

車載 Ethernet 物理層シミュレーション技術

Physical Layer Simulation Technology for Automotive Ethernet

川内 偉博*
Takehiro Kawauchi

岩田 章人
Akihito Iwata

浦山 博史
Hirofumi Urayama

泉 達也
Tatsuya Izumi

萩原 剛志
Takeshi Hagihara

高山 浩一
Koichi Takayama

近年、自動車には自動運転を含む高度運転支援システムの普及が進み、それに伴う通信量増大により、車載ネットワークに高速な車載 Ethernet が導入されつつある。安全性確保の観点から、車載ネットワーク製品は熱やノイズ等厳しい条件下での通信信頼性が要求されるため、EMC 性能が重要な指標の一つとなっている。しかし、これまでの試作による EMC 対策には、EMC 性能を確保するために、多くの開発期間や、開発コストが費やされてきた。そこで、コネクタ、ワイヤーハーネス、ECU 等から構成される車載 Ethernet 通信システムの物理層モデルを構築し、各条件下における通信システムの EMC 性能を効率的に検証するシミュレーション技術を開発した。

The introduction of high-speed automotive Ethernet to in-vehicle network has been accelerated by the increase of communication volume with spreading advanced driving assist systems (ADAS) including autonomous driving. Since in-vehicle network products require communication reliability even under severe conditions associated with extreme heat and noise to ensure safety, electromagnetic compatibility (EMC) performance is one of the important factors. However, conventional trial countermeasures required a lot of efforts and development costs to ensure EMC performance. Therefore, we have developed a simulation technology to efficiently verify the EMC performance of automotive Ethernet communication systems under various conditions by constructing the physical layer model of a communication system composed of connectors, wire harnesses, and electronic control units.

キーワード：自動車、シミュレーション、車載 Ethernet、物理層

1. 緒言

近年、自動車には高度運転支援システムの搭載が進み、自動運転システムも導入されつつある。これらのシステムの普及や高度化に伴い、車内の通信量が爆発的に増大することが予想される。従来の車内 LAN (Local Area Network) で使用されてきた CAN 通信⁽¹⁾では帯域が不足するため、企業や家庭内の LAN で使用されてきた民生 Ethernet 技術を発展させた、車載 Ethernet 通信規格 (100BASE-T1) が 2015 年に IEEE (米国電気電子学会) にて策定された。100BASE-T1 は CAN 通信より 50 倍以上の速度を実現できるが、IEEE ではさらなる高速通信を実現できる車載 Ethernet 規格の策定が進められている。

安全性確保の観点から誤動作が許容されない車載製品においては、民生製品よりも EMC^{*1}性能の要求が格段に厳しく、最も重要な指標の一つである。これまでは、目標の性能を満たすように EMC 対策を盛り込んだ電子制御ユニット (Electronic Control Unit: ECU) やコネクタ (Connector: CON)、ワイヤーハーネス (Wire Harness: W/H) を試作して、EMC 試験の結果から効果を検証するサイクルを回すことが一般的であった。特に ECU においては、試作・検証サイクルの増加に対する開発工数、コストの影響が大きく、効率的な対策検討のスキームが重要となる。

そこで、我々は ECU、CON、W/H 等の車載 Ethernet 通信システムの物理層モデルを構築し、様々な条件下におけ

る通信システムの EMC 性能を効率的に検証できる、物理層シミュレーション技術を開発した。これを活用することで、EMC 対策にかかる工数や開発コストの低減を図るだけでなく、対策部品の最適化を行うことで各製品コストの抑制も期待できる。本稿では、100BASE-T1 における物理層シミュレーション技術を紹介する。

2. 車載 Ethernet の概要

本章では、物理層シミュレーションの導入として車載 Ethernet の概要について説明する。

車載 Ethernet は前述の通り、民生 Ethernet 技術を発展させた技術である。そこで、本章は 100Mbps の伝送速度を実現する、民生 Ethernet (100BASE-TX) と車載 Ethernet (100BASE-T1) の差分を示す。

1 つ目の差分は通信方式とケーブルの本数である。民生 Ethernet では、送信・受信で 1 対ずつ、計 2 対の Unshielded Twisted Pair (UTP: シールドなし撚り対線) を使って片方向通信を行う。これに対して、車載 Ethernet は Hybrid 回路と呼ばれる送受信分離回路を導入することで、1 対の UTP で双方向通信を可能とした (図 1)。これにより、車載 Ethernet はケーブル本数を削減して軽量化と低コスト化を実現している。

2 つ目の差分は符号化とそれに伴う信号帯域である。民

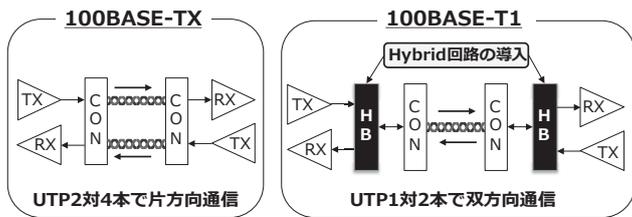


図1 通信方式とケーブル本数の比較

生Ethernetは、シンボルレートが125Mシンボル/秒である。しかし、2値のパルスで信号を伝送するために連続値を回避するように5ビットの内4ビットをデータとして扱い(4B/5B)、100Mbpsの通信速度を実現している。一方、車載Ethernetでは3値のパルス変調方式(PAM3)を用いて、1シンボルで3値、2シンボルで9値を表現し、その内8値の3ビットのデータとして扱う符号化技術(3B/2T)を利用している。これにより、民生Ethernetの約半分のシンボルレート(66.7Mシンボル/秒)でも100Mbpsを実現しつつ(図2)、車載ラジオなどで使用されるFM帯の電磁放射低減を実現している(図3)。

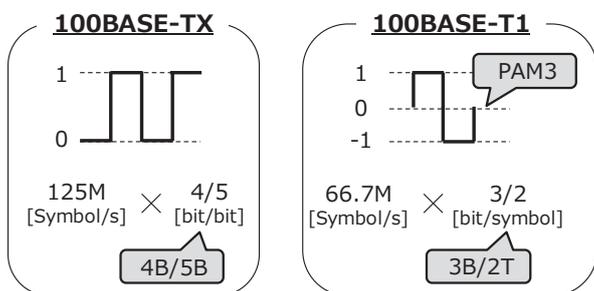


図2 符号化と信号帯域の比較

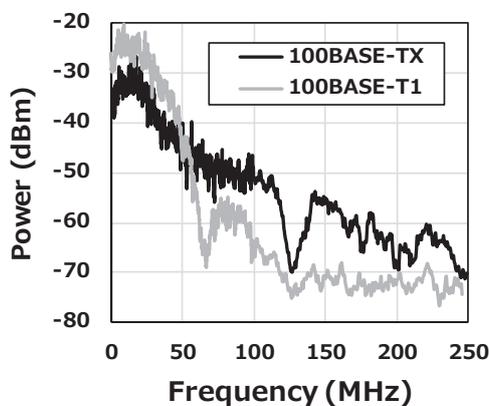


図3 送信信号の周波数特性比較

3. 物理層シミュレーションの概要

物理層シミュレーションの構成を図4に示す。



図4 物理層シミュレーションの構成

車載Ethernet信号の送受信を行うPHYトランシーバモデル(PHYモデル)、コモンモードチョークコイル等の受動部品や基板上の伝送線路を含むFront-end回路モデルから構成される2台の車載Ethernet ECUモデルがある。これらがW/H、CONモデルを介して接続され、通信システムを構成している。これらをKeysight Technologies, Inc.のシミュレーションソフトウェアAdvanced Design System(ADS)で構築した。

物理層シミュレーションでは、ADSの解析エンジンを用いて、①信号波形の過渡解析と②通信システム全体及び各構成要素のSパラメータ解析が可能である。例えば、①の過渡解析では、PHY内部の受信波形をアイパターン^{※2}として表示することが可能である(図5)。ここで、ユーザーは外来ノイズを自由に設定できるので、様々な外来ノイズが印加された時の通信システムのイミュニティ性能^{※1}を定量的に評価することができる。さらに、②のSパラメータ解析によって、通信システム全体及び各構成要素の差動伝送信号の挿入損失やモード変換⁽²⁾などの特性を解析して、①のイミュニティ性能の分析と設計改良の検討を行うことが可能である。

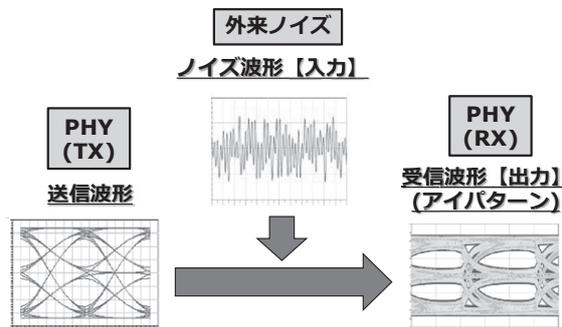


図5 時間応答による信号波形の解析例

4. シミュレーションモデルの構築

本章では、物理層シミュレーションを構成する各モデルについて構築手法とその特徴を説明する。

4-1 PHY送信 (TX) モデルの構築

100BASE-T1における送信ブロックを図6に示す。

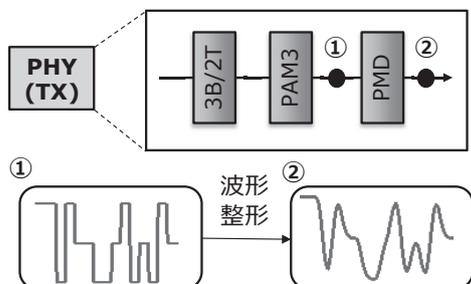


図6 100BASE-T1送信ブロック

100BASE-T1の信号波形に関連する部分は3B/2T、PAM3、PMD^{*3}ブロックである。各PHYメーカーで共通の3B/2T及びPAM3ブロックは、ADSでサポートされている基本ブロックを活用した。一方で、信号の波形整形を行うPMD送信ブロックはPHYメーカー毎に異なる特性を持っている。そこで、車載Ethernetの技術資料⁽³⁾を参照し、フィルタなどの波形整形基本回路を検討した上で、各PHYメーカーの実機波形に整合するように各回路の定数を設定した。時間領域における、あるPHYメーカーの実機送信波形と構築したPHY送信 (TX) モデルの送信波形の比較結果を図7に示す。両波形がよく一致していることがわかる。

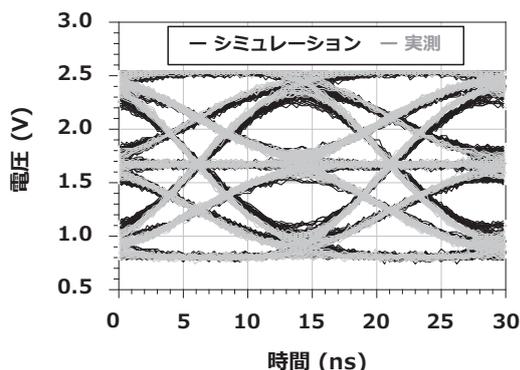


図7 実機とPHY送信モデルの整合性検証結果

4-2 PHY受信 (RX) モデルの構築

100BASE-T1における受信ブロックを図8に示す。

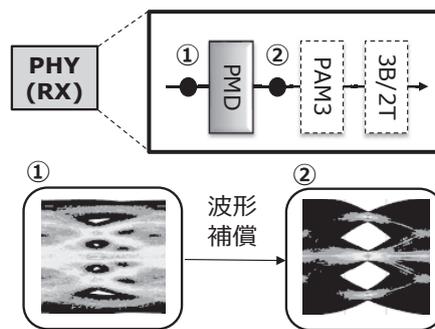


図8 100BASE-T1 受信ブロック

3章で記載したように、物理層シミュレーションでは受信波形のアイパターンで受信性能を評価するため、符号化や変調を行う3B/2TやPAM3ブロックは導入せず、波形の特性に寄与するPMD受信ブロックのみの設計とした。このPMD受信ブロックは信号波形の周波数特性を補償するイコライザなどで構成されるが、PHY内部の受信波形は測定不可であるため、実測とシミュレーションモデルの整合性を検証できない。そこで、通信事業者向けの民生Ethernet製品実績を持つ当社の知見を活用して、定数の最適化を行った。

4-3 Front-end回路, W/H, CONモデルの構築

これらのモデル化には、各々の特性を示すSパラメータを活用することとした。

物理層シミュレーションにおけるFront-end回路モデルは、基板配線とコモンモードチョークコイルやコンデンサなどの各受動部品から構成される。設計レイアウトを取り込んでそのまま解析できる利点から、電磁界解析ソフトウェアを活用して、Sパラメータを導出しモデル化を行った。

一方で、W/HとCONに関しては、配策による特性の変化を忠実に表現するために、ベクトルネットワークアナライザ (VNA)^{*4}とVNA接続用治具を用いた測定系(図9)を構築して、Sパラメータを実測した。W/HとCONは差動の入出力端子を持つため、4Portでの測定となる。

なお、測定値には治具の影響が含まれるため、ディエンベディング^{*5}による治具の特性を除去したW/HとCONのSパラメータからモデル化を行った。

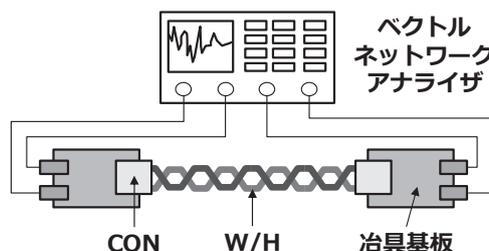


図9 W/H, CON測定系

5. 車載EMC試験のシミュレーションと検証例

物理層シミュレーションが、様々な条件下における通信システムのEMC性能を正しく検証できることを立証すべく、車載EMC試験の実測結果と物理層シミュレーションで計算した結果の整合性を検証することとした。本章では、その一例として車載EMC試験の1つであるBulk Current Injection (BCI) 試験⁽⁴⁾における両結果の整合性検証について述べる。

BCI試験は、ノイズ発生器からBCIプローブを介して、W/Hにコモンモード（同相）ノイズを注入し、製品の耐性を評価する試験である。図10に示す試験系を電波暗室に構築した。今回は車載EthernetのW/Hに対して、各周波数（1～100MHz）のノイズを注入した時に、EUT（被試験装置）側のPHYが出力するSQI値^{*6}を実測結果として取得した。

一方、物理層シミュレーションにおけるBCI試験構成を図11に示す。実機試験に使用した対向機とEUT（図11の開発ボード）は4章で記載した手法により、各モデルを構築した。ノイズを注入するBCIプローブに関しては、W/HとCONを含めた5PortでSパラメータを測定することで、1つのモデルとして構築した。

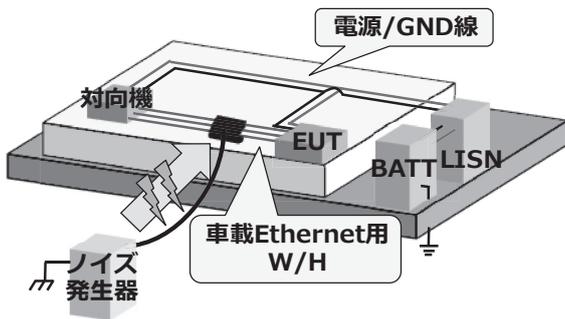


図10 BCI試験の実機試験系

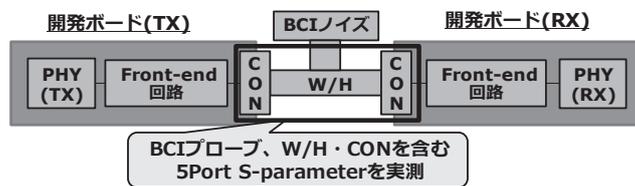


図11 BCI試験のシミュレーション構成

ノイズ注入周波数が1～100MHzの実測結果とシミュレーション結果を図12に示す。横軸はノイズ注入周波数であり、実線（右縦軸）はPHYのSQI値（実測値）、点線（左縦軸）はPHYの受信ノイズ量（シミュレーション値）を示

している。SQI値は値が小さいほど受信信号の信号品質が悪いことを示しているため、20～50MHz付近は信号品質を劣化させるほど大きなノイズ量が、逆に60MHz以上は信号品質に影響しない程度の小さなノイズ量がPHYに流入していることがわかる。シミュレーション結果からも、前記と同様のノイズ量の傾向が確認できることから、実測結果と非常に高い整合性を示していると言える。また参考結果として、受信ノイズ量が大きくSQI値が低いノイズ注入周波数25MHz付近と、受信ノイズ量が小さくSQI値が高いノイズ注入周波数70MHz付近の受信波形アイパターンのシミュレーション結果を図13に示す。

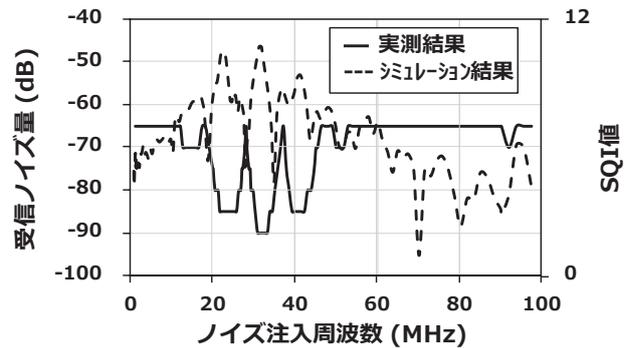
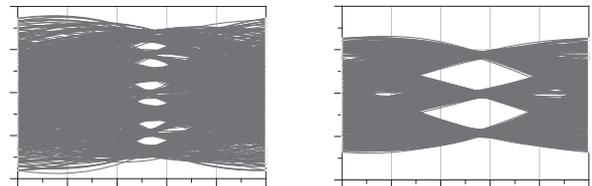


図12 BCI試験の実測とシミュレーション結果の比較



(a)ノイズ注入周波数25MHz付近 (b)ノイズ注入周波数70MHz付近

図13 受信波形アイパターンのシミュレーション結果

6. 結 言

EMC対策にかかる工数や開発コストの低減、そして対策部品の最適化を目的として、様々な条件下で通信システムのEMC性能を効率的に検証できる、物理層シミュレーション技術を開発した。この技術を用いて、通信システムで活用される当社関連製品（ECU, W/H, CON）のEMC性能検証と設計改良に向けた対策検証を進めている。今後はIEEEにて規格化が完了した1Gbpsや現在策定中の2.5Gbps以上の伝送速度を実現する車載Ethernetへの対応を進めていく。

用語集

※1 EMC

Electromagnetic Compatibilityの略で、電磁両立性のこと。電気・電子機器が動作中に他の機器やシステムに影響を与えず、加えて他の機器などが発する電磁波の影響を受けないことを指し、前者はEMI (Electro Magnetic Interference) もしくはエミッション性能と呼ばれ、後者はEMS (Electro Magnetic Susceptibility) もしくはイミュニティ性能と呼ばれる。

※2 アイパターン

信号波形を一定時間サンプリングし、重ね書きをした波形を指す。由来は波形を重ね書きした時に生じる中央の開口部が「目(アイ)」に似ていることから来ている。信号品質が劣化すると、信号の振幅や時間軸にバラツキが生じることになるので、アイは狭くなる。アイの幅や高さから、定量的に信号品質を評価することができる。

※3 PMD

Physical Medium Dependent の略。光や電気等の伝送媒体に応じて波形の変換や増幅を行う層。

※4 ベクトルネットワークアナライザ

高周波回路網の透過・反射電力といった周波数特性を測定する機器。

※5 ディエンベディング

測定用治具などの非対象測定物の影響を除去することで、対象測定物のみ特性を抽出する手法。

※6 SQI値

Signal Quality Indicatorの略で、相対的な信号の品質を表す。受信信号を本来のデータである送信信号 (Signal) とノイズ (Noise) に分離し、その比:SNR (Signal Noise Ratio) が算出され、その値に応じたSQI値が出力される。一般的に、SQI値が大きい程、ノイズが少なく信号品質が良好であることを示す。

・Ethernetは富士ゼロックス株式会社の登録商標です。

参考文献

- (1) ISO 11898-1:2015, Road vehicles -- Controller area network (CAN) --, Part 1: Data link layer and physical signaling
- (2) W. Fan, A. Lu, L. L. Wai, and B. K. Lok, "Mixed-mode S-parameter characterization of differential structures," in Proc. 5th Electron. Packag. Technol. Conf., Dec. 2003, pp.533-537
- (3) K. Matheus, T. Koenigseder, "Automotive Ethernet, 2nd ed.," Cambridge University Press, Cambridge (2017)
- (4) ISO 11452-4:2011, Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy --, Part 4: Harness excitation methods

執筆者

川内 偉博* :自動車新領域研究開発センター



岩田 章人 :自動車新領域研究開発センター
主査



浦山 博史 :自動車新領域研究開発センター
主席



泉 達也 :自動車新領域研究開発センター
グループ長



萩原 剛志 : (株)オートネットワーク技術研究所
室長



高山 浩一 :自動車新領域研究開発センター
部長



*主執筆者