

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18052

研究課題名(和文)電子機器の信号系および電源系に生じるコモンモードノイズの統合的な低減設計法

研究課題名(英文) Design for common mode reduction in signaling and power distribution systems in electronic device

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器内部のプリント回路基板やそれに接続されるケーブルでは、信号伝送系や電源系において流れるコモンモード電流が、不要電磁放射や信号品質の劣化の原因となっている。信号伝送系においては、特に差動伝送線路に着目し、平衡度が変化する点においてコモンモード電位差が生じ、これがコモンモード電流を励振することを定式化し、実験により検証した。また、信号印加は電流源励振した方がコモンモードの発生を抑制できる可能性を示した。電源系においては、インピーダンスバランス法をパワーエレ回路に適用し、MOSFET近傍の寄生容量を考慮することで、コモンモード電流を低減できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In a printed circuit board and attached cable, a common mode current flowing in a signal transmission system and/or a power supply system causes radiated emission and deterioration of signal integrity. In this report, a differential transmission line is focused as signaling system. It is formulated that difference of common mode voltages occurs at the point where imbalance degree changes. The imbalance degree is determined by cross section of the transmission line. Reduction of common mode by changing design of the transmission line can be predicted by the calculation of the imbalance. In addition, the power supply system is also focused in this report. In the power supply system, an impedance balance is important for reduction of common mode. Designing parasitic capacitance around power MOSFETs can reduce excitation of common mode in a power electronics circuit.

研究分野：環境電磁工学

キーワード：EMC コモンモード 平衡度不整合モデル パワーエレクトロニクス 寄生結合 インピーダンスバラン
ス

1. 研究開始当初の背景

電子機器内部のプリント基板(PCB: Printed circuit board)上に配線される信号線や電源線および基板に接続されるケーブルに同相に流れるコモンモード電流が、不要な電磁放射や信号品質の劣化の原因となっており、その低減設計法の開発が非常に重要な課題となっている。

多くの電子機器では磁性シートやフェライトクランプ、コモンモードチョークコイルを基板やケーブルに付加するなど後付の対策によりコモンモード電流の抑制を図っているが、当初の設計にない素子を付加するためコストが増大し、設計の最終段階では最適設計を行えないためその抑制効果も少ない。そのため、回路動作のための電流(ノーマルモード電流)からコモンモードへの変換メカニズムを明らかにし、回路設計の上位段階でモード変換を抑制する回路設計を行なう必要がある。

また、回路設計に用いる3次元電磁界解析は膨大な計算時間を要するため回路の最適設計には不向きであり、また結果から現象を理解することが難しい。そのため、モード変換を表現する簡易かつ十分な計算精度をもつ等価回路モデルを構築し、これを利用した根本的なモード変換低減設計法が求められている。

これまでに、プリント回路基板上のシングルエンド信号系について、線路の対称性を表す平衡度を用いてコモンモード発生メカニズムを定式化し、簡易な計算により不要電磁波放射を予測し低減する手法を提案した。また、差動信号線においても、屈曲部による対称性の欠如に起因するコモンモード発生を抑制する1つの手法を提案し、その等価回路モデルの構築を行っている。

一方で、近年の伝送速度の向上により多チャンネルの差動信号線が用いられ始めているが、このような差動信号線では近接の信号配線のために本質的に対称性が欠如しており、このような差動線路においても低ノイズ・低信号劣化の線路の設計手法開発が望まれる。

さらに、信号を処理するLSIにおいて、その回路動作によって電源系に流れるコモンモード電流の発生メカニズムを等価回路で表現し、それを抑制する手法も提案されている。しかし、この手法はマイクロコントローラなどの論理演算部が支配的となるLSIのみに有効な手法であり、スイッチング回路を含み負荷の状態によって大きく特性が変わるような電源系にも適用する必要がある。

2. 研究の目的

プリント回路基板の低コモンモード設計のためには、信号伝送系のみならず電源系においてもコモンモードの発生メカニズムを明確する必要がある。本研究では、以下の3項目について、検討を行う。

- (1) スイッチング電源におけるコモンモード発生メカニズムの解明と低減設計法の提案
- (2) 対称性が欠如した差動伝送線路における

低コモンモード励振法の提案

- (3) 近接グラウンドに不連続のある差動伝送線路におけるコモンモード発生メカニズムの解明と低減設計法

3. 研究の方法

上記の課題に対して、等価回路モデルや実験により現象を解明し、コモンモード低減設計法を提案する。

(1) スイッチング電源におけるコモンモード発生

- (a) DC-DC コンバータを対象とした簡易等価回路によるコモンモード発生メカニズムの説明

数十 MHz 帯におけるコモンモード電流低減を目的に、これらの周波数帯で支配的となる素子(寄生結合も含む)による等価回路モデルを構築する。

- (b) 寄生結合の調整によるコモンモード抑制
上記の等価回路を用いて、支配的に影響を与える素子を特定し、コモンモード低減設計法を示す。

(2) 対称性が欠如した差動伝送線路

平衡度が 1/2 ではない差動伝送線路に対して、励振源の平衡度を考慮し、コモンモード励振を抑制する励振法を、等価回路計算により求める。

(3) 近接グラウンドに不連続のある差動伝送線路

平衡度不整合モデルにより差動伝送線路のコモンモード励振強度を計算し、三次元電磁界解析と比較する。またガードトレースを付加し、平衡度を調整した場合について、コモンモード低減量を推測する。

4. 研究成果

(1) スイッチング電源

図1に示すDC-DCコンバータを対象にコモンモード発生を表現する等価回路を求めた。今回の回路では、上側MOSFETのスイッチング時に発生するコモンモード電流が多いことを実験的に示した。さらに、上側MOSFETがオフからオンになるタイミングについて、上下のMOSFETの位置に配置した励振源からなる図2に示すコモンモード等価回路を提案した。

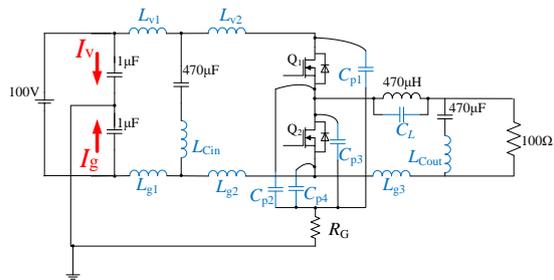
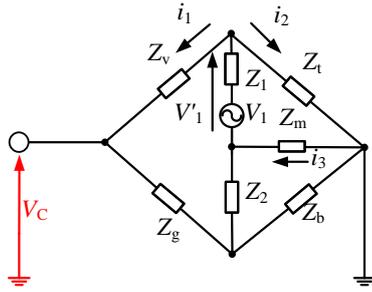
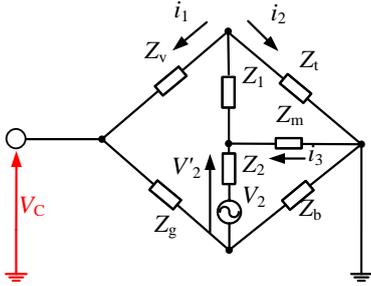


図1: 寄生結合を含む降圧 DC-DC コンバータ



(a) 上側 MOSFET の位置に励振源



(b) 下側 MOSFET の位置に励振源

図 2: コモンモード等価回路

また、それぞれの励振源からコモンモード電圧への伝達関数は、低周波側では上側 MOSFET の位置にある励振源が、数十 MHz 帯では両方の励振源が影響を与えることを見出し、それぞれ定式化した。

定式化されたコモンモード励振電圧が最小となる条件を計算したところ、MOSFET の近傍の寄生容量を調整することができればコモンモード電圧を最小化できることを示した。特に、下側の MOSFET にソース電極がヒートスプレッドに接続された MOSFET を用いることで、低周波から数十 MHz 帯にまでコモンモード電圧を低減できることがわかる。

検証として、SPICE を用いた回路計算により、コモンモード電流の低減を実証した。なお、MOSFET のモデルとしてはメーカ提供のものを用いた。結果を図 3 に示す。黒線で示す従来設計に対し、赤線で示す提案法はほとんどの周波数で 15dB 程度低減していることがわかる。一方で、70MHz 付近に鋭い共振が発生し、

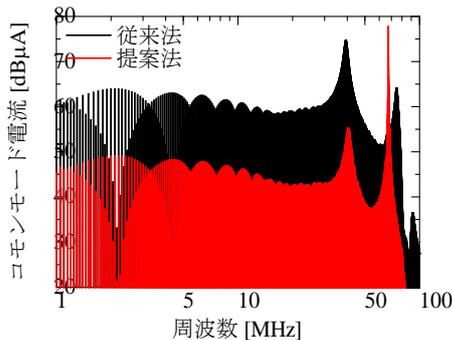


図 3: コモンモード電流計算結果

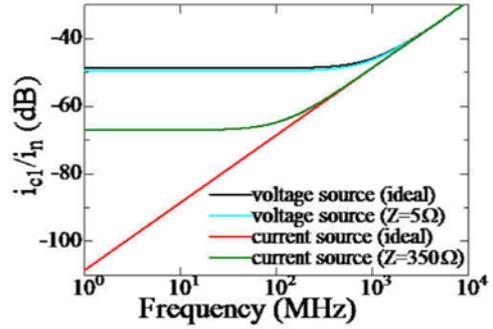


図 4: 差動伝送線路における 1 次コモンモード発生

その周波数でコモンモード電流が増大している。この共振は、MOSFET 近傍の寄生容量によるものであり、放熱経路に損失性材料を用いることで低減できる可能性を示した。

(2) 対称性が欠如した差動線路

一般に、差動線路は信号ドライバ、レシーバ、線路を含めて対象であることが望まれる。しかし、線路のみに着目しても近接導体などの影響で必ずしも対象とはならない。

2本の信号線と近接グラウンドからなる3導体+システムグラウンドの系において、近接グラウンド端部に配線された差動伝送線路における低コモンモードとなる励振を検討した。従来の平衡度不整合モデルでは、平衡度を容量またはインダクタンスの比で表しており、誘電体の考慮が課題であった。そこで、本研究では、平衡度を拡張し線路の単位長さ当たりのインピーダンスもしくはアドミタンスで記述した。

さらに、励振源は対象であると仮定し、差動励振源を電圧源と電流源とした場合のコモンモード発生量を回路シミュレーションにより比較した。ここでいう、コモンモードとは、差動2線を同相に流れ、近接グラウンドを帰路とする1次コモンモードである。結果を、図4に示す。

低周波帯において、電圧励振した場合は一定量の1次コモンモードが発生していることがわかる。また、差動電流のみを流す電流源励振の場合も、周波数が高くなるにつれて1次コモンモード電流が増加している。これは、誘電体を含み線路が非対称であるため、通常のディファレンシャルモードとコモンモードが固有モードではないため、線路を伝搬するに従い、コモンモードに変換されているためである。また、電流源に並行に接続される内部インピーダンスによって、たとえ電流差動であっても1次コモンモード電流が励振されることがわかった。

(3) 近接グラウンドに不連続のある差動伝送線路

プリント回路基板間を接続するフレキシブルケーブルなど、グラウンド幅が十分でないケーブル上の差動配線では、伝送線路の断面形状が変化する箇所でもコモンモードが励振さ

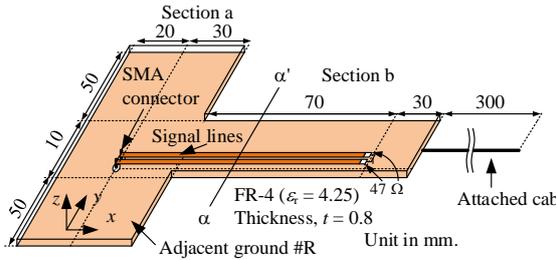


図 4: 近接グラウンド幅が変化する差動伝送線路

れ放射の増大の要因となる。そこで、平衡度不整合理論を差動線路にも適用し、コモンモード発生量を予測する手法を提案した。

評価に用いた基板は、図 5 に示すような 2 層目の近接グラウンド幅が変化するような差動線路である。このような差動線路において、伝送モードを 3 つ定義した。一つ目はノーマルモードであり、差動線路を逆相の電流が流れるものである。二つ目は 1 次コモンモードであり、差動線路を同相に流れ、近接グラウンドを帰路線とするモードである。これらは、本質的には電流差動であり、放射への寄与は小さい。一方で、三つ目のモードである 2 次コモンモードは、すべての導体を同相に電流が流れるため、放射への寄与が大きく、2 次コモンモード電流の発生を抑制することは不要電磁雑音の低減につながる。

そこで、2 次コモンモード電流の発生を予想するために、平衡度を導入した。平衡度とは、

$$h_{iCS} = \frac{i_{iCS}}{i_{1CS} + i_{2CS} + i_{RCS}} \quad (1)$$

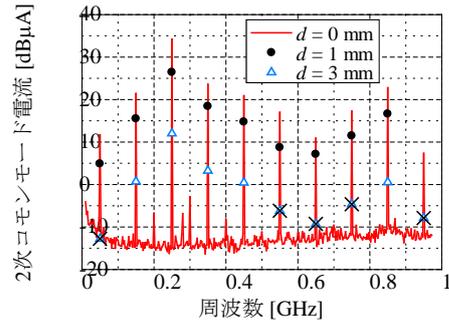
で定義されるように、信号線 i の平衡度を全体の 2 次コモンモード電流に対する信号線 i に流れる 2 次コモンモード電流と定義した。これらは線路の断面形状の静電界解析により簡単に求まる。

図 5 のような断面形状が異なる伝送線路では、グラウンド幅が広い区間 a とグラウンド幅が狭い区間 b とでは平衡度が異なるため、その平衡度の差に比例する 2 次コモンモード電位差

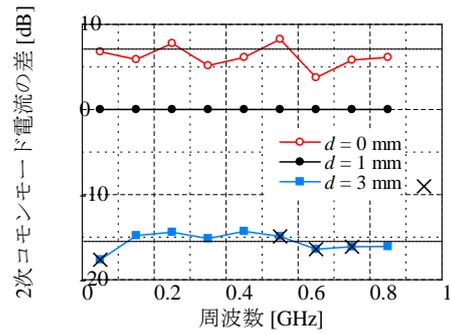
$$\Delta V_{CS} = (h_{1CS}^b - h_{1CS}^a)(V_1 - V_R) + (h_{2CS}^b - h_{2CS}^a)(V_2 - V_R) \quad (2)$$

が生じる。これが 2 次コモンモードの励振源となり、2 次コモンモード電流が生じる。伝送線路の設計変更に伴う 2 次コモンモード電流の変化は、式(2)の平衡度を求めることにより計算される。

図 5 に示す試験対象の伝送線路において、信号線と基板端部との距離 d を変化させた場合の 2 次コモンモード電流発生量を実測及び 3 次元電磁界解析により求め、平衡度不整合モデルによる推定値と比較した。結果を図 6 に示す。信号線の位置によって、2 次コモンモード電流の値が変化し、 $d = 1$ mm の基板に対



(a) 2 次コモンモード電流



(b) $d=1$ mm の基板を基準にした差分

図 6: 2 次コモンモード電流の測定結果

して、 $d=0$ mm の試験基板では減少、 $d=3$ mm の試験基板では増加していることが分かる。すなわち、信号線が中央に寄るにつれて平衡度が改善し、2 次コモンモード電流が提案している。また、その変化量は、式(2)で示される平衡度不整合モデルの推定結果と実用上十分な精度で一致している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- (1) 松嶋 徹, 渡辺 哲史, 豊田 啓孝, 古賀 隆治, 和田 修己, “グラウンドたんに近接した差動伝送線路を対象とした平衡度不整合モデルに基づくコモンモード電流低減量予測法の検証,” エレクトロニクス実装学会誌, 査読あり, 第 21 巻, pp. 178-185, 2018.
doi.org/10.5104/jieep.21.178

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 松嶋 徹, 黒柳 貴夫, 久門 尚史, 和田 修己, “パワー MOSFET 近傍の寄生結合とコモンモード電圧の関係,” 電子情報通信学会技術報告, 査読なし, EMCJ2017-61, pp. 13-16, 2017.
- (2) H. Saito, T. Matsushima, T. Hisakado, and O. Wada, “Comparison of voltage sources with current sources on

unbalanced differential microstrip line, ” in 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, 査読あり, 2017.

- (3) T. Matsushima, T. Kuroyanagi, T. Hisakado, and O. Wada, “Common Mode Reduction in Bi-directional DC-DC Converter by Changing Position of Parasitic Capacitor,” in 8th Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 査読あり, p.262, 2017.
- (4) 齊藤 大晃, 松嶋 徹, 久門 尚史, and 和田 修己, “共振時の電磁界分布に注目した等価回路モデルへの損失項の導入,” 2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 査読なし, B-4-57, 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 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