

技術レポート

28Gビット/s超電気伝送における放射ノイズ防止と伝送距離延長を同時に実現する振幅補正機能付きコモンモードフィルタの開発

大峠 忍*・亀谷 雅明**

1. 目的

2010年6月に100Gイーサネット規格が米国電気電子学会(IEEE)によって承認されて以降、10Gビット/s(以下bpsと略記する)及び25Gbpsの高速伝送が加速度的に普及しつつある。100Gbps伝送の実現手段としては10Gbpsの信号線×10本とする他、より低消費電力化の為に25Gbpsの信号線×4本も規格化されている。日本でも平成21年度に総務省によりイーサネット向け超高速省電力光伝送技術の実現手段として、電気インターフェースの伝送速度を28Gbps級に向上させる事が計画された。しかしながら、図1に示す25Gbps超の光-電気変換回路においては高速シリアル差動伝送が使われ、差動信号にわずかでも非対称性が発生すると、10GHz超えの周波数領域にスパイク状のコモンモードノイズが発生し、その対策に苦勞している事例が報告されている。コモンモードノイズは線路をアンテナとして放射され易く、他の装置や自身の回路を誤動作させる原因となる。また、25Gbps超の高速伝送ではわずかなスキュー(差動信号のズレによる非対称性)がノイズの発生と同時に信号の振幅を減衰させ、伝送距離短縮の原因になり得る為その対策が必要である。

高速シリアル差動伝送における現状のコモンモードノイズ対策では、コモンモードチョークコイルを差動伝送線路内に挿入するか、電磁波吸収シート等を回路周囲に貼り付けてノイズを装置筐体から出さない手法が使われている。コモンモードチョークコイルは磁性体を使用する為、磁性体損失にて対応速度は10Gbps未満であること、8GHz以上では磁気結合の低下と線路内結合容量によりコモンモードノイズの通り抜けの可能性があること、および遮断されたコモンモードノイズは全反射し装置内に残留するといった課題がある¹⁾。電磁波吸収シートは対応速度が28Gbpsと

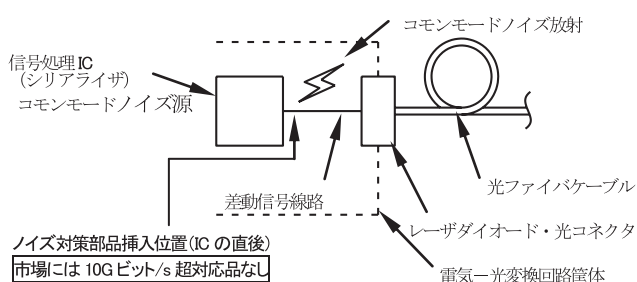


図1 高速シリアル差動伝送でのノイズ放射イメージ

*電子・電気技術科, **松江エルメック株式会社

いうものも存在するが、放射自体は防止不可能であり、また放射後のノイズを完全に吸収するものではなく、取り付け位置や量産性にも難がある。

また25G~28Gbpsはデータ伝送速度が非常に速く、データ0や1が1ビットだけ発生する最小パルス幅波形、すなわち1ユニットインターバル(以下1UIと略記する)波形はパルス幅40p~35.7ps、データが2ビット分連続する2UI波形でもパルス幅80p~71.4psときわめて狭い。差動信号間にスキューが発生するとパルス幅が小さいほど1UI波形に振幅減少が生じ、そのような信号をコモンモードフィルタに通すとコモンモードフィルタでの損失も加わる。特に25G~28Gbpsでは、1UI信号だけが大きく振幅減少し、パルス幅の広いビットパターン信号との振幅差がますます発生しやすくなり、さらに配線部の伝送ロスも加わり振幅差はより顕著になる。このようなビットパターンによって振幅差をもつ場合、多数波形の重ね合わせであるアイパターンは良好なパターンとならず、振幅の不一致によりその開口面積が小さくなり、ビットエラーを起こす原因となる。

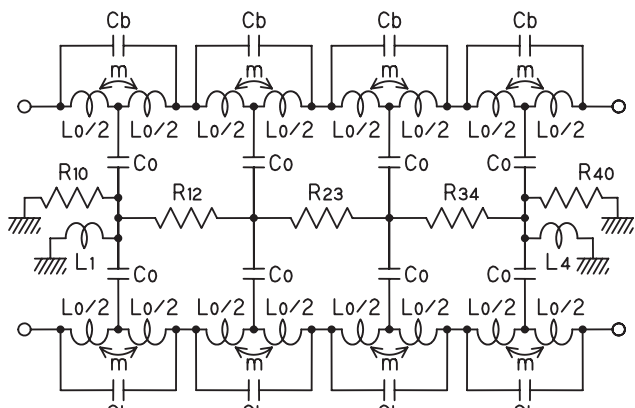
このような状況に対応するため、松江エルメック(株)では自社の保有する超高速遅延線技術を応用して、磁気結合に依存しない方式で新規なコモンモードフィルタ(製品名CDLDシリーズ、対応速度16Gbps、差動信号通過帯域15GHz)を既に開発している^{2),3)}。本レポートでは、これをもとに、28Gbpsが通過できる周波数帯域21GHz以上で、コモンモードノイズ除去帯域4G~21GHzを確保し、伝播遅延特性の周波数依存性が少なく20psスキューによる振幅差を補正できるイコライザ機能を有した、さらに高機能なコモンモードフィルタの開発に取り組んだので、その結果について報告する。

2. 方法

2.1 回路定数設計と回路シミュレーションによる検証

既に開発済みの遅延線応用回路方式による16Gbps対応のコモンモードフィルタを28Gbps対応可能とする回路定数設計を行った。その等価回路と回路定数を図2に示す。図2の等価回路と回路定数で回路シミュレーションを行い、差動信号通過特性Sdd21およびコモンモード信号通過特性Scm21を求めた。なお、両特性値の回路シミュレーションは、ANSYS社製高周波回路シミュレータAnsoft Designerにより行った。

回路シミュレーションにより得られた特性値を、予め設



Co : 0.375pF (2Ω直列抵抗) Lo : 0.7nH (0.1Ω直列抵抗)
 m : 0.4 (相互誘導の結合係数) Cb : 0.04pF (コイル間橋絡容量)
 L₁, L₄ : 2nH (ノイズ減衰用インダクタ)
 R₁₀, R₄₀ : 150Ω (ノイズ吸収抵抗)
 R₁₂, R₂₃, R₃₄ : 25Ω (ノイズ吸収抵抗)

図2 コモンモードフィルタ等価回路

定した技術目標値と比較することにより、回路定数の妥当性を検証した。なお、技術目標値は今までの開発製品及び市場要求から、コモンモードノイズ除去特性の指標であるScc21について4GHz～21GHzの帯域において15dB以上、また差動信号通過特性の指標であるSdd21について通過帯域21GHz以上とした。

さらに、図2のコモンモードフィルタのコモンモードノイズ除去能力を確認するために、スキューが発生した25Gbpsの信号線に対し、本コモンモードフィルタの有無で、コモンモードノイズがどこまで除去可能かを回路シミュレーションで評価した。この際に用いた評価用回路を図3に示す。コモンモードノイズ除去能力の回路シミュレーションには同じくAnsoft Designerを用いた。

2.2 検査治具およびシミュレーションと連携した28Gbps、21GHz超帯域の実測技術

高速伝送における高周波数帯域のコモンモードノイズの除去能力を、実測により検証するにあたっては、いくつかの工夫が必要となる。特にコモンモードフィルタを設置する検査治具による接触損失を可能な限り除去する必要がある。このため専用の検査治具を開発した。図4は、従来から松江エルメック（株）が独自に開発していた検査治具の

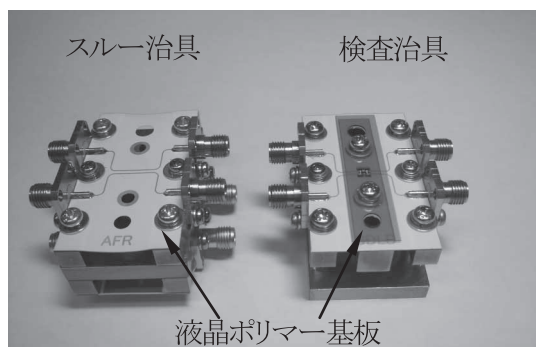


図4 検査治具の外観写真

改良型で、よりインピーダンス整合を図り、低損失化したものである。さらに基板材料に液晶ポリマーを使用することにより、治具損失の最小化を図った。このような治具の工夫に加え、アジレント・テクノロジー社製ソフトウェアPLTS（物理層テストシステム）を用いて、シミュレーションにより治具の影響をさらに除去した。

2.3 コモンモードフィルタの試作と機能検証

2.1の設計結果をもとに、コモンモードフィルタ試作品Aを作製し、Sdd21およびScc21の周波数特性を実測した。実測にあたっては、2.2項により検査治具の損失を除去した。なお、得られた実測値は、電磁界シミュレータANSYS社製Ansoft HFSSによる実構造の解析シミュレーション結果と比較して妥当性を確認した。また、回路の通過・反射特性を示すSパラメータをアジレント・テクノロジー社製ネットワークアナライザ（E5701C）により実測した。この実測Sパラメータを図3の評価回路に代入してAnsoft Designerを用いた回路シミュレーションにより、25Gbpsのノイズスペクトラムを求め、その状況を検証した。さらに20ps相当のスキューをネットワークアナライザ（E5701C）で作成した上で、アジレント・テクノロジー社製PLTSソフトウェアによりアイパターンを実測・描画し、アイパターン品質を確認した。

続いて、イコライザを内蔵したコモンモードフィルタ試作品Bの作製を行い、特性を評価した。抵抗負荷と容量負荷から構成されるイコライザにより、低周波数信号の振幅を減衰させるとともに、高周波数信号の振幅は維持させ、

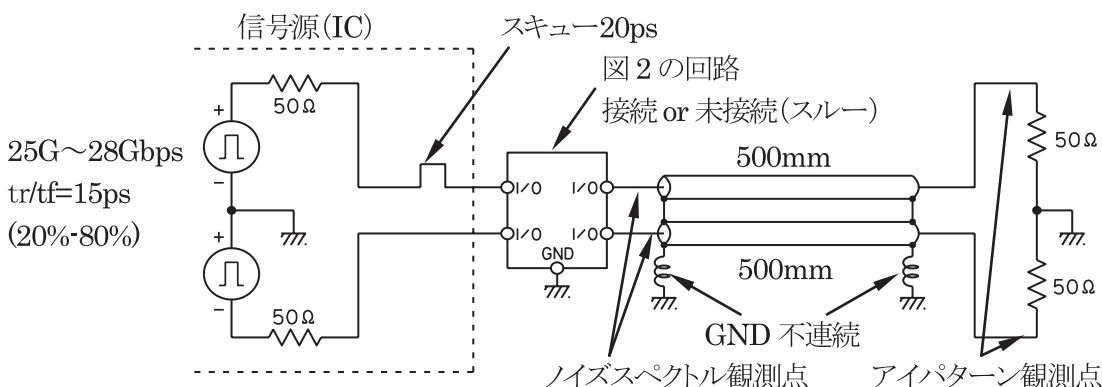


図3 25G～28Gbpsコモンモードフィルタ評価用回路

全周波数帯域で振幅の均一化を図り、アイパターンの開口面積を広げることを意図したものである。このような発想の妥当性を検証するため、事前にアジレント・テクノロジー社製オシロスコープ(86100D)内シミュレータにより、レーザに1pFの容量性負荷を接続させた場合の25GbpsのPRBS波形に対する応答波形を求め、アイパターンの変化を検証した。また、イコライザ内蔵コモンモードフィルタの実試作品Bについて、25Gbps、スキュー10psの差動信号に対するコモンモード波形とノイズスペクトラムを実測した。実測ノイズスペクトラムについて、試作品Aの評価の際の、実測Sパラメータと回路シミュレーションにより得られたノイズスペクトラムと比較検証した。

3. 結果

3.1 回路定数の設計

図5および図6に、図2の等価回路と回路定数により回路シミュレーションから求めた、差動信号通過特性Sdd21およびコモンモード信号通過特性Scc21の結果を示す。図には予め設定した技術目標値のラインも併せて示している。図5のSdd21については、曲線が0G~21GHzの帯域において目標値ラインを下回らないこと、図6のScc21については、4G~21GHzの帯域において目標値ラインを上回らないことが要求されるので、両方の特性ともに設定した技術目標値をクリアしていた。

また、図7に本コモンモードフィルタのコモンモードノイズ除去能力の評価結果を示す。コモンモードフィルタの有無によりコモンモードがどこまで除去可能かを、図3の

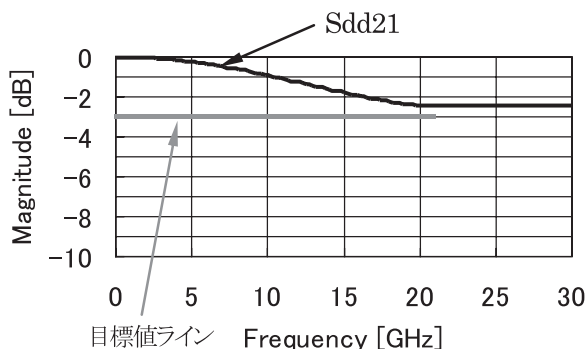


図5 差動信号通過特性Sdd21

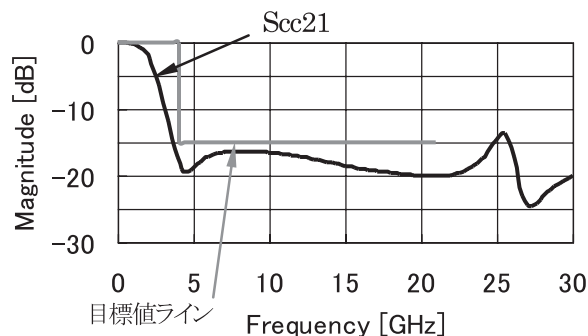


図6 コモンモード信号通過特性Scc21

評価用回路シミュレーションで評価したものである。20psのスキューが発生した25Gbpsの信号線に対し、左がコモンモードフィルタ未接続(スルー接続)の時の、右がコモンモードフィルタ接続時のコモンモードノイズのスペクトラムである。両者を比較すると、十分なノイズ除去が達成

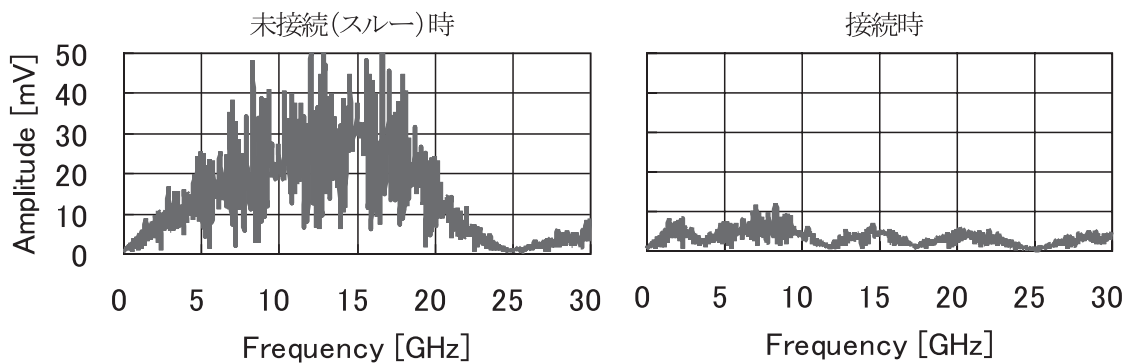


図7 等価回路でのコモンモードノイズ除去効果(25Gbps-20psスキュー時)

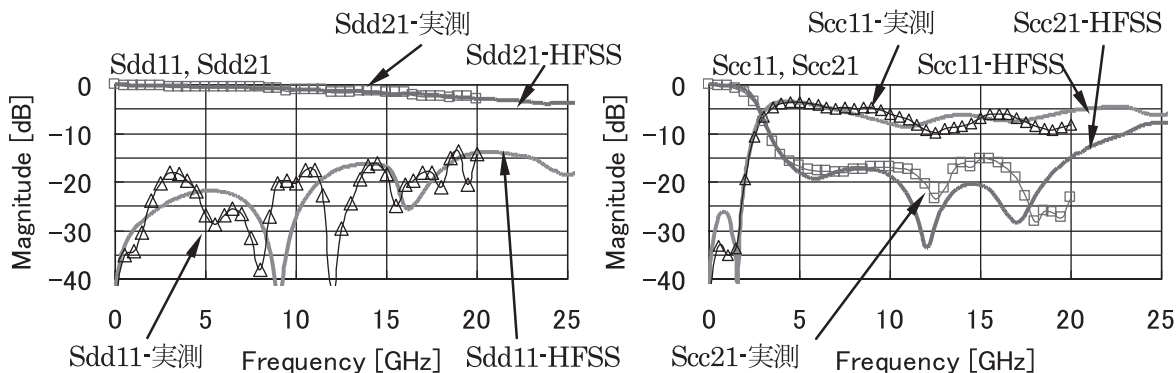


図8 試作品Aの周波数特性

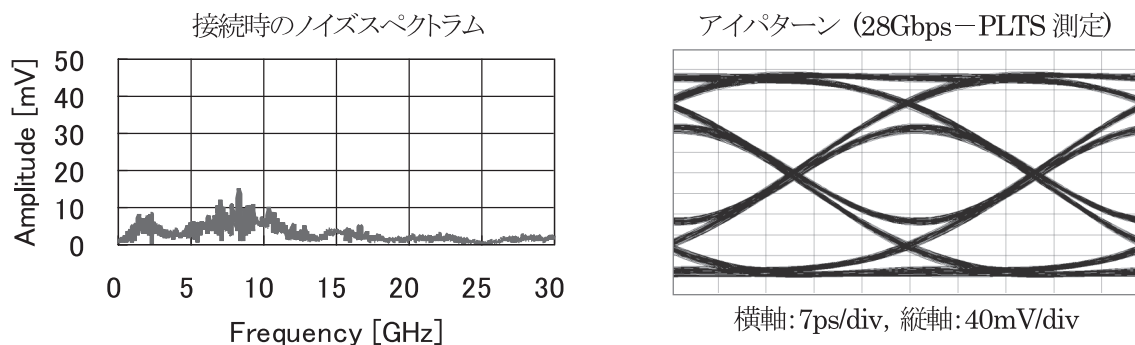


図9 試作品Aによるノイズスペクトラムとアイパターン

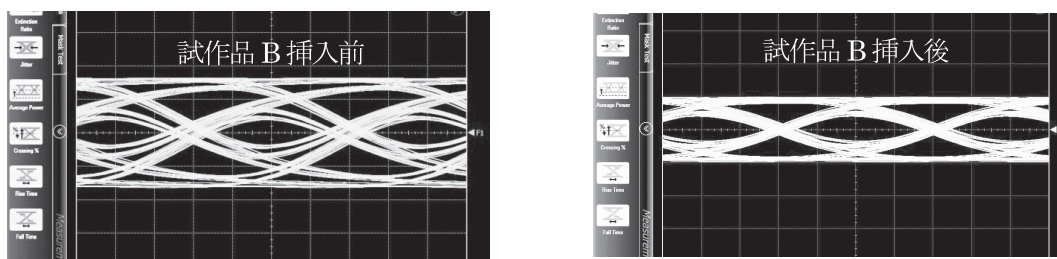


図10 試作品Bの25Gbpsアイパターン (横軸：10ps/div, 縦軸：200mV/div)

されていることがわかる。以上のことから、図2に示す回路定数は適正であると判断された。

3.2 コモンモードフィルタ試作品の機能検証

試作品Aの周波数特性を図8に示す。同図には、電磁界シミュレータHFSSによる結果も併載してある。また、参考のため図中には差動信号の反射特性Sdd11とコモンモード信号の反射特性Secc11についても実測値とHFSSによるシミュレーション結果を示してある。なお、これらの結果は、いずれも2.2の手法により検査治具による接触損失を除去した特性である。

図からわかるように実測とシミュレーションは良い一致を示しており、実測値は妥当であると考えられる。また、通過特性であるSdd21, Secc21に着目すれば3.1の回路定数の設計結果と同様に、技術目標値をクリアしていた。試作品Aは、差動信号は通過しやすく、コモンモード信号は通過しにくいという、コモンモードフィルタとして良好な特性を示した。

図9に試作品Aのノイズスペクトラムとアイパターンを示す。ノイズスペクトラムは25Gbpsの場合、アイパターンは28Gbpsでスキューが20ps相当の場合である。ネットワークアナライザの測定周波数帯域が20GHzまでであるため、20GHz以上のスペクトラムは参考程度であるが、20GHz以下の帯域では、ノイズ除去機能が有効に働いていることがわかる。一方でアイパターンにおいては、アイの開口部面積が若干小さくなっており、改善の余地があった。開口部が小さくなったのは、周波数によって振幅差があり振幅の均一性が劣るためと考えられた。

試作品Aにイコライザを内蔵した試作品Bについて、イコライザによる振幅均一化効果に基づく、アイパターンの改善を検証した結果を図10に示す。左が容量性負荷の接続

が無い場合、右が1 pFの容量性負荷を接続した場合のアイパターンを示している。容量性負荷によって閉じたアイを開かせることに成功しており、開口部面積が大きくなっている。

試作品Bの25Gbps、スキュー10psに対するコモンモード波形とノイズスペクトラムの測定結果は、特に結果は示さないが試作品Aに対する図9左の結果と一致した傾向であった。このように、イコライザ内蔵型の試作品Bは試作品Aのコモンモードノイズ除去性能を保ったまま、アイパターンの開口部面積を大きくすることができ、より高機能なコモンモードフィルタであった。

4. まとめ

28Gbps超高速シリアル伝送向けにコモンモードフィルタを開発した。測定機器を用いて25Gbpsでの実測を行い、コモンモードフィルタによるスキューの解消およびコモンモードノイズ除去が実現されていることを確認した。さらにイコライザの内蔵により、振幅の均等化および閉じたアイパターンを開かせる事に成功した。

文献

- 1) 坂本幸夫, 「図解 コモンモードとEMC・ノイズ対策設計」, 工業調査会, 2009.
- 2) 亀谷雅明, 曾田康男, 大峠忍, 吉野勝美, ノイズを吸収消滅する10Gビット/s超対応コモンモードフィルタ, 電磁環境工学情報EMC, 2011, No. 283, p. 60-82.
- 3) M. Kameya; Y. Sota; S. Otao; K. Yoshino. Novel Common Mode Filter for Ultra-High Speed Transmissions Exceeding 10Gbit/s. Journal of the Society of Electrical Materials Engineering. 2011, vol. 20, no. 2, p. 109-116.