

財団法人テレコムエンジニアリングセンター  
公益的調査研究助成

## 成果報告書

調査研究テーマ

差動伝送系機器からの電磁妨害波の抑制法の開発

助成期間

平成 21年 4月 ~ 平成 24年 3月

提出期日

平成 24年 4月

研究代表者 井上 浩

---

所属機関・職名 秋田大学・教授

---

# 1. 調査研究の概要

調査研究テーマ	差動伝送系機器からの電磁妨害波の抑制法の開発		
助成期間	平成 21年 4月 ~ 平成 24年 3月		
報告者 (助成対象者)	井上浩		印
勤務先	機関名	秋田大学	
	住所	〒010-8502 秋田市手形学園町1-1	
	TEL		
	E-mail		
助成金額			
本報告書作成日	平成 24年 3月 31日		

## 調査研究概要

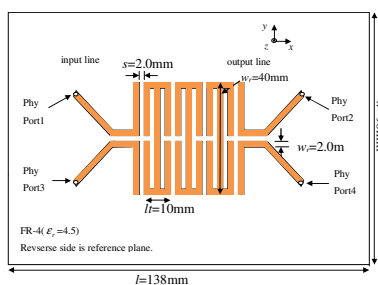
GHz帯差動伝送系からの電磁放射を、モデルとなるプリント回路基板構造を用いて、明らかにした後、抑制法の基本を提案した。

1)ストリップライン, 2)平行プレーン, 3)スロットラインの3つモードは直交せずに互いに励振し合うため、モデル構造を各モードの領域に分割し、構造全体としては各領域を結合する手法を考案した。

非対称なストリップライン構造で広く用いられているミアンダ遅延線は、伝送線路終端での信号品質の確保には有効であるが、放射そのものは抑制できないことを明らかにした。また、差動から同相へのモード変換係数( $S_{cd21}$ )は、放射抑制効果の定量的な評価には不十分で、伝送線路および等価電磁流により放射現象を記述するアンテナを合わせた物理ベース等価回路モデルを開発した。

放射の支配要因には、1)非対称による同相成分の増加, 2)差動伝送線路間隔が広い場合の放射打ち消し効果の減少, 3)線路を基板端に配線するための同相放射の増加の3つがあることを明らかにした。

また、差動励振共振回路(F-SIR)を周期的配列で配置すると、負の群遅延特性が実現可能であることを、プリント基板上およびIC内で示し、今後の利活用の基礎が明らかになった。



負の群遅延特性を有する F-SIR 周期構造の PCB 実装例 (差動伝送信号の整形への応用)

## 2. 調査研究の詳細

### 2.1 課題名:

差動伝送系機器からの電磁妨害波の抑制法の開発

### 2.2 調査研究の背景

近年、電子機器の小型・軽量化による回路の高密度実装化や、伝送信号の高速化が進んでいる。これに伴い電子機器からの不要電磁波放射や機器内で生じるカップリング等の電磁妨害が問題となっており、電子機器は所望の機能を満たすだけでなく、EMIを発生しないことが求められている。しかしながら本問題に対する設計段階における根本的な解決策はあまり明確ではなく、事前に過剰なノイズ対策を施すか、プロトタイプ開発後に対処療法的な対策を行うしかないのが現状である。その結果、開発現場では設計の長期化、コストの増加等の問題が顕在化しており、電子機器からの電磁妨害は科学的、技術的、経済的に重要な課題である。根本的な解決のためには放射源の観点から発生要因を整理し、電磁妨害の発生メカニズムを解明し、設計の初期段階で効果的な対策を講じることが不可欠であるため、ノイズの放射機構を解析し、放射を電子機器の設計段階から予測可能にすることは、放射の少ない回路設計技術を確立するために非常に有益である。

電子機器からの電磁妨害問題をその発生メカニズムを明らかにすることで予測可能とし、得られた知見を基に対策を考慮した新たな基板構造や素子配置を論じることを目的として取り組む必要がある。本研究成果の適用により、複雑なモデルや試行錯誤に依らずに低電磁妨害な電子機器の設計が期待でき、高品質な電子情報化社会の確立に貢献するものと考えられる。

### 2.3 調査研究の目的:

本研究はユビキタスネット社会でのクリーンな電磁環境を達成するために、GHz帯差動伝送系からの電磁妨害を解決するために、その発生メカニズムを明らかにしながら抑制法を開発することを目的としている。すなわち、モデルとなるプリント回路基板を使用して、差動伝送系機器からの電磁妨害の発生の基本的な問題を明らかにし、問題の解決策すなわち抑制法を提案することを目標としている。

### 2.4 調査研究の意義:

根本的な解決のためには放射源の観点から発生要因を整理し、電磁妨害の発生メカニズムを解明し、設計の初期段階で効果的な対策を講じることが不可欠である。そのためノイズの放射機構を解析し、放射を電子機器の設計段階から予測可能にすることは、放射の少ない回路設計技術を確立するために非常に有益である。

本研究は、電子機器からの電磁妨害についてメカニズムを解明しながら効果的な予測及び抑制法を確立することを目的とした新規な取り組みであり、体系的に検討することで得た新しい科学的知見の適用により、複雑なモデルや試行錯誤に頼らずに低EMIな電子機器の設計が期待できる。また、結果を実際に科学的、技術的、経済的に応用できるように企業と連携することで、その波及効果及び発展性を拡大する。

## 2.5 調査研究の方法:

EMC 問題のメカニズム解明を可能とするモデルを考案し、モデルを用いた実験的および解析（主として等価回路解析およびFDTD 計算解析）を行い、電磁放射の主原因を明確にする。

さらに、伝送系の能力拡張を図るため、負の群遅延特性を持つ伝送系をモデル実験して、新規な構造の基礎を明確にする。以下の手順により、研究を進展させた。

### 1) プリント回路基板モデルによる、差動信号 EMC モデル実験および解析

実際のレイアウト例などから典型的なパターンを抽出し、差動伝送線路中の電氣的不平衡(CM)成分の発生要因(屈曲部、非対称な平行線路)とその特性を明らかにする。

### 2) 等長回路設計における EMC 問題解明のモデル実験と解析

CM成分の発生量、周波数特性を再現可能で差動伝送線路の幾何学的構造と物理(電磁)現象の対応関係が明確な伝送線路モデルと、放射現象をシミュレートするアンテナモデルで構成した物理ベース等価回路モデルを開発する、また、物理ベース等価回路モデルを利用して、差動伝送線路中の支配的な放射要因を明らかにする。

### 3) プリント基板および集積回路内における、F-SIR (Folded Stepped Impedance Resonator) を用いた負の群遅延特性の発現の基礎実験と解析

物理ベース等価回路モデルにより明らかにした支配的な放射要因を抑制するための新たな伝送線路構造を開発する。

### 4) 研究成果の英文による学術発表を積極的に行い、成果の公表および他機関との意見交換による、研究の進展を図る。

## 2.6 調査研究の特色

本研究では、電子機器からの電磁妨害の発生メカニズムの解明を通じた放射予測モデル及び抑制法開発に主眼を置く。メカニズムに基づいた簡単な等価回路モデルの作成により、現在主流のFDTD法等のフルウェーブ解析に頼らずに電磁妨害を予測可能とする。一方、電磁妨害対策ではシールドや電波吸収体の配置に代表されるように放射電磁波を遮蔽・吸収するのが一般的であるが、これらとは別に基板構造、素子配置、配線パターンの設計指針の観点から抑制法、設計ガイドラインを検討することで、電磁妨害対策の進展への貢献を図る。また、抑制法の検討ではCM成分のみに着目するのではなく、これまでは取るに足らないもとして無視されてきたDM成分がGHz帯では支配的な放射成分になるという申請者らの研究結果から、信号ループのループ面積等についても新たな設計ガイドラインの策定を行う。

構造による抑制法は、作成した等価回路モデルに基づいた理論的な、そして抑制効果を定量評価可能な方法とする。例えば、従来まではCM電流の抑制のためにはグラウンドインダクタンスを低下させるために広いグラウンド面が必要であると言われてきたが、提案中のメカニズムモデルにより、DM-CMの変換効率の低下のためには大きなグラウンド面が必要になるのに対し、大きなグラウンド面ではアンテナの放射効率が逆に増加するために単純なグラウンド面積の増加ではCM放射を効果的に抑制できないことを明らかにしている。そのため、アンテナ効率を変えずにグラウンドインダクタンス、つまりDM-CMの変換効率、を低下させ、さらにはループ面積の減少によるDM放射の抑制も可能であるガード構造は非常に有益であり、本コンセプトに基づいた抑制のための構造を提案する。

### 3. 年度ごとの調査研究内容

初年度分 平成 21.4～平成 22.3

機器を構成する基本要素である信号線路と負荷，アナログ/デジタル回路分離用のスロットをグラウンド面に有するストリップライン構造を対象として検討を行った．1) ストリップラインモード，2) パラレルプレーンモード，3) スロットラインモード，の3つモードのモードは直交せずに互いに励振し合うため，複雑なカップリング現象を考慮した新しい等価回路モデルを考案した．モデル構造を各モードが直交する領域と直交しない領域とに分割して等価回路モデルを考え，構造全体の振る舞いは各領域をセグメンテーション法で互いに結合する手法を考案した．ベンチマークとして，FEM, FDTD 法によるフルウェーブ解析との比較を行った結果，第1共振周波数以下では1dB以内で一致し，より高周波でも各モードに起因する共振特性を精度良く解析・予測でき，提案する手法及び等価回路モデルの妥当性と有効性を実証することができた．また，スーパーコンピュータで35時間必要であったFDTD解析を，等価回路モデルを使用して各モードを効率良く解析した場合には市販パソコンでも10分程度で解析可能とした．また，差動伝送線路の不均衡が遠方界放射に与える影響についての定量化，および波形整形用の負の群遅延特性をもつ伝送線路構造をPCBレベル並びにICチップレベルで試作した．

平成 22.4～平成 23.3

多層基板構造において最も基本となるストリップライン構造からの不要電磁波放射特性の内，コモンモード成分に起因する水平偏波成分の予測モデルについて検討した．提案する等価回路モデルには，伝送線路理論に基づく分布定数線路モデルに不平衡の発生源として有限幅寸法のグラウンドインダクタンスに起因する電流駆動型メカニズムと，容量性結合による電圧駆動型メカニズムを考慮した．FDTD法によるフルウェーブ解析との比較を行った結果，第1共振周波数以下では6dB以内で一致し，より高周波でもキャビティモードに起因する共振特性を精度良く解析・予測でき，提案する手法及び等価回路モデルの妥当性と有効性を実証することができた．また，実際の差動伝送線路構造からの不要電磁波放射を予測するため，屈曲部を有した非対称な差動伝送線路モデルのミックスド・モードSパラメータ，近傍電磁界，遠方電界特性について検討し，非対称構造がシグナルインテグリティ及び遠方電界(放射)に与える影響を定量化し，今後の予測モデルのための知見を得た．抑制の観点からは，波形整形用の負の群遅延特性をもつ伝送線路構造をPCBレベル並びにICチップレベルで試作し，F-SIRの周期的配列により負の群遅延特性が実現可能であることを実験，電磁界解析，等価回路モデルから明らかにした．

最終年度分 平成 23.4～平成 24.3

最終年度は1) ストリップライン構造で幾何学的に非対称な差動伝送線路からの不要電磁放射の予測モデルの開発，および2) 伝送信号波形の整形用デバイスの開発を行った．

1) 非対称ストリップライン構造のSパラメータ，近傍電磁界，放射電磁界に与える影響を検討した結果，従来から信号品質改善の観点から広く利用されているミアンダ遅延線は伝送線路終端でのCM成分を抑制しアイパターン等の信号品質の確保には有効であるが，放射そのものは抑制できないことを明らかにした．従来の放射抑制効果をDMからCMへのモード変換係数( $S_{cd21}$ )のみで評価することは放射抑制効果の定量的な評価には不足で，新たな評価パラメータ及びモデルの必要性を示した．幾何学的に非対称な差動伝送線路構造からの不要電磁放射強度を精度良く予測し，支配的な放射要因を明らかにするために，モデル1) CM成分の発生量，周波数特性を再現可能で，差動伝送線路の幾何学的構造と物理(電磁)現象の対応関係が明確な電圧及び電流分布計算のための伝送線路モデル，およびモデル2) 等価電磁流により放射現象をシミュレートするアンテナモデル，の物理ベース等価回路モデルを開発した．

非対称等長配線では，等長配線により信号品質が改善できても放射を抑制できない要因として，要因1)非対称によるCM伝搬部分の発生によるCM放射の増加，要因2)差動伝送線路間隔の広がりによる差動信号のメリットである放射打ち消し効果の減少，ならびに要因3)線路の基板端への配線によるCM放射の増加の3つを示し，低周波帯で要因1，GHz超高周波で要因2が支配要因であることを示した．

2) 抑制の観点から，波形整形用の負の群遅延特性をもつ差動励振F-SIRを伝送線路構造に含むモデル線路をPCB上およびICチップ内に試作し，差動励振F-SIRの周期的配列により負の群遅延特性が実現可能であることを実験及び電磁界解析から明らかにし，今後の利活用の基礎を示した．

## 4. 調査研究成果の説明

### 得られた成果に対する自己評価

#### 学術的貢献

差動伝送系について、信号の伝送とともに不要電磁放射を扱った基礎的な論文は少なく、本研究の成果として紙上および口頭発表（特に英文による）しており、今後の差動伝送系の設計指針の基礎となると考えられる。特に、等長線路構造は、差動信号線路では主要な設計ルールとなっているが、EMC問題は解決できないことが明確になり、新しい構造を提案する必要がある。本研究では、プリント回路基板上および集積回路内の構成できる負の遅延特性を持つ伝送系の基礎を明確にした。

#### 実用化

成果の考え方は、差動信号線路の設計時に応用できると考えている。一方、新たな伝送系は応用のための基礎を構築しつつあるところで、今後限定されたモデルから実際の応用への橋渡的研究が必要である。

### 主な成果リスト

#### (国際会議口頭発表)

- [1]Y. Kayano, R. Yanagisawa and H. Inoue, "Negative Group Delay Circuit fabricated in an Integrated Circuit Chip", in Proc. 2010 Asia-Pacific International Symposium on EMC, pp.1126-1129, Beijing China, Apr. 2010.
- [2]Y. Kayano, R. Hashiya and H. Inoue, "The Correlation between Imbalance Current and EM Radiation from a Printed Circuit Board Driven by Differential-Signaling", in Proc. International Conference on Electronics Packaging, pp.608-613, Hokkaido, Japan, May 2010.
- [3]R. Yanagisawa, Y. Kayano and H. Inoue, "Equivalent Circuit Analysis of F-SIR Structure with Negative Group Time Delay", in Proc. Pan-Pacific EMC Joint Meeting'10, TH-AM2-1, pp.31-34, Sendai, Japan, May 2010.
- [4]Y. Kayano and H. Inoue, "Predicting CM Radiation from Strip Line Structure by Equivalent Circuit Model", in Proc. IEEE International Symposium on EMC, pp.748-758, Fort Lauderdale, FL, USA, Jul. 2010.
- [5]Y. Kayano and H. Inoue, "A Study on Characteristics of EM Radiation from Strip Line Structure", in Proc. Asia-Pacific Radio Science Conference, E2-1, Toyama, Japan, Sep. 2010
- [6]Y. Kayano, K. Mimura and H. Inoue, "The Correlation between Imbalance Component and EM Radiation from a Differential-Paired Line with Different Length", in Proc. International Conference on Electronics Packaging, pp.103-108, Nara, Japan, April, 2011.
- [7]Y. Kayano and H. Inoue, "Prediction of EM Radiation at GHz Frequency from a PCB Driven by a Connected Feed Cable", in Proc. 2011 Asia-Pacific International Symposium on EMC, S-Tu2-5, Jeju Island, Korea, May 2011.
- [8]Y. Kayano and H. Inoue, "Electromagnetic Radiation Resulting from Strip Line Structure Driven by a Feed Cable", in Proc. IEEE International Symposium on EMC, Long Beach, CA, USA, pp.161-166, Aug. 2011.
- [9]Y. Kayano and H. Inoue, "Effect of Periodic Dielectric Material placed over PCB on EM Noise Shielding", in Proc. Joint Conference of "International Conference on Electronics Packaging" and "IMAPS All Asia Conference", pp.162-167, Tokyo, Japan, April, 2012.
- [10]Y. Xiaofan, Y. Kayano and H. Inoue, "A Study on Negative Group Delay Characteristics of Multi-Stage F-SIR Structure Driven by Differential-Mode", in Proc. International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, Akita, Japan Aug. 2012 (発表予定)
- [11]Y. Kayano, Y. Tsuda and H. Inoue, "Evaluation of Imbalance Component and RM Radiation from Asymmetrical Differential-Paired Lines", in Proc. International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, Akita, Japan Aug. 2012 (発表予定)
- [12]Y. Kayano, Y. Tsuda and H. Inoue, "Evaluation of Imbalance Component and EM Radiation from Asymmetrical Differential-Paired Lines", in Proc. IEEE International Symposium on EMC, Pittsburgh, PA, USA, Aug. 2012 (発表予定)

#### (紙上原著論文)

- [1]R. Yanagisawa, Y. Kayano and H. Inoue, "Left Hand Mode Transmission Line Characteristics Made by F-SIR on PCB", IEICE Trans. Commun., vol.E93-B, no.7, pp.1855-1857, Jul. 2010.
- [2]Y. Kayano and H. Inoue, "Identifying EM Radiation from a Printed Circuit Board Driven by Differential-Signaling", Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, vol.3, no.1, pp.24-30, Dec. 2010.
- [3]Y. Kayano and H. Inoue, "A Study on Characteristics of EM Radiation from Strip Line Structure", Radio Science, 46, RS0F06, doi:10.1029/2011RS004735.
- [4]Y. Kayano, K. Mimura and H. Inoue, "Evaluation of Imbalance Component and EM Radiation Generated by an Asymmetrical Differential-Paired Lines Structure", Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, vol.4, no.1, pp.6-16, Dec. 2011.

他日本語での口頭発表 13 件は省略