

次世代光トランシーバ開発に向けた電磁界解析

Electromagnetic Field Analysis for Next-Generation Optical Transceiver Development

大森 寛康
Hiroyasu Oomori

データ通信は、スマートフォンに代表される無線通信量の増加、クラウドの普及によるデータセンター内での通信量の増加に伴い高速化・大容量化が進んでいる。その中で電気信号と光信号のコンバーターである光トランシーバにも高速化の要望が強い。高速の電気信号を歪みなく伝送させるために、通常、特性インピーダンスなどの評価指標をもとに伝送線路の設計を行っているが、実際の基板上では、いくつかの要因が電気信号を歪ませてしまう。その要因は、それぞれが相関の関係にある Signal Integrity (SI)・Power Integrity (PI)・Electro-Magnetic Interference (EMI) / Electro-Magnetic Susceptibility (EMS) によって成り立っている。電磁界解析は、これらの課題解決に重要な役割を果たす。本稿では、その要因について例を挙げて説明した後、電磁界解析を使用し問題点の抽出や解決方法の事例を紹介する。

The demand for high-speed data communication systems has been increasing to accommodate huge data communication traffic resulting from the growth of smartphone and cloud computing services via data centers. This trend has generated a strong demand for high-speed optical transceivers. To transmit electric signals without distortion, transmission lines are designed with a due consideration of characteristic impedance. Nevertheless, electric signals tend to be distorted by unexpected factors on actual circuit boards. These factors often consist of signal integrity (SI), power integrity (PI), and electro-magnetic interference (EMI) / electro-magnetic susceptibility (EMS), which are correlative to each other. For these problems, electromagnetic field analysis plays an extremely important role. This paper describes typical contributing factors, as well as problem examples and their solutions extracted by electromagnetic field analysis.

キーワード：高速信号、信号品質 (SI)、電源品質 (PI)、EMI/EMS、電磁界解析

1. 緒言

近年のデータ通信は、スマートフォンの爆発的普及やHDや4Kでの映像配信、Internet of Things (IoT) の通信などにより扱うデータ量が急増している。また、これらのデータを扱うデータセンターにおいても、より大容量で高速なデータ通信が求められている。このようなデータ通信の進歩と共に光トランシーバにも高速なデータ通信が求められている。さて、光トランシーバとは、光ファイバーを伝送して来た光信号を電気信号へ、またその逆の変換を行うモジュールであり、光ネットワークを支える基幹部品となっている。この光トランシーバも他の多くの電子デバイスと同様に、組み込まれている電子部品による不要輻射の電磁ノイズ (Electro-Magnetic Interference : EMI) や電磁ノイズによる内部干渉 (Electro-Magnetic Susceptibility : EMS) 等の問題が発生する場合がある。このような問題を解決する方法として電磁界解析が有効であり、より高速な伝送信号を扱うほど、その必要性は高まっている。

2. 信号品質と電源品質とEMI/EMSの関係

信号品質とは、Signal Integrity (SI) と呼ばれ、デジタ

ル回路においてドライバからレシーバまでデジタル信号波形 (一般的には、方形波) を正しく伝送できる信号の品質を表した言葉である。一方、電源品質は、Power Integrity (PI) と呼ばれ、デジタル回路において動作するデバイスに供給する電源の品質を表した言葉である。以下ではSI、PIとEMI/EMSの関係について説明する。

理想的な伝送線路の場合、SIはその伝送線路が所望の特性インピーダンスで設計されているかのみ注力すれば良い。しかし、デジタル信号を送信するデバイス (以下では、ドライバと呼ぶ) が実際に基板へ実装され、その信号を受け取るレシーバと伝送線路で接続されている場合、上記のような単純な関係にはならない。例えば、ドライバでは、ロー状態、ハイ状態、ローからハイへ (もしくは、その逆) の遷移状態の3つの状態からなり、ハイ状態もしくは、その移行時にドライバへ電荷が電源より供給される。つまり、伝送スピードと同等のスピードで電源もON/OFFのスイッチングを行っている。この時、電源から十分な電荷がドライバに供給できていれば問題はないが、ドライバが電源供給部から遠い場合や細い配線で接続されている場合、動作が不安定になることがある。これは、電源供給部からドライバに供給される電荷の充填に要する時間が関係

している。例えば、ドライバが電源供給部から遠い位置にある場合、ドライバがONになると電源配線にある電荷は一気にドライバに流れ込むが、その後OFFとなり再びONとなった場合、ドライバに接続されている電源配線内に十分な電荷が充填されていない状態が生じた時、ドライバの動作に必要な電荷が供給されず不具合を発生させる可能性がある。このような電源の変動を電源電圧変動と呼び、ドライバが送信する信号が多チャンネルになるほど大きな電源電圧変動となる。また、高速でスイッチングする電源配線を細くしてしまうと、電源配線によるインダクタンス成分の影響が大きくなる。このインダクタンス成分は、ドライバへ供給する電荷のON/OFFで発生した電源のスイッチングにより逆起電力を誘起し、その結果、十分に電荷が電源配線に充填できず、ドライバの動作に不具合が発生する。

ここでは、2つの原因でドライバに十分に電荷が与えられない原因を紹介したが、その際に生じるSIの不具合とは、ドライバが送信する波形の立ち上がり速度が遅くなり、信号の歪み（ジッター）、信号振幅の低下と言ったドライバが入力信号に忠実な信号を出力できない状態である。PIとSIには、このような相関関係がある。

一方で、信号波形送信時のスイッチングにより、電源は電圧変動を繰り返しているが、この電源電圧変動は見かけ上信号と同等に様々な高周波信号を電源配線に伝播させている。この電源電圧変動はEMI要因の一つとなる。このように、PIとEMIにも相関関係がある。さらに、場合によっては、EMIによって放射された不要な電磁ノイズが他の電源配線に飛び込み電源電圧変動を引き起こし、上述のPIとSIの現象を引き起こすこともある。このようにPIとSIとEMI/EMSには図1に示すように、複雑な相関関係があり、問題のきりわけや発生箇所の特特定が原因調査や対策検討に不可欠となる^{(1)~(3)}。

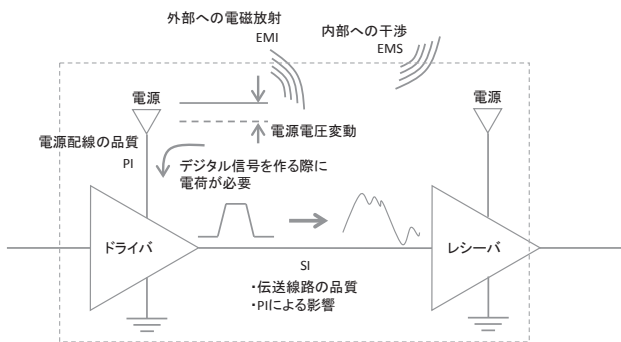


図1 SI, PI, EMI/EMSの簡単な模式図

3. 電磁界解析を用いた品質向上

上記の問題解決には、電磁界解析が極めて有効である。

下記に各品質特性の向上に電磁界解析を応用した3つの事例を紹介する。

3-1 EMIへの応用

前述のPI設計によるEMIの影響を抑えるには、電源インピーダンスを小さくすることが有効である。これは、デバイスに供給される電荷が同じであれば（流れる電流が同じならば）、オームの法則によりインピーダンスが小さいほど電源電圧変動は小さくなるからである。さて、この電源のインピーダンスを小さくする一般的な方法は、デバイス近傍の電源配線とグラウンドの間にキャパシタンスを置くことである。しかし、キャパシタンスの実装部分に存在するインダクタンスにより、高周波数成分ではその効果も小さくなってしまふ。そこで、基板内の電源配線を接地電位の広い導体面（グラウンドプレーン）で挟み込むことで、擬似的に電源とグラウンド間にキャパシタンスを作成し電源のインピーダンスを落とし、EMIを抑える方法が取られる。図2は、この方法を解析上で確認するための電磁界解析モデルの一例である。モデル(a)は、電源配線がグラウンドプレーンに挟み込まれていない未対策モデル、モデル(b)は挟み込まれている対策モデルである。さらに本解析モデルは、デバイスの電源とグラウンド間はショートとして表し、その他の実装部品には、それぞれの周波数特性を回路解析で組み込み電磁界解析に受け渡して、解析を実施している。

図3は、両基板の基板上4mmにおける電界分布を表示した結果である。モデル(a)の電源をグラウンドプレーンで挟み込んでいない場合、基板中央の電界分布が強くなり、基板の周りや基板上部へ大きな放射をしているが、モデル(b)の電源配線をグラウンドプレーンで挟み込まれた構造を

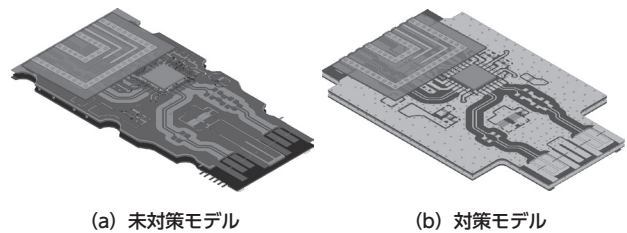


図2 電磁界解析モデル

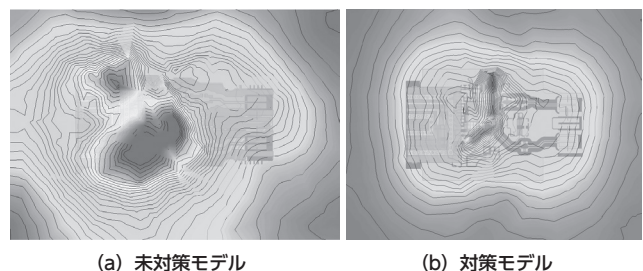


図3 解析結果

取った場合は、電界の放射が小さくなっており、この手法の有効性がわかる結果となった。

3-2 EMSへの応用

光トランシーバは、**図4**に示す構造になっており、金属筐体の中には、制御用の基板 (Printed Circuit Board : PCB) の他に電気信号を光信号に変換するモジュール (Transmitter Optical SubAssembly : TOSA) と光信号を電気信号に変換するモジュール (Receiver Optical SubAssembly : ROSA) が近接して組み込まれている。このような場合、モジュールや基板からの電磁放射が他のモジュールや基板上の電源や素子に影響を与える場合も少なくない。このようなEMSの対策の検討には、2通りの方法が考えられる。1つは、電磁放射をしているソース側 (OSAもしくは基板) での対策、もう1つは、影響を受ける側での対策である。一般的には、ソース側の対策の方が3-1で記述したEMIへの検討と同様であるため、簡単ではある。しかし、EMIが問題にならない微弱な電磁放射により影響を受けてしまうような場合は、その受け手側での対策が必要になる。この場合、外部からの電磁波がどのように影響を受けるデバイス内に侵入しているのか、その経路を明らかにし、対策を検討する必要がある。ここでは、TOSAからの放射がROSAに影響を与えており、その影響を電磁界解析上で明らかにし、その対策を電磁界解析で行った例を示す。

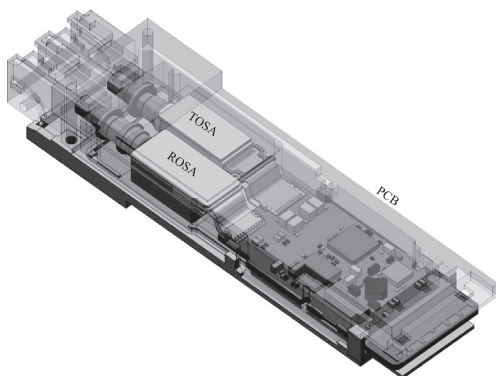


図4 光トランシーバの構造

図5に解析モデルを示す。ここではTOSAからの電磁放射ノイズ (以下、ノイズ) がROSAに影響を与えていることが実験的にわかっていたので、解析モデルを単純化するためTOSA側は簡易的なアンテナに変更した。解析モデルの単純化は、初期解析における解析時間を短くするばかりか、対策検討時にも適応することで、解析時間の短縮が図られるからである。さて、初期解析結果を確認すると、当初ROSA側面にあるメタライズのない開口部からノイズが侵入していると思われていたが、実際は、ROSAのパッ

ケージ上にある実装パットの方向 (**図5**の破線矢印の方向) から侵入していた。この実装パット部分は、高速信号配線部と電源配線部に分かれており、高速信号配線はグランドプレーンで完全にシールドされ、ノイズから保護されており、ノイズが高速信号配線に励起することはなかった。一方、電源配線は、グランドのシールド性が弱く、結果として、ノイズが電源配線に励起されROSA内に侵入していた。

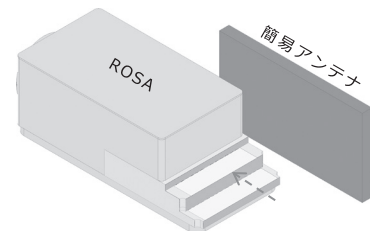


図5 EMSの解析モデル

次に、このノイズをROSA内に伝播させない方法を検討する必要がある。ここでは、ROSAのパッケージ内部へノイズが侵入できない回路構成の追加を行った。

3-3 SIへの応用

高速な電気信号伝送が進む光トランシーバでは、NRZ (Non-Return-to-Zero) 信号以外にPAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4) 信号での伝送を行っている。この理由は、基板上に高速なNRZ信号を伝播させるには、高速信号になるほど広帯域な周波数成分が含まれるので、高速信号になるほど、高周波成分まで問題なく伝送させなければならない。反面、高周波になるほど、基板の誘電損失や導体を基板に密着させるための表面粗さ等の損失による減衰が大きくなるので、単純にNRZ信号を高速化するだけでは伝送速度を向上させることが難しくなっているからである。そのため、NRZ信号にて伝送速度を一定に保ったまま伝送レートを向上させる方法として、伝送するチャンネルを増やす方法が考えられるが、これには、基板上に追加配置するデバイスのスペースや高速信号配線の取り回しスペースが必要となる。そこで、伝播するパルスの振幅を0と1以外に閾値を設けるPAM信号が注目されている。PAM4信号では、電圧値が4つのレベルに分けられ、これにより伝送速度を変えずに2倍の伝送レートを得ることができる。一方で、NRZと単純に比較すると、最も低い電圧値は1/3となる。このため、損失がSIに与える影響を予め電磁界解析上から見積もる必要がある。

図6は、SIの解析モデルの一例である。解析モデルには各種伝送線路が配置されている。その線路とは、長さの異なる伝送線路と伝送線路の一部が内層に落ちるように配線されている伝送線路である。本解析モデルは、2D-基板CAD

データに厚みを与えて解析モデルを作成している。また、解析モデルに取り込んだ配線は、伝送線路とグランドパターンの一部にしている。これは、SI解析では、信号が伝播する伝送線路とそのリターン電流が流れるグランドだけあれば十分であり、経験上、不必要と思われるグランドパターンを削除したためである。

図7は、図6の各種線路を周波数領域で解析した伝送特性を示した結果である。Insertion Lossが0に近いほど、損失なく伝送できていることを意味する。一部の線路は、内層を通すため外層から内層に落とす、ビア^{※1}やランド^{※2}を必要とするが、各種線路に大きな特性差は現れておらず、良好な特性となった。山と谷の間隔が異なる線路があるのは、線路長の違いである。さて、図7の周波数領域の伝送特性の結果から時間領域の波形であるPAM4信号がどのように歪むのかはわからない。そこで、電磁界解析結果を回路解析に引き渡し、時間領域の解析を行った結果を図8に示す。

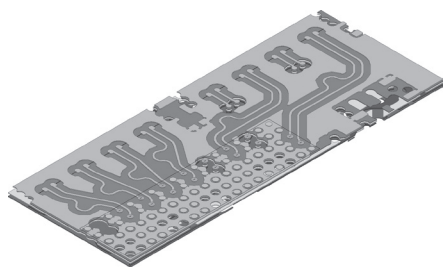


図6 SIの解析モデル

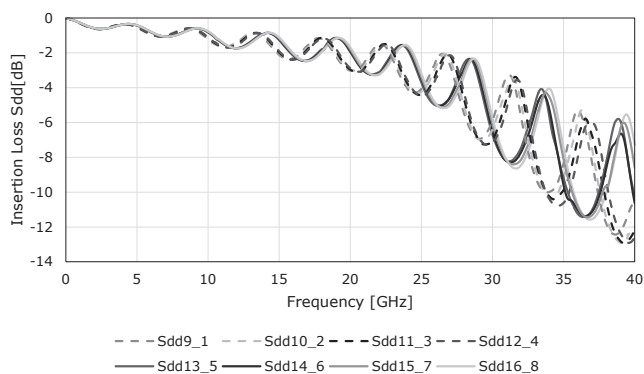


図7 伝送特性

図8の下部の実線が回路解析上で与えたランダムなPAM4信号である。上部の実線は、下部の実線を特定の時間で切り取り、各々を重ね合わせた結果であり、アイパターンと呼ばれる。この結果、4つの電圧レベルが分離し、アイと呼ばれる開口が十分広くとれている。今回のSI解析の結果から損失、ビア、ランドが伝送特性に与える影響は小さく、非常に良好な特性を有していることがわかる。

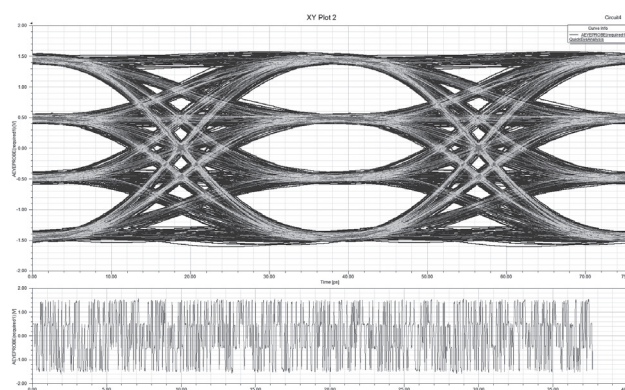


図8 PAM4信号波形解析結果

ばれる開口が十分広くとれている。今回のSI解析の結果から損失、ビア、ランドが伝送特性に与える影響は小さく、非常に良好な特性を有していることがわかる。

4. 結 言

高速信号を伝播させるには、一般的な特性インピーダンスの不連続以外に、PIやEMI/EMSの影響を加味する必要があり、逆にEMI/EMSを検討するには、PIやSIからのアプローチが必要であるが、それには、電磁界解析（一部、回路解析も含まれる）が非常に有効な手段であることを示した。今後、光トランシーバの伝送速度は更に向上するが、ここに示した解決方法は、伝送速度に依存しない方法であり、本稿のような電磁界解析からのアプローチによる設計手法により次世代の光トランシーバの開発が進んでいる。

用語集

※1 ビア

多層PCBにおける層間を接続するために用いる縦方向の配線。微小径のドリルやレーザーを使用して作製される。

※2 ランド

ビアを作製するには、製造公差が発生する。この公差を吸収するためのビアの受け。また、ビアを多層に渡って連続して積み上げる際の接続強度を上げる役割もある。

参 考 文 献 -----

- (1) Howard Johnson, High Speed Signal Propagation : Advanced Black Magic, Prentice Hall (2003)
 - (2) Madhavan Swaminathan, Ege Engin, Power Integrity Modeling and Design for Semiconductors and Systems, Prentice Hall (2007)
 - (3) Henry W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, Wiley (2009)
-

執 筆 者 -----

大森 寛康 : 伝送デバイス研究所 主席

