

シミュレーションを活用した車載 Ethernet のノイズ耐性に関する設計要素検討

技術管理部 EMC 評価技術室 坂原 貞宏
山下 紘輝

1. 取組背景

近年の自動車業界では安全機能や自動運転機能の発展に向け、大容量・低遅延での信号伝送が求められる。また、車載通信では搭乗者の安全面に関わることから誤動作を起こしてはならないため、非常に高いノイズ耐性が必要になり、実現に向け取り組んでいる。

新たな通信方式として注目されている車載 Ethernet は差動伝送方式で本来高いノイズ耐性を持つ。しかし、2 線の線路長が異なるなどバランスが崩れる設計を施すとノイズ耐性が低下してしまうが、各設計要素がノイズ耐性へ寄与する大きさは分かっていない。そこで、今後採用が増加すると考えられる車載 Ethernet 1000 Base-T1¹⁾（以下、1000 Base-T1）を対象とし、シミュレーションを活用して各種設計要素のノイズ耐性への寄与の大きさを求め、設計指針の作成を行った。具体的にはノイズ耐性を表すミックスモード S パラメータ S_{dc11} を評価指標とし、各種設計要素がノイズ耐性へ与える影響について検証した結果について述べる。

2. モード変換とミックスモード S パラメータ

2.1 差動伝送でのモード変換

差動伝送方式における信号伝送を図 1 に示す。差動伝送ではレシーバで D+と D-の電位差を読み取ると、ケーブルに重畳するコモンモード(同相)ノイズがキャンセルされる。しかし、D+と D-でバランスが崩れた場合、D+と D-で到達する信号の大きさ・タイミングが異なるため、ノイズをキャンセルできず誤動作を引き起こす可能性がある。本現象は、ノイズの一部がコモンモードからディファレンシャル(差動)モードへ変換されることから、モード変換を起こすと表現される。

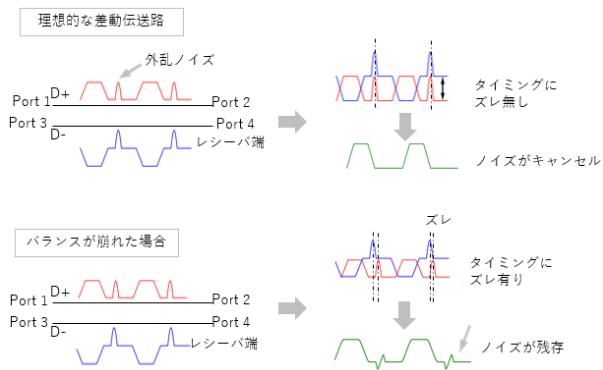


図 1 差動伝送における信号伝送およびモード変換

2.2 ノイズ耐性を表すミックスモード S パラメータ

差動伝送路におけるコモンモードとディファレンシャルモードそれぞれの反射・伝送特性およびモード変換特性を表す指標としてミックスモード S パラメータがある。本検証で使用するミックスモード S パラメータ S_{dc11} を式(1)に示す。 S_{mn} はシングルモードの S パラメータであり、m, n は図 1 の Port 番号を表している。 S_{dc11} は値が大きくなるほどモード変換が大きく生じることを表す。すなわち S_{dc11} が大きいほどノイズ耐性が低く、小さいほどノイズ耐性が高いことを表す。そのため、 S_{dc11} はノイズ耐性を定量的に表しているといえる。

$$S_{dc11} = \frac{1}{2} (S_{11} - S_{31} + S_{13} - S_{33}) \quad \cdots(1)$$

3. 取り組み内容

1000 Base-T1 では回路構成・定数が規定されている。その他設計要素として、アートワーク（以下、AW）設計および部品選定が存在する。しかし、AW 設計や部品選定が S_{dc11} へ与える影響は不明である。そこで、1000 Base-T1 のこれら設計要素が S_{dc11} へ与える影響の大きさを検証し、設計指針を作成した。

検証はシミュレーションツールである Ansys Electronics Desktop[®] を用いて行った。

3.1 AW 設計が S_{dc11} へ与える影響の検証

差動伝送路の AW 設計を行う際、各線の太さや周囲 GND を差動配線へ近づけるなど、検討すべきパラメータが数多くある。そこでノイズ耐性観点での各パラメータの影響度および設計指針を作成するため、検証を実施した。

3.1.1 検証内容

基準とする AW(以下、基準 AW)から各パラメータを変更し、どれだけ S_{dc11} が変化するかシミュレーションを実施した。基準 AW は図 2 の AW で、図 3 の回路構成である。差動配線のリファレンス層が変化する箇所にて分離するため、コネクタ～コモンモードチョーク(以下、CMC)を A ブロック、CMC～物理層 トランシーバ (以下、PHY) を B ブロックとした。基準 AW の設計値は表 1 の通りである。

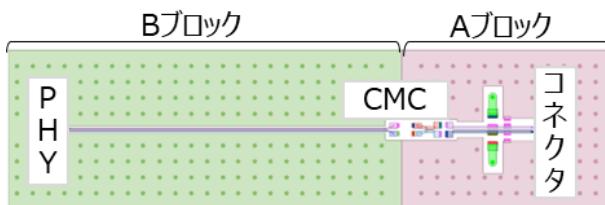


図 2 基準 AW

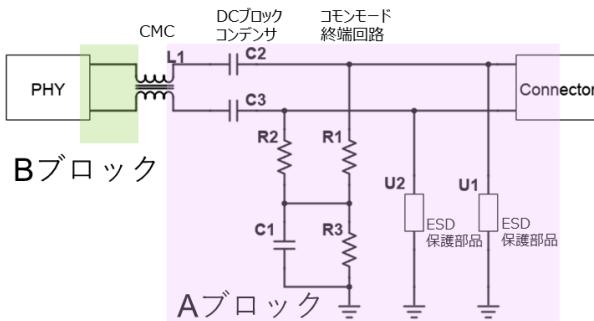


図 3 1000Base-T1 MDI インターフェース回路

表 1 基準 AW の各パラメータ

パラメータ		設計値
基板厚さ [mm]		1.2
層数		8
A	配線幅 [mm]	0.3
	リファレンス層	L7
	差動インピーダンス [Ω]	100
	信号線端～GND端距離 [mm]	0.6
B	配線幅 [mm]	0.13
	リファレンス層	L3
	差動インピーダンス [Ω]	100
	信号線端～GND端距離 [mm]	0.26

変更したパラメータを表 2 に示す。変更したパラメータは各種設計値に加え、基板の仕上がり精度（以下、製造バラツキ）を考慮した項目を採用した。製造バラツキを考慮した理由は、基板の製造クラスによる仕上がり後の許容差がノイズ耐性へ影響があるか検証を行ったためである。製造バラツキは JIS C 5014:1994²⁾ クラス III の仕上がり導体幅・導体間げきの許容差を参考に決定した。各種設計値の検証を行う際、インピーダンス不整合など別事象での問題が生じることを防ぐため、差動インピーダンスが変化しないよう 2 線間の距離にて調整を行った。

表 2 変更したパラメーター一覧

ブロック	パラメータ	変更前	変更後
A	配線幅	0.3mm	0.5mm
	リファレンス層	L7	L3
	周囲GND削除	GND有り	GND無し
	配線-GND間距離	0.60mm	0.90mm
B	配線幅が異なる場合	D+: 0.30mm D-: 0.30mm	D+: 0.26mm D-: 0.34mm
	配線-GND間距離が異なる場合	D+～GND間: 0.60mm D-～GND間: 0.60mm	D+～GND間: 0.56mm D-～GND間: 0.64mm
B	設計値	配線幅: 0.14mm リファレンス層: L3	配線幅: 0.13mm Ref層: L2
	周囲GND削除	GND有り	GND無し
	配線-GND間距離	0.26mm	0.39mm
	製造バラツキ	配線幅が異なる場合	D+: 0.13mm D-: 0.13mm
		配線-GND間距離が異なる場合	D+～GND間: 0.26mm D-～GND間: 0.26mm
			配線幅: 0.09mm Ref層: L1
			D+～GND間: 0.30mm D-～GND間: 0.22mm

シミュレーションの流れを図 4 に示す。電磁界シミュレーションで配線の伝送特性を求める、その後回路シミュレーションで回路部品の特性を追加した。

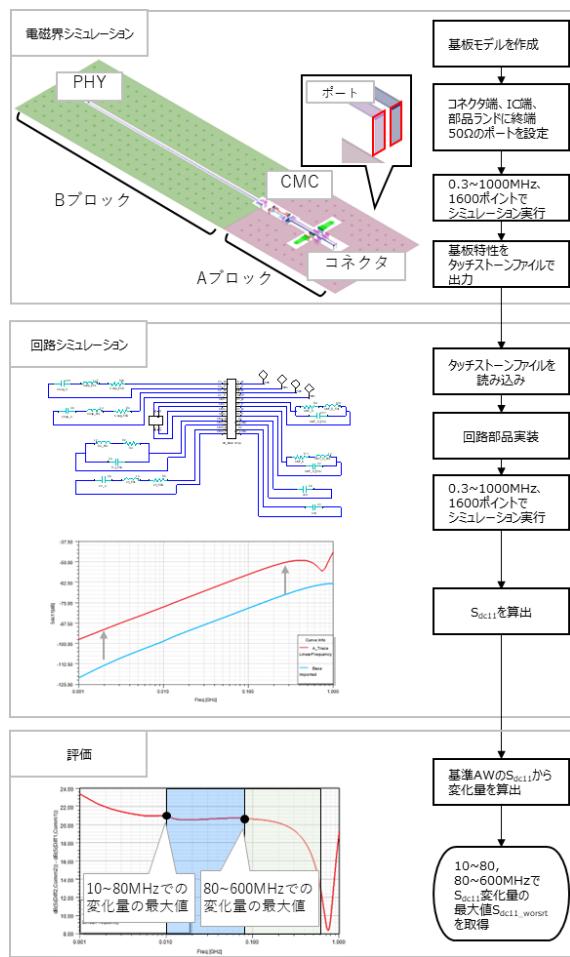


図 4 シミュレーションの流れ

シミュレーションによる各条件の考え方は以下の通りである。

○ シミュレーション周波数

1000 Base-T1 のコンプライアンステストの一種である OABR_PMA_TX_06³⁾と同様に 0.3~1000 MHz で 1600 ポイントとした。

○ 回路シミュレーションでの回路部品

抵抗およびコンデンサは 3 素子の等価回路、ESD 保護部品は理想的なコンデンサ、CMC は TDK 製 ACT1210G-800-2P-TL05[®] の簡易モデル (act_1210g_800_2p_tl05_s.mod) を使用した。

○ シミュレーション結果の評価

OABR_PMA_TX_06 にて規格線の傾向が変化する 10~80 MHz、80~600 MHz それぞれの帯域にて、 S_{dc11} の変化量 S_{dc11_worst} で評価を行った。 S_{dc11_worst} の定義を式(2)に示す。式(2)中の S_{dc11_Ref} は変更前 (基準 AW) での S_{dc11} 、

S_{dc11_Change} はパラメータ変更後の S_{dc11} を表す。

$$S_{dc11_worst} = \max(S_{dc11_Change} - S_{dc11_Ref}) \cdots (2)$$

S_{dc11_worst} は、各周波数範囲における S_{dc11} 変化量の最大値を表す。 S_{dc11_worst} が正の場合は S_{dc11} が増加することからノイズ耐性の低下を表し、負の場合はノイズ耐性の向上を表す。

3.1.2 検証結果

シミュレーション結果の S_{dc11_worst} を表 3 に示す。

表 3 AW 設計値を変更した際の S_{dc11_worst}

ブロック	パラメータ	変更前	変更後	S_{dc11_worst} [dB]	
				10~80MHz	80~600MHz
A	設計値 配線幅	0.3mm	0.5mm	4	9
	リファレンス層	L7	L3	9	12
	周囲GND削除	GND有り	GND無し	15	19
	配線-GND間距離	0.60mm	0.90mm	5	10
A 製造 バラツキ	配線幅が 異なる場合	D+: 0.30mm D-: 0.30mm	D+: 0.26mm D-: 0.34mm	28	28
	配線-GND間距離が 異なる場合	D+-GND間: 0.60mm D--GND間: 0.60mm	D+-GND間: 0.56mm D--GND間: 0.64mm	12	5
	設計値 配線幅+	配線幅: 0.14mm Ref層: L3	配線幅: 0.13mm Ref層: L2	-2	-4
	リファレンス層 周囲GND削除	GND有り	GND無し	3	7
B	設計値 配線-GND間距離	0.26mm	0.39mm	-2	2
	配線幅が 異なる場合	D+: 0.13mm D-: 0.13mm	D+: 0.09mm D-: 0.17mm	6	13
	配線-GND間距離が 異なる場合	D+-GND間: 0.26mm D--GND間: 0.26mm	D+-GND間: 0.30mm D--GND間: 0.22mm	-6	2

この結果より以下の傾向が得られた。

- A/B ブロック共に一部帯域を除き、製造バラツキが発生するとノイズ耐性が低下する。
- A/B ブロック共に周囲 GND を遠ざけるとノイズ耐性が低下する。
- A ブロックでは配線幅を太くし、リファレンス層を近づけるとノイズ耐性が低下する。すなわち、リファレンス層への結合を強くするとノイズ耐性が低下する。
- B ブロックでは配線幅を細くし、リファレンス層を近づけるとノイズ耐性が向上する。配線幅の変更値は小さく、リファレンス層変更の影響が支配的であると考えられる。すなわち、リファレンス層への結合を強くするとノイズ耐性が向上する。

上記をまとめ、以下 4 点の設計指針を作成した。各指針はノイズ耐性への影響が大きい順に並べている。

- 製造バラツキは大きくノイズ耐性を悪化させるため、極力精度の高い製造要件を使用する。(I より)
- 周囲 GND は近づけて配置する。(II より)

- コネクタ～CMC はリファレンス層への結合を弱くする。
(Ⅲより)
- CMC～PHY はリファレンス層への結合を強くする。
(Ⅳより)

3.2 部品選定が S_{dc11} へ与える影響の検証

部品選定を行う際、部品定数の許容差を考慮して選定する必要がある。許容差が大きい部品では部品特性のバラツキが大きく、差動伝送路のバランスが崩れることによりノイズ耐性が低下する可能性がある。許容差の小さい部品ではノイズ耐性は高くなるが、コストが高い。そこで、コストを抑えつつ高いノイズ耐性を持たせるため、各部品の許容差がノイズ耐性へ与える影響について検証を実施した。

3.2.1 検証内容

図 5 の回路図を対象に、回路シミュレーションによる検証を行った。シミュレーションの設定は 3.1.1 章の回路シミュレーションと同様である。変更したパラメータを表 4 に示す。許容差の値だけ部品定数が変わると仮定し、 S_{dc11_worst} にて評価した。

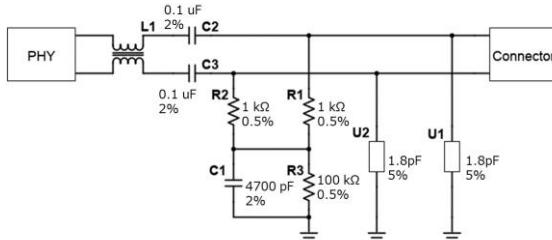


図 5 対象回路と各部品で基準とする許容差

表 4 変更したパラメーター一覧

部品番号	定数	許容差	
		変更前	変更後
R1, R2	1 kΩ	±0.5%	±1%
R3	100 kΩ	±0.5%	±1%
C1	4700 pF	±2%	±5%
C2, C3	0.1 uF	±2%	±10%
U1, U2	1.8 pF	±5%	±10%

3.2.2 検証結果

シミュレーション結果を表 5 に示す。この結果より以下の傾向が得られた。

- V. 各線に対称的に接続される部品(R1・R2、C2・C3、U1・U2) の許容差が大きくなるとノイズ耐性が低下する。各部品での影響の大きさは C2・C3 > U1・U2 > R1・R2 の順となる。
- VI. R3, C1 の許容差はノイズ耐性へ影響しない。

上記をまとめ、以下 3 点の設計指針を作成した。各指針はノイズ耐性への影響が大きい順に並べている。

- C2・C3 は許容差の小さい部品を選定する。
- U1・U2 は許容差の小さい部品を選定する。
- R1・R2 は許容差の小さい部品を選定する。

表 5 許容差を変更した際の S_{dc11_worst}

部品番号	定数	許容差		S_{dc11_worst} [dB]	
		変更前	変更後	10~80MHz	80~600MHz
R1, R2	1 kΩ	±0.5%	±1%	5.8	6
R3	100 kΩ	±0.5%	±1%	0	0
C1	4700 pF	±2%	±5%	0	0
C2, C3	0.1 uF	±2%	±10%	15	10
U1, U2	1.8 pF	±5%	±10%	6	6

3.3 結論

今回の検証により、①～⑦の指針を作成した。各傾向はノイズ耐性への影響が大きい順に並べている。

- ① 製造バラツキは大きくノイズ耐性を悪化させるため、極力精度の高い製造要件を使用する。
- ② 周囲 GND は近づけて配置する。
- ③ コネクタ～CMC はリファレンス層への結合を弱くする。
- ④ C2・C3 は許容差の小さい部品を選定する。
- ⑤ U1・U2 は許容差の小さい部品を選定する。
- ⑥ R1・R2 は許容差の小さい部品を選定する。
- ⑦ CMC～PHY はリファレンス層への結合を強くする。

4. まとめ・今後の展開

今回、車載 Ethernet 1000 Base-T1 を対象とし、シミュレーションを活用して各設計要素のノイズ耐性への寄与の大きさを求めるこことにより、設計指針の作成を行った。作成した指針を適用することにより、当社製品のノイズ耐性向上を進めていく。また、今回作成した指針の精度向上を継続的に行い、より一層のノイズ品質向上へ貢献していく。

Ansys Electronics Desktop[®]は、ANSYS ならび ANSYS, Inc.の登録商標です。

ACT1210G-800-2P-TL05[®]は、TDK 株式会社の登録商標です。

参考文献

- 1) IEEE Std. 802.3bp-2016, 「Amendment 4: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 1 Gb/s Operation over a Single Twisted-Pair Copper Cable」, [2016]
- 2) 日本規格協会, 「JIS C 5014:1994, 多層プリント配線板」, [2019]
- 3) T. Kirchmeier, G. Janker: 「OPEN Alliance Automotive Ethernet ECU Test Specification Layer 1」, Open Alliance, [2020]