

車体を伝送路とした電界通信に関する研究

松井, 允希 / MATSUI, Yoshiki

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

62

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2021-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00023983>

車体を伝送路とした電界通信に関する研究

ELECTRIC FIELD COMMUNICATION USING A CAR BODY AS A TRANSMISSION MEDIUM

松井 允希

Yoshiki MATSUI

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

This paper describes electric field communication using a car body as a transmission medium. The number of wire harnesses can be reduced by the communication. There are two serious problems: the car body earth problem and the large transmission medium problem. We propose new methods based on an equivalent circuit model of the electric field around the car body to solve the above-mentioned problems. Our experimental and simulation results show that our methods can effectively solve these problems.

Key Words: intra-body communication, car area network, electric field communication, electro-optical conversion tool.

1. 序論

インターネットの普及に伴い、近年では様々な電子機器が身の回りにあふれるようになった。モノとモノ同士がインターネットを通して繋がることを **Internet of Things(IoT)**[1]という。IoT が発展し様々なモノが繋がることで、情報のデータ化やそれに基づく自動化技術が発展し、新しい技術が実現可能になって来ている。そのうちの一つが車の自動運転化技術[2][3]である。自動運転の実現にはカメラやレーダーのようなセンサーを備えた車載機器が必要になり、車載機器の増加が想定されている[4]。しかし、それに伴いワイヤーハーネスの増加が問題視されている。図1に車載機器を接続するワイヤーハーネスを示す。

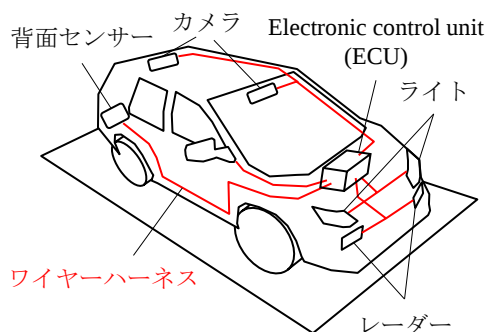


図1 車載機器を接続するワイヤーハーネス

ワイヤーハーネスとは、電源供給や通信に用いられる複数の電線の束と、端子やコネクタで構成された集合部品である。車載機器同士を接続し、人体における神経や血管のような役割を果たしており、カメラやレーダー、ライトや

背面センサーを自動車の脳の役割をしている **Electronic control unit(ECU)**と接続している。車載機器の増加に伴うワイヤーハーネスの増加によって、重量の増加による燃費の低下や長大化によるスペースの確保問題を解決することが重要である。現在はワイヤーハーネスの増加に伴う問題を解決するために、ワイヤーハーネスの軽量化やワイヤレス化が主に研究されている。私たちはワイヤーハーネスの数を削減するために、車体に電界通信技術を適応することを提案する。電界通信は電界を伝送路として利用するため、通信範囲が有線通信のように物理的に限定されることはなく、無線通信のように広範囲ではないため盗聴される可能性が低く秘匿性が高いという有線通信と無線通信の長所を併せ持っている。

本研究では、車体への電界通信適応可能性を実測とシミュレーションを用いて調査する。加えて、実利用シーンを想定した際に起こる問題点を挙げ、等価回路モデルをもとに解決策を示す。解決策に対する実測とシミュレーションを行い、解決策の妥当性を確かめる。

2. 車体への適応可能性調査

(1) 車体の周波数特性

電界通信の車体への適応可能性を調査するために、車体の周波数特性を測定した。図2は、車体の周波数特性測定時の実験風景を示している。送信機と受信機は、薄い絶縁フィルムの上から車体の側面の金属面に配置し、送信機からの信号が車体の金属表面に沿って伝播するようにした。信号は、図3に示すようなE/O-O/E回路[5][6]を介してスペクトルアナライザ(SPA)に入力された。このE/O-

O/E 回路は、電気/光コンバータ(EOC), 光ファイバ, および光/電気コンバータ(OEC)で構成されており、受信機と SPA を電氣的に絶縁するために使用された. E/O-O/E 回路と SPA は同軸ケーブルで接続されており、発泡スチロールによってアースグランドから分離されている. 図 4 に車体の周波数特性測定時の実験概要図を示す.



図 2 車体の周波数特性測定時の実験写真

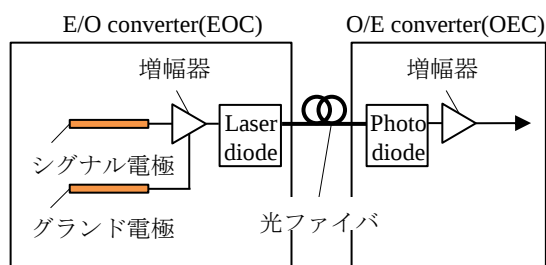


図 3 E/O-O/E 回路の構成図

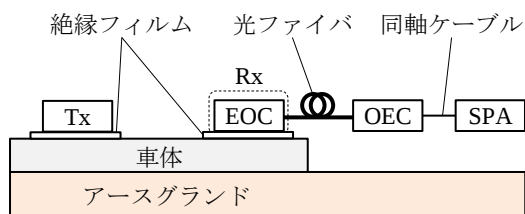


図 4 車体の周波数特性測定時の実験概要図

今回、周波数特性を測定する範囲として、1 MHz から 20 MHz を設定した. この周波数帯域は、現在 FeliCa などの近距離無線通信で主に使用される周波数が 13.56 MHz であることと、私たちが従来研究をしてきた人体通信での使用周波数が 6.75 MHz であることから決定した. 送信機は 1 MHz の周波数ステップで 1 MHz から 20 MHz に変化するように設定した. 送信電圧 V_T は、送信機のシグナル電極とグランド電極間のピーク電圧 V_{p-p} の差であり、1.9 V_{p-p} の正弦波信号である. 受信電圧 V_R は、EOC のシグナル電極とグランド電極間の電圧差である.

図 5 に実験結果を示す. 縦軸は信号減衰 G_{PL} を示し、横軸は周波数を示している. 信号減衰 G_{PL} は(1)式のように定義した.

$$G_{PL} [\text{dB}] = 20 \log_{10} (V_R/V_T) \quad (1)$$

最小値と最大値を比較すると約 5 dB の差があるが、1 MHz 間隔で比較すると G_{PL} の差は 1 dB 未満であることが分かる. このことから、1 MHz から 20 MHz の間では車体の周波数特性はおおよそフラットになった. したがって、車体に電界通信の適応は可能であると判断した.

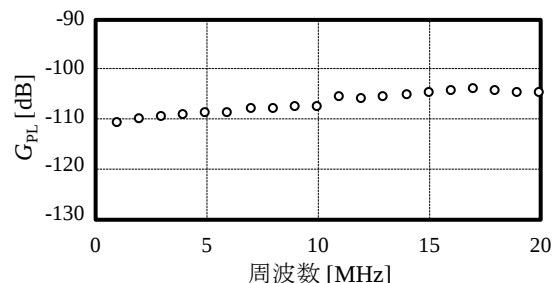


図 5 車体の周波数特性

(2) アルミ板を用いた車体のモデル化

次に、大きなアルミ板を使用して車体のモデル化を行った. このモデル化を行うことで実際に車体を用いることなく実験を行うことができるようになる. 車体を用いた実験では、気温や天候、車体の汚れ具合など様々な要因から実験系の正確な再現が困難になる. 実験の再現性の観点からこのモデル化は非常に重要である. 図 6 にアルミ板を使用した実験写真を示す.

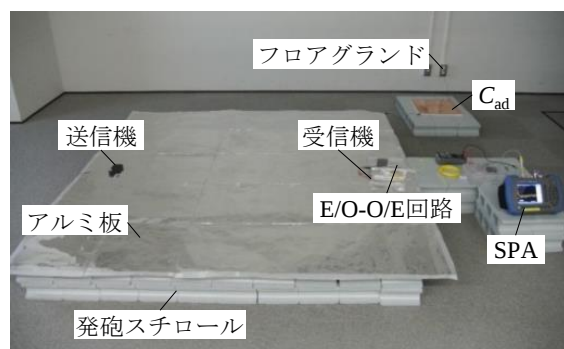


図 6 アルミ板を用いたモデル化

アルミ板のサイズは $2000 \times 2000 \times 0.2 \text{ mm}^3$ であり、実際の車のサイズを参考にした. 追加容量 C_{ad} は、車体とアース間の容量値に相当し、実際の車のタイヤ部分を置き換えたものになっている. 図 7 にアルミ板と C_{ad} を使用した実験概略図を示した. C_{ad} は 2 つの電極と発泡スチロールで構成されており、 C_{ad} のグランド電極はワニグチクリップを介してフロアグランドに接続されている. アースグランドの代わりこのモデル化ではフロアグランドを利用した. C_{ad} のシグナル電極はアルミ板に接続されている. 発泡スチロールによって、E/O-O/E 回路、SPA、アルミ板が床から電氣的に絶縁されている.

アルミ板を用いた実験系の周波数特性を測定し、その結果を車体の周波数特性と比較することでモデル化の正確性を証明する.

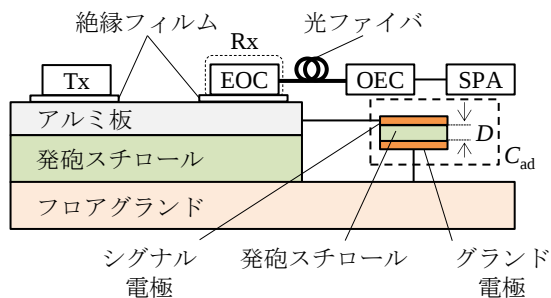


図7 アルミ板を用いた実験概要図

図8にアルミ板を用いたモデルの周波数特性の結果を示した。○が実測結果、□が電磁界シミュレーション結果である。図8のアルミ板を用いたモデルの周波数特性は、図5の車体の周波数特性と類似していた。また、図8の実験結果の傾向と電磁界シミュレーション結果の傾向は同様であるため、実験結果の妥当性が確認された。これらの結果は、アルミ板を用いたモデルで車体の特性を推定できることを意味しており、今後の実験においてアルミ板を用いたモデルを使用することで車体への電界通信実験と同様な結果を得ることが可能となった。

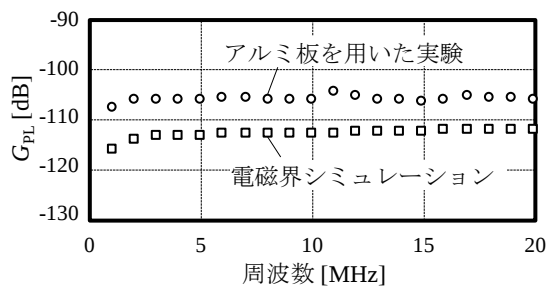


図8 アルミ板を用いたモデルの周波数特性

(3) アースグラウンドとの結合状態

C_{ad} のシグナル電極とグラウンド電極間の距離 D を変更することにより、 G_{PL} の C_{ad} への依存性を調査した。この調査から、タイヤが電解通信に及ぼす影響を明らかにすることができる。初めに LCR メータを用いることで実際の車のタイヤの容量値を測定した。4つのタイヤの総静電容量は約 52 pF であった。図9は、 G_{PL} の $1/(\omega C_{ad})$ のインピーダンス依存性を示している。テスト信号の周波数は以前の研究に基づいて 6.75 MHz で測定を行った。縦軸は信号減衰 G_{PL} を示し、横軸は周波数を示している。○がアルミ板を用いた実験の実測結果、●が車を用いた実験の実測結果、□が電磁界シミュレーション結果である。タイヤの大きさが大きいほど信号減衰 G_{PL} は小さくなり、タイヤが小さいほど信号減衰 G_{PL} は大きくなることが明らかになった。実験結果の傾向はシミュレーション結果の傾向と類似しているため、実験結果の妥当性が確認された。

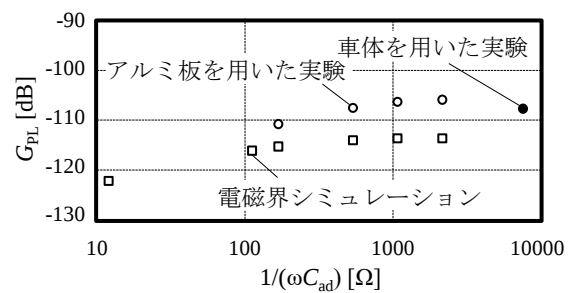


図9 G_{PL} の $1/(\omega C_{ad})$ のインピーダンス依存性

3. 問題点と改善点

(1) 共通グラウンド化問題と大伝送路化問題

電界通信を車体に適応する際には、各車載機器がサーバーデバイスとクライアントデバイスの役割をすることで通信が行われる。サーバーデバイスは、車体周辺の電界を使用してクライアントデバイスと通信し、センサーネットワークが車の周辺に構築される[7][8]。このセンサーネットワークを構築する際には2つの問題がある。受信機と車体のグラウンドが共通化することによって起こる共通グラウンド化問題と、車体という大きな物体に電界通信を適応する時に起こる大伝送路化問題である。この二つの問題について述べる。初めに送信機と受信機の構造を説明する。送信機(Tx)と受信機(Rx)は図10のような構造をしている。

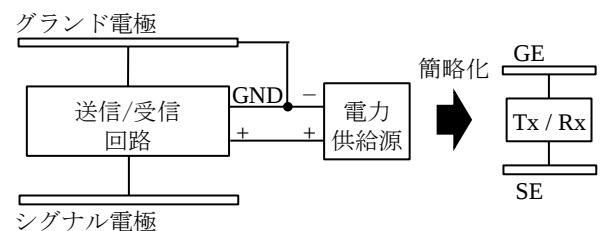


図10 送信機(Tx)と受信機(Rx)

グラウンド電極は回路のグラウンドと電力供給源のグラウンドに接続されている。シグナル電極は回路の高電位側に接続されている。シグナル電極は SE, グラウンド電極は GE として示す。

共通グラウンド化問題について述べる。図11は車体上の電界通信における、共通グラウンド化問題を示している。一般的に、Rx はバッテリーの電力を使用して駆動するため、Rx-GE は車のバッテリーグラウンドを介して車体に接続される。Tx-SE からの信号が Rx-SE だけでなく、意図せずに Rx-GE にも入力されてしまう。両電極に同位相の信号が入力されることにより、信号が減衰されてしまう。

次に大伝送路化問題について述べる。図12に車体上の電界通信における大伝送路化問題を示す。伝送路が大きい場合は、Tx-GE とアースグラウンド間の容量結合は弱くなり、Tx-GE と車体間の容量結合は強くなる。Tx-GE からの信号と Tx-SE からの信号の振幅は等しく、2つの信号は逆位相であるため、伝送路に2つの信号が入ると打ち消し合い信号が減衰されてしまう。

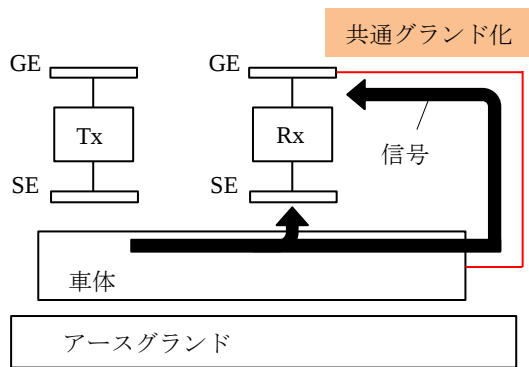


図 11 共通グランド化問題

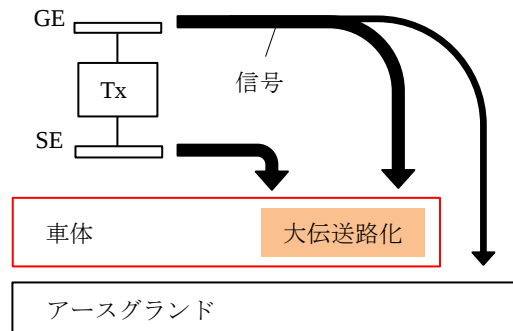


図 12 大伝送路化問題

(2) 等価回路モデルに基づく改善策

共通グラウンド化問題と大伝送路化問題の等価回路モデルを考案する。電界通信は各ノード間の容量結合によって信号路が形成され通信が行われるため、等価回路モデルは問題点の改善において重要な手掛かりとなる。図 13 に車体を利用した電界通信の等価回路モデルを示す。

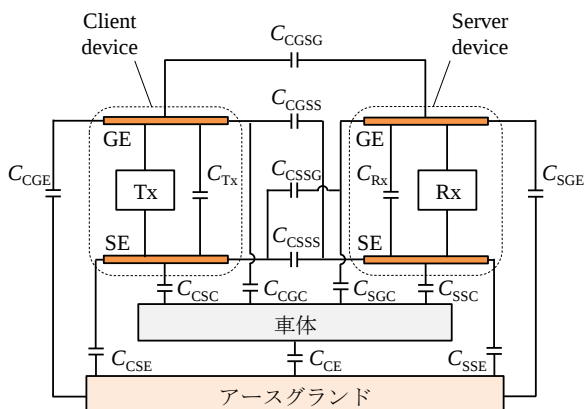


図 13 車体を利用した電界通信の等価回路モデル

クライアントデバイスは車載機器の中でもセンサーとして機能し、サーバーデバイスは車載機器の中でメインコンピュータとして機能する。今回は等価回路モデルを単純化するために、クライアントデバイスを Tx、サーバーデバイスを Rx と仮定した。等価回路モデルは Tx-SE, Tx-GE, Rx-SE, Rx-GE、車体、アースグラウンドの 6 個のノードから構成されており、合計で 15 個の容量結合がある。図 13 の各容量結合の容量値を推定した。容量値はノード

の面積とノード間の距離をもとに計算され、計算結果を参考にして容量値は決定された。それぞれの容量結合の容量値を表 1 にまとめて示す。

名称	容量値
C_{SSC}	290 pF
C_{SGC}	20 pF
C_{CE}	20 pF
C_{CSC}	20 pF
C_{Rx}	20 pF
C_{Tx}	3 pF
C_{CGC}	2.5 pF
C_{SSE}	1 pF
C_{SGE}	960 fF
C_{CSE}	190 fF
C_{CGE}	180 fF
C_{CGSG}	0.1 fF
C_{CGSS}	0.1 fF
C_{CSSG}	0.1 fF
C_{CSSS}	0.1 fF

共通グラウンド化問題は、Rx のグラウンドと車体のバッテリーが共通化されることにより、Rx-GE と車体間の容量結合である C_{SGC} のインピーダンスが小さくなることが原因であると考えられる。 C_{SGC} のインピーダンスを大きくすれば問題は改善可能だが、車のバッテリーグラウンドと Rx-GE が接続されているため、 C_{SGC} のインピーダンスは変更できない。改善策として C_{SSC} のインピーダンスを上げるために、Rx-SE ノードと Rx-GE ノードの位置を交換することを提案する。

大伝送路化問題は、Tx-GE とアースグランド間の容量結合である C_{CGE} のインピーダンスが大きく、Tx-GE と車体間の容量結合である C_{CGC} のインピーダンスが小さいことが原因であると考えられる。Tx の設計を変更しない限り C_{CGC} のインピーダンスは変更できないが、 C_{CGE} のインピーダンスは Tx の設置位置を変更することで下げることが可能である。大伝送路化問題では、同じ現象が Rx の C_{SGE} に関しても現れる。改善策として C_{CGE} と C_{SGE} のインピーダンスを下げるために、Tx と Rx を車体の下に配置することを提案する。

4. 改善策の有効性調査

(1) 実験構成

図 14 に改善策を検証するための基本となる実験系の概要図を示す。基本的な実験系は第 2 章の図 6 のアルミ板を用いたモデル化と同じであるが、 C_{ad} の変化による影響は確認済みであるため今回の実験においては追加容量 C_{ad} を取り除いた実験系を使用した。

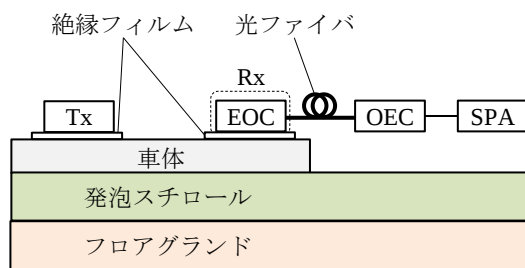


図 14 改善策の基本実験概要図

(2) 共通グラウンド化問題

図 15 に共通グラウンド化問題に対する改善策の Tx と Rx の SE と GE の位置を示す。車体に電界通信に適応した従来型の状態を示す図 15(a)では、Tx-SE と Rx-SE は薄い絶縁フィルムを介してアルミ板の上に配置した。共通グラウンド化状態を示す図 15(b)では、回路グラウンドとアルミ板を導通させた。改善方法Iを示す図 15(c)では、 C_{SSC} のインピーダンスを上げるために、Rx-GE の位置は Rx-SE の位置と交換して配置した。(b)の共通グラウンド化状態において、信号減衰 G_{PL} が大きくなるのか、また、(c)の改善方法Iにおいて、信号減衰 G_{PL} が改善するのかを確認した。

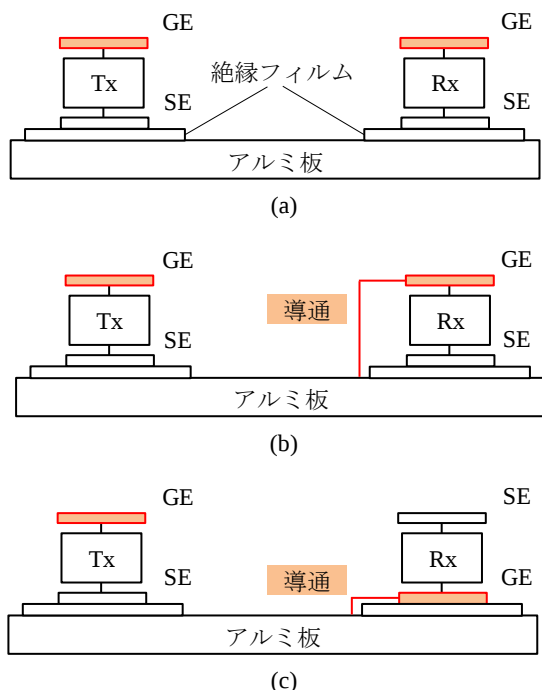


図 15 実験条件：(a)従来型、(b)共通グラウンド型、(c)改善方法I型

共通グラウンド化問題の実験結果と電磁界シミュレーション結果を表 2 に示す。テスト信号の周波数は、私たちが従来研究をしてきた人体通信の結果と後から比較が出来るように 6.75 MHz とした。従来の実測値は -105.66 dBm であった。従来型から共通グラウンド化による信号減衰は -24.1 dB である。

表 2 共通グラウンド化問題の実験結果とシミュレーション結果

	Experiment	Simulation
従来型	-105.66 dBm	-113.44 dBm
共通グラウンド化による信号減衰	-24.1 dB	-41.56 dB
方法Iによる信号改善	17.3 dB	41.73 dB

共通グラウンド化による信号減衰の原因が、Rx-GE と車体間の容量結合である C_{SGC} のインピーダンスであるのかを回路シミュレーションを用いて解析した結果を図 16 に示す。 C_{SGC} のインピーダンスが小さくなるにつれ、共通グラウンド化が進んでいるといえる。信号減衰 G_{PL} は共振特性とともに C_{SGC} のインピーダンスが増加するにつれて、増加した。共通グラウンド化による減少は C_{SGC} のインピーダンスの減少によって引き起こされていることが分かった。

改善方法Iによる信号改善は、共通グラウンド化状態から 17.3 dB 改善した。改善は、Rx-SE と Rx-GE の位置を交換することによって、Rx-SE と車体間の容量結合である C_{SSC} のインピーダンスを増加させることによって引き起こされた。表 2 から、実験結果の傾向はシミュレーション結果の傾向と一致していることがわかり、実験結果の妥当性が確認された。したがって、共通グラウンド化問題は改善方法Iで解決することが可能である。

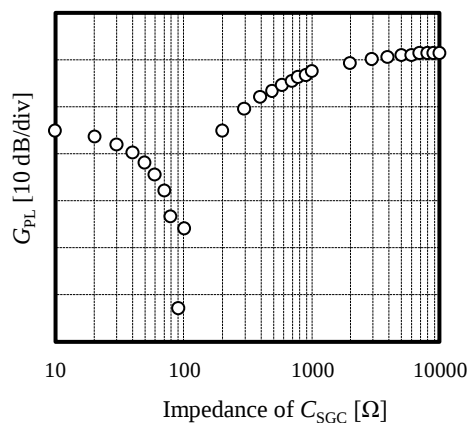


図 16 共通グラウンド化問題の回路シミュレーション結果

(3) 大伝送路化問題

大伝送路化問題については、共通グラウンド化問題が同時に起きてないと仮定して述べる。大伝送路化問題に対する改善策の Tx と Rx の SE と GE の位置を図 17 に示す。図 17(a)は従来型の状態であり Tx と Rx はアルミ板の上に配置した。改善方法IIの図 17(b)では、Tx はアルミ板の上に配置し、Rx はアルミ板の下に配置した。改善方法IIIの図 17(c)では、Tx はアルミ板の下に配置し、Rx はアルミ板の上に配置した。改善方法IVの図 17(d)では、Tx と Rx ともにアルミ板の下に配置した。

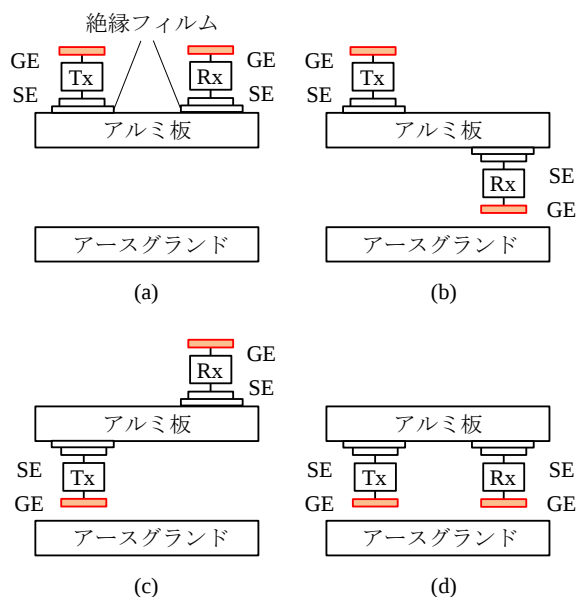


図 17 実験条件：(a)従来型，(b)改善方法II，
(c)改善方法III，(d)改善方法IV

大伝送路化問題の実験結果とシミュレーション結果を表 3 に示す. 改善方法IIによる信号改善は Tx-GE とアースグランド間の容量結合である C_{CGE} のインピーダンスの低下によるものだと考えられる. 改善方法IIIによる信号改善は Rx の C_{SGE} においても改善方法IIと同じ現象が現れたためだと考えられる. 改善方法IVによる信号改善は改善方法IIと改善方法IIIの効果が同時に現れたことで，信号減衰の最大の改善が得られた. 実験結果の傾向とシミュレーション結果の傾向は一致しているため，実験結果の妥当性が確認された.

表 3 大伝送路化問題の
実験結果とシミュレーション結果

	Experiment	Simulation
従来型	-106.64 dBm	-112.54 dBm
方法IIによる 信号改善	8.29 dB	4.64 dB
方法IIIによる 信号改善	7.47 dB	5.27 dB
方法IVによる 信号改善	17.48 dB	15.19 dB

大伝送路化問題の改善策による信号改善の要因を回路シミュレーションによって解析した. 改善方法IIにおける Tx-GE とアースグランド間の容量結合である C_{CGE} のインピーダンスについて解析した結果を図 18 に示す. C_{CGE} のインピーダンスが減少すると信号減衰 G_{PL} は改善されていることが分かった. 改善方法IIによる信号改善は C_{CGE} のインピーダンスの減少が要因で引き起こされていることが明らかになった. 改善方法IIIを適応した大伝送路化問題

において C_{SGE} を変化させた場合も同じ傾向が得られた.

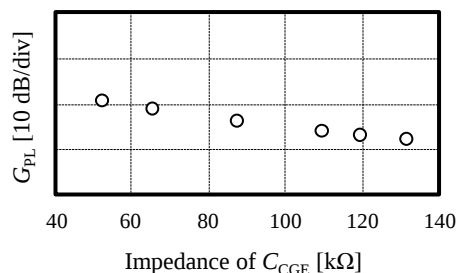


図 18 C_{CGE} を変化させた回路シミュレーション結果

5. 結論

本研究では，ワイヤーハーネスの削減のため，車体へ電界通信は適応可能であることを明らかにした. また，車体上に電界通信を適応したセンサーネットワーク構築時に共通グランド化問題と大伝送路化問題が起きること示し，共通グランド化問題は受信機をひっくり返して設置することで信号改善が可能であり，大伝送路化問題は送信機と受信機を車体の下に設置することで信号改善が可能であることを明らかにした. 今後の展望として，デジタル変調を行った信号での実験を行うことで，情報量を増やすことが可能になり，車載機器の識別が可能になる. 電界通信を車体に適応したように様々なものに適応できれば，IoT 社会はさらに普及し人々の生活はより豊かなものになるだろう.

参考文献

- 1) Atzori, L. et al. : Internet of things: a survey, Measurement, vol. 54, pp. 2787–2805, 2010
- 2) D. Jiang. et al. : IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments, IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 2036-2040, 2008
- 3) P.A. Ioannou. et al. : Autonomous Intelligent Cruise Control, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, pp. 657-672, 1993
- 4) G. Leen. et al. : Expanding automotive electronic systems, Computer, vol. 35, pp. 88-93, 2002
- 5) D. Ayuzawa. et al. : Measurement System for Wearable Devices of Intrabody Communication Using Electro-Optic Technique, GCCE, 2015
- 6) N. Sekine. et al. : Signal-propagation analysis for two-person intra-body communication services, Region 10 Conference TENCON 2017, pp. 951-956, 2017
- 7) I. F. Akyildiz. et al. : Wireless sensor networks: A survey, Computer Networks, vol. 38, pp. 393-422, 2002
- 8) J. Gubbi. et al. : Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, Future Generation Computer Systems, vol. 29, pp. 1645-1660, 2013