

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04264

研究課題名（和文）伝導性妨害波に対するIC/LSIイミュニティ評価のためのマイクロモデル構築法

研究課題名（英文）Construction Method of Macro Model for Evaluation of IC immunity to Conducted Disturbance

研究代表者

松嶋 徹（Matsushima, Tohlu）

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00571415

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：車内環境におけるIC/LSIのイミュニティ評価のために、試験規格に用いられる治具の高周波拡張を行い、上限周波数を500MHzから1GHzまで拡張できる可能性を示した。また、パルス性妨害波に対するイミュニティ評価のためのパルス波生成回路を作成した。生成したパルス波が別途設定した要求を満たすことを実験により確認した。さらに、パルス印加時の波形を回路シミュレーションで求めた。例えば、ESDガンによる放電波形と比較したところ、妨害波源の出力インピーダンスの違いによる差が生じ、試験時に考慮する必要があることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年着目されている自動車の電動化は車内の電磁環境の劣悪化を招くという側面を持っている。一方で、自動運転などが普及するためにはより安全な通信環境を必要とする。したがって、劣悪な電磁環境の中で更に安全な通信を確立する手法や評価が必要となっている。本研究で得られた評価環境の高周波化や評価のためのパルス波生成は、車載機器の妨害波に対する耐力（イミュニティ）を評価するために必須の技術である。

研究成果の概要（英文）：For the immunity evaluation of IC/LSI in the in-vehicle environment, we extended the jig used in the test standard to high frequency, and showed the possibility of extending the upper frequency limit from 500MHz to 1GHz. In addition, a circuit for generating pulse waves was developed to evaluate immunity to pulsed disturbances. The switch used in the inverter was assumed to be the source of the disturbance, and the requirement for the rise time of the pulse was set to 10ns. It was confirmed experimentally that the generated pulse wave satisfied the requirements. Furthermore, the waveform at the time of pulse application was obtained by circuit simulation. For example, we compared the waveform with the discharge waveform from an ESD gun, and showed that the difference was caused by the difference in output impedance of the disturbance wave source, which should be taken into account during the test.

研究分野：環境電磁工学

キーワード：環境電磁工学 車載通信 イミュニティ

1. 研究開始当初の背景

インバータに代表されるスイッチングデバイスの動作が高速化し、それが発する妨害波も数十 MHz から数百 MHz の高周波域に達している。例えば、近未来に実現することが予想される電気自動車の自動運転を考えると、同じシステム内に車載三相インバータと自動車内外の状況を把握するセンサネットワークをはじめ、システムを制御するためのデジタル回路が混在する。モータドライバなどのスイッチング回路は、従来のシリコン(Si)系デバイスに変わる SiC や GaN の利用により、それらの機器から発せられる妨害波の周波数はより高くなることが予想される。

そのような環境においては図 1 に示すように発生した妨害波が車内のワイヤハーネスを介して IC に到達する。これらの妨害波により、センサー IC や制御 IC が誤動作すると、重大事故に発展する可能性が高い。そのため、個々の IC の対妨害波耐性(イミュニティ)を向上させることは、システムの信頼性や安全性を考える上でも重要である。

高いイミュニティを持ったセンサー回路やアナログ回路を設計するためには IC の詳細なモデルが必要である。しかし、IC を実装するプリント回路設計者は、必ずしも IC の詳細なモデルを得ることが出来ず、また例え詳細なモデルを入手した場合でもそれをを用いた解析には時間を要し、要求を満足する設計をなすには繰り返し計算が必要で膨大な時間を要するため実用でない。そのため、内部情報が秘匿され流通性が高く、回路計算が容易なマクロモデルが必要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上限周波数 1 GHz においてセンサーやアナログ IC の妨害波耐性を評価するためのイミュニティ(対妨害波耐性)の評価法およびマクロモデル構築法を提案することにある。また、イミュニティマクロモデルを IC 外部からの測定により求める手法があれば、IC のユーザーであるプリント回路基板の設計者が自身でモデルを作成可能となる。これにより、高いイミュニティを持った機器の設計が容易になり、システム全体の安全性・信頼性が向上すると考えられる。

申請者はすでに、アナログ回路の一種である LDO 電圧レギュレータを対象に正弦波状の伝導性妨害波に対するイミュニティモデルの構築を行い、その性能評価を行った。提案されたモデルは、後段回路に電源を供給する電圧レギュレータの入力電圧端子に正弦波の妨害波が印加された際の実出力電圧の変動を表現することが出来る周波数領域のモデルである。

一方で、これらのモデル化には課題が残されている。例えば、回路が線形であることが仮定されているが、実際には妨害波の振幅により反射特性が変化し、さらに高調波成分が発生することも予測される。また、強い非線形性を持つ素子を評価する際には、妨害波形状も正弦波だけでなくパルス性妨害波も考慮する必要がある。

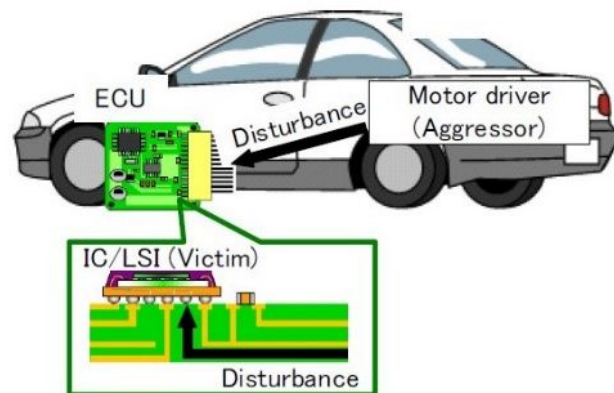


図 1 車内のハーネスを介した妨害波伝搬

3. 研究の方法

車載のパワーエレクトロニクス機器によって発せられた妨害波は、鋭いピークを持ち、回路の共振により特定周波数で減衰振動する波形であることが知られている。鋭いピークを持つパルス波形と特定の共振周波数での減衰振動波形とでは、IC のイミュニティ特性への影響も異なると考え、本研究ではパルス波に対する IC のイミュニティ特性シミュレーション、イミュニティ試験のための治具の作成、またイミュニティ評価のための妨害波生成回路の作成を実施する。

4. 研究成果

4.1 車載通信システムのイミュニティ評価用電源系分離回路の設計

本研究では、伝導性妨害波の評価法である ISO11452-7 の高周波化を目的として BAN(Broadband artificial network)の高周波化を検討した。

BANは図2に示すように、高周波妨害源や測定対象と直流電源を高周波分離するために用いられ、上記規格では 250kHz - 500MHz の帯域で入力インピーダンスが定められている。本研究では、BAN の高周波帯域を 1GHz まで拡張することを検討する。ここで、新たに拡張する 500MHz - 1GHz における要求入力インピーダンスは、すでにある規格で定められた 500MHz までの値、すなわち 200 と設定した。また、BAN には最大 30A の直流電流を流せるようにする必要がある。

広帯域化を図るに当たり、(a)高周波用 BAN と(b)低周波用 BAN を分離して設計、作成した。低周波用 BAN についてはフェライトコアにエナメル線を巻きつけることによりインダクタを形成して用いた。高周波用 BAN については複数の市販のインダクタンスを直列接続して作成した。その際に、メーカーが公開している等価回路モデルを用いて回路計算を行い、100 MHz 以上の周波数帯における入力インピーダンスが要求仕様を満たすように設計した。作成した BAN の特性はベクトルネットワークアナライザを用いて S パラメータを測定し、

$$Z = Z_0(I + S)(I - S)^{-1}$$

により、Z パラメータに変換して、入力インピーダンスを評価した。ここで、 Z_0 は特性インピーダンス 50、 I は単位行列を表している。

測定によって得られた入力インピーダンスを図3に示す。この様に高周波用 BAN については 100MHz 以上の周波数帯域で ISO11452-7 で規定された入力インピーダンスの要求を満たしており、新たに拡張した 500MHz - 1GHz においても、同等の性能は有る。しかし、600MHz など一部の周波数ではインピーダンスが 200 と低下しており、それらの影響は別途評価する必要がある。

低周波用 BAN の特性は 100MHz 以下の周波数範囲で規格の要求仕様を満足していることを確認した。

4.2 パルス性妨害波に対するダイオード素子の応答特性

ここではパルス性妨害波に対する評価を行う。特に ESD(静電気放電：Electro Static Discharge)に対するイミュニティの評価を想定し、従来から用いられる ESD ガンによる評価と、近年注目されている TLP(Transmission Line Pulse)法による評価をシミュレーションにより比較する。

実際の実験による評価は後述するが、TLP 法により生成したパルス波をダイオード素子に印加した際の時間波形をシミュレーションにより求めた。この生成したパルス波は IEC 61000-4-2 に準拠した ESD の波形を模擬して印加し、通常の TLP 法の回路にフィルタ回路を付加することで波形生成を行う。図4に2種類の回路で生成した ESD の電流波形を示す。理想的な電流波形は ISO 61000-4-2 で定められた波形であり、ESD ガンを用いた場合を想定して等価回路による計算結果および TLP 回路に2種類のフィルタをそれぞれ追加して生成した波形を示す。

生成した ESD-HMM の波形を複数のダイオード素子に印加し、I-V 特性を比較した。試験法として一般的な ESD ガンによるものに比べて、TLP-HMM 回路で生成した ESD 波形に対する応答は、等しい I-V 特性にならない。特に ESD ガンに比べて最大となる電流や電

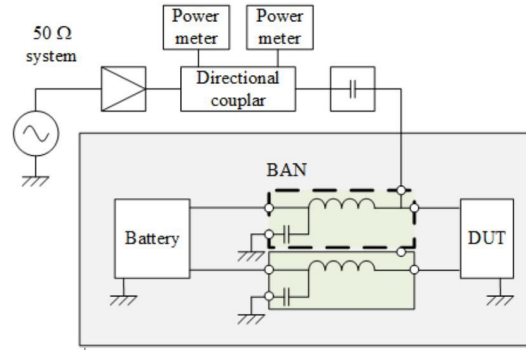


図 2 ISO 11452-7 イミュニティ評価系

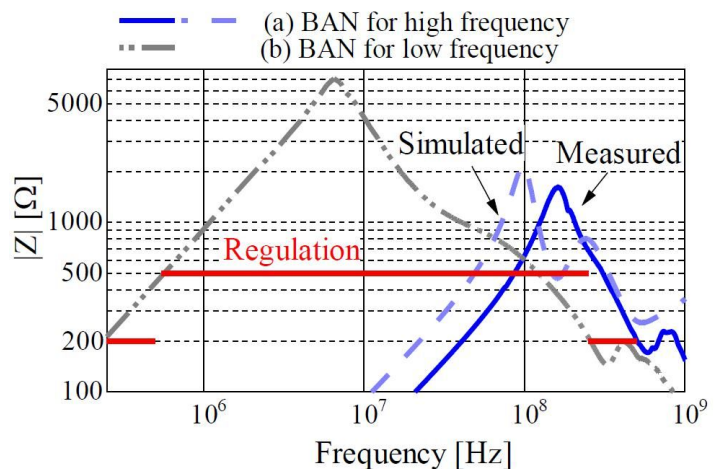


図 3 BAN の特性測定結果

圧は約 8 割程度となる。これは、ESD ガンと TLP-HMM 回路で信号源側のインピーダンスが異なるためと想定される。ESD ガンを用いる手法の置き換えとして TLP-HMM 回路を用いる場合は、出力インピーダンスの違いを考慮する必要があることを示した。

4.3 イミュニティ試験用妨害波パルス発生装置の開発

上記の TLP-HMM は ESD 波形を模擬するために立ち上がり時間が早く、高圧を発生する必要があるため、スイッチ部分の素子が高価となる。車載のインバータ素子が発するノイズは ESD に比べて波形に含まれる高周波成分が小さいと想定し、安価な TLP 生成回路を作成した。要求する仕様として、表 1 にまとめるように、スイッチ素子によって決定される立ち上がり時間は 10ns 以下、ピーク電圧は最大 300V 程度、パルス幅は可変とした。

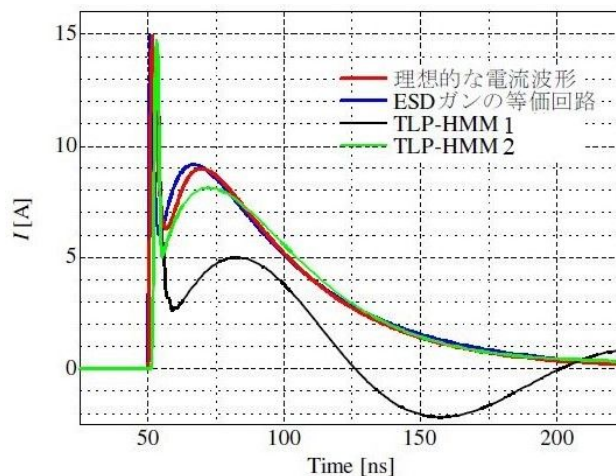


図 4 ESD 放電波形のシミュレーション結果

表 1 TLP 生成回路の要求仕様

	立ち上がり時間	ピーク電圧	パルス幅
値の調整	スイッチに固有	電源電圧で調整可	ケーブル長で調整可
要求仕様	$\leq 10 \text{ ns}$	$\leq 300 \text{ V}$	-

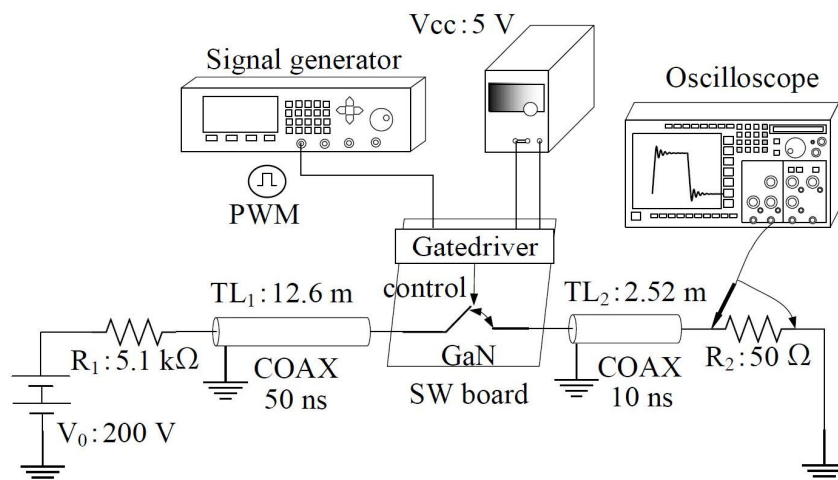


図 5 作成した TLP 生成回路

作成した TLP 生成回路を図 5 に示す。GaN 素子からなるスイッチを用いた。スイッチの駆動はパルス発生器によりトリガ信号を生成して行う。パルス幅はスイッチの左側にある伝送線路 TL1 の電気長により決まり、パルス発生器で生成するトリガ信号のパルス幅は生成するパルス幅に対して十分大きく設定している。生成したパルス波を図 6 に示す。立ち上がり時間は 7.7ns であり、ピーク電圧は電源電圧により調整可能であるが、本実験では 100V と設定し測定値は 102V であった。また、パルス幅は 100ns と設定し、測定値は 103ns であり、十分な精度でパルス波を生成できた。

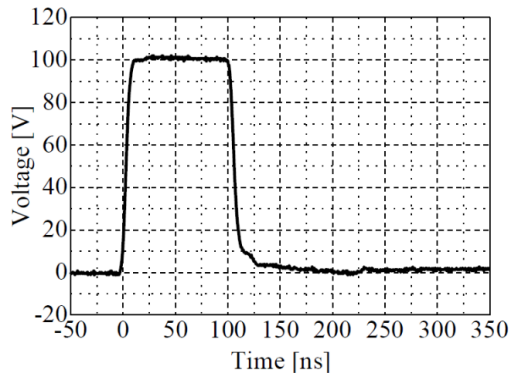


図 6 生成したパルス波

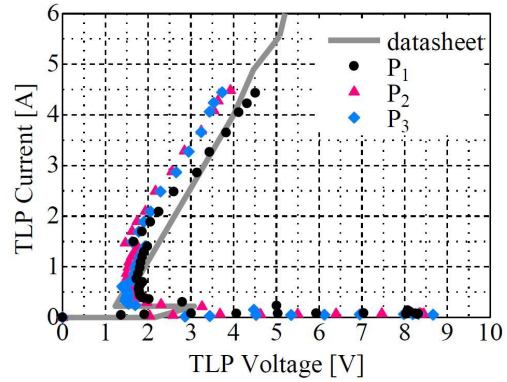


図 7 TLP 波による I-V 特性測定

生成したパルス波をダイオードに印加し I-V 特性を測定した。結果を図 7 に示す。この図には比較対象として、早い立ち上がり時間を持つ TLP 法で評価されたデータシート記載の結果も示されている。今回の実験結果と比較すると、同等の精度で評価できていることがわかる。今後は、この妨害波パルスの波形変形を行う回路を考案し、車載環境で生じる妨害波を模擬することを検討する。また、実際に車内の通信線に結合する妨害波波形を測定し、通信品質との関係を明らかにする。

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石橋 健太, 松嶋 徹, 福本 幸弘, 後藤 薫
2. 発表標題 車載Ethernetの信頼性評価に向けた 100BASE-TXのパルス性妨害波に対するパケットエラーシミュレーション
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米村貴翔, 菊池浩一, 松嶋徹, 福本幸弘
2. 発表標題 コモンモード電流推定のための信号源の平衡度を考慮した簡易シミュレーション法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三井 悠也, 松嶋 徹, 福本 幸弘
2. 発表標題 車載通信システムのイミュニティ評価用BAN(Broadband Artificial Network)の高周波化に向けた改良
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋 健太, 松嶋 徹, 福本 幸弘
2. 発表標題 妨害波パラメータに対するEthernet通信のパケットエラーレートの変化
3. 学会等名 第33回 エレクトロニクス実装学会 春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Mii, Tohlu Matsushima, Yuki Fukumoto
2. 発表標題 Investigation on Improving Frequency Range of BAN (Broadband Artificial Network) for Immunity Evaluation of an In-vehicle System
3. 学会等名 IEICE Technical Report
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tohlu Matsushima
2. 発表標題 Immunity modeling of linear voltage regulator considering large signal S parameter
3. 学会等名 The 1st Croatia-Japan EMC Workshop (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中清佑, 松嶋徹, 福本幸弘
2. 発表標題 高速GaNスイッチを使用した簡易TLP生成回路の開発
3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会九州支部学生会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中清佑, 松嶋徹, 福本幸弘
2. 発表標題 車載ノイズを想定した妨害波によるイミュニティ評価のためのTLP生成回路の作製
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石橋健太, 松嶋徹, 福本幸弘
2. 発表標題 パルス性妨害波に対するEthernetのイミュニティ評価におけるシミュレーションを用いたフレームエラーレートの変化に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tohlu Matsushima, Koichi Kikuchi, Kenta Ishibashi, Yuki Fukumoto, Nobuo Kuwabara
2. 発表標題 Cancellation of common-mode excitation by SCD21 and SCC21 of CMF due to phase relationship between DM and CM voltages
3. 学会等名 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関