカップリングのテクニック）](#)」Analog Devices、2009年

[リニア回路設計ハンドブック](#)、Analog Devices、2008年

Paul Brokaw「[AN-342 アプリケーション・ノート：高速性と高精度を同時に実現するアナログ信号処理](#)」Analog Devices

Walt Kester、James Bryant、Mike Byrne「[MT-031 チュートリアル：データ・コンバータのグラウンディングと、\[AGND\] および \[DGND\] に関する疑問の解消](#)」Analog Devices、2009年

Paul Brokaw、Jeff Barrow「[AN-345 アプリケーション・ノート：低周波回路と高周波回路のグラウンド設計——効果的な設計のためにグラウンド経路と信号経路を理解すること。電流は、抵抗ではなくインピーダンスが最小の経路に流れる](#)」Analog Devices

Doug Grant、Scott Wurce「[AN-348 アプリケーション・ノート：受動部品による落とし穴を回避するには——正しい受動部品を使用しないと最良のオペアンプやデータ・コンバータでも失敗する可能性があります。注意を要する基本的なトラップ](#)」Analog Devices



著者について

May Anne Porleyは、アナログ・デバイセズ（フィリピン）のアプリケーション・エンジニアです。入社は2012年で、自動試験装置（ATE）グループに所属。スイッチ、マルチプレクサ、レベル変換器、バッファ非内蔵型のクロスポイント・スイッチなどを対象としてアプリケーション・サポートを提供しています。フィリピンのデラサル大学ダスマリニャス校で電子工学の学士号を取得しました。



著者について

Kevin Chesserは、アナログ・デバイセズ（リムリック）のSMXグループでプロダクト・アプリケーション・エンジニアを務めていました。技術によって、エレクトロニクスと実世界の問題を解決することに情熱を注いでいます。「ADG7xxファミリ」のスイッチ／マルチプレクサを対象としてカスタマ・サポートを提供していました。