

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04058

研究課題名（和文）実運用時の電磁界分布を考慮した非接触PIM測定法に関する研究

研究課題名（英文）Study on non-contact PIM measurement method considering the electromagnetic field distribution in practical system operation

研究代表者

久我 宣裕（Nobuhiro, Kuga）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80318906

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：平面伝送線路のPIM特性評価に適し、かつ従来のPIM測定と互換性のある非接触平衡測定系を考案した。非線形高周波回路シミュレーションを用いて、微小なインピーダンス不整合がPIM測定に与える影響を定量的に評価した。また本PIM測定系にTRLキャリブレーションを導入し、不整合損の影響を除去可能なPIM推定法を提案した。非接触コネクタの残留PIMの影響を解析し、残留PIMを互いに打ち消し、かつ発生PIMが最大化する試料寸法が存在することを明らかにした。本概念に基づく無終端測定系も構築し、終端法との互換性を検討した。その結果、無終端法の測定最大値が整合法より高くなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、平面伝送線路であるマイクロストリップ線路のPIM特性評価において、平衡線路を測定系に導入することで、非接触で従来の測定方法と互換性のある新しい測定系を実現した点に意義がある。またPIM測定にTRLキャリブレーションを導入することで測定系での損失を校正し、より正確なPIM測定を可能としている。また、非接触コネクタの残留PIMを最小限に抑える技術は、平面伝送線路のPIM特性評価における公平な評価方法を示唆するものであり、測定標準化の観点から大きな意義がある。また終端法と互換のある無終端法の導入は、平面伝送線路のPIM特性評価における測定効率を劇的に向上させる意義がある。

研究成果の概要（英文）：We proposed a non-contact balanced measurement system that is suitable for evaluating the PIM characteristics of planar transmission lines and is compatible with conventional PIM measurements. Using nonlinear high-frequency circuit simulations, we quantitatively evaluated the impact of small impedance mismatches on PIM measurements. Additionally, we introduced TRL calibration into this PIM measurement system to propose a PIM estimation method that can eliminate the impact of mismatch loss. By analyzing the residual PIM effects of non-contact connectors, we identified that there exist sample dimensions where the residual PIM cancels each other out, and the generated PIM from sample is maximized. We also constructed a non-terminated measurement system based on this concept and examined its compatibility with the terminated method. As a result, it was shown that the maximum measured value of the non-terminated method is higher than that of the terminated method.

研究分野：無線通信工学

キーワード：移動体通信 Passive Intermodulation 無線通信 電波測定 雑音測定 非線形現象

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

移動体通信システム分野では、将来に向けて更なる高速・大容量化・低遅延性を旨とした研究開発が進められている。基地局で発生するノイズは、それを妨げる要因の一つとなる。中でも実装状態に敏感なノイズは変動予測が難しく、回線設計マージンを増加させる。またこれに対して誤り訂正のようなソフト的手法を多用すると、通信の高速性や低遅延性が損なわれる。これにより移動局は送信電力を無駄に消費し、実効的カバーエリアも減少してしまう(図1)。よってノイズをより正確に測定する技術を確認し、これをノイズ低減に資する材料や実装技術などの開発へと発展させるなど、ハード的なアプローチでの研究が必要となる。

Passive Intermodulation (PIM)はアンテナやフィルタ、整合終端器、そしてそれらを接続する伝送線路やコネクタなど、一般的線形回路や部品に残留する微弱な非線形性により発生する特殊なノイズである。PIM特性は、一般的な評価指標である反射係数特性とは相関がないため、PIM特性については、反射係数とは別の独立した測定が必要となる。

PIMはコネクタ着脱による接触状態の変化など、実装状態に対して極めて敏感である。よって測定系と試料の着脱繰り返しは、測定の信頼性を著しく損ねる。そのため、不要なPIM発生の原因となるコネクタ接続を減らすための試みがなされている。その一つが、終端負荷が不要な非接触測定法(無終端法、図2(b))である。この方法では整合終端を無くし、かつ被測定試料を測定用同軸円筒と電磁界結合させることで、試料着脱用のコネクタを完全に排除している。この無終端法は再現性や安定性の面で大きな利点を有するが、インピーダンス整合条件による制約を受けた測定法でないため、得られた測定結果を実際回線設計に直接生かすことができないことが難点であった。

終端負荷を用いた従来の測定手法(整合終端法と呼ぶ、図2(a))では、実運用状態に近い形で試料のPIM特性を評価できる点で実用的だが、コネクタ接続が持つ不確かさを常に含んだ性能評価となる点で信頼性に欠ける。一方で無終端法は非接触測定であり、導体材料・素材としての特性評価手法としては信頼性・実用性共に高い。しかし実運用状態に近い形でPIM特性評価という観点からは実用性が低い。このような事情から、信頼性と実用性を両立したPIM測定法の実現するためには、伝送線路として被測定試料を評価することが可能な非接触無終端法を実現し、整合終端法との互換性を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、不平衡系線路であるマイクロストリップ線路(図3(a))のPIM測定において、整合終端法と互換性のある無終端法を実現することである。またこの過程において、定在波を含めた伝送線路内外の近傍電磁界分布がPIM測定に与える影響を考察し、両測定法の互換性を確立することも目的である。

上記の問題を解決するために、本研究計画では平衡系PIM測定系(図3(b))を新たに導入・構築し、

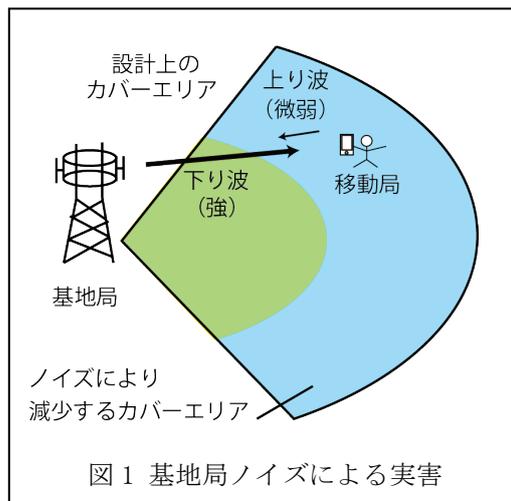


図1 基地局ノイズによる実害

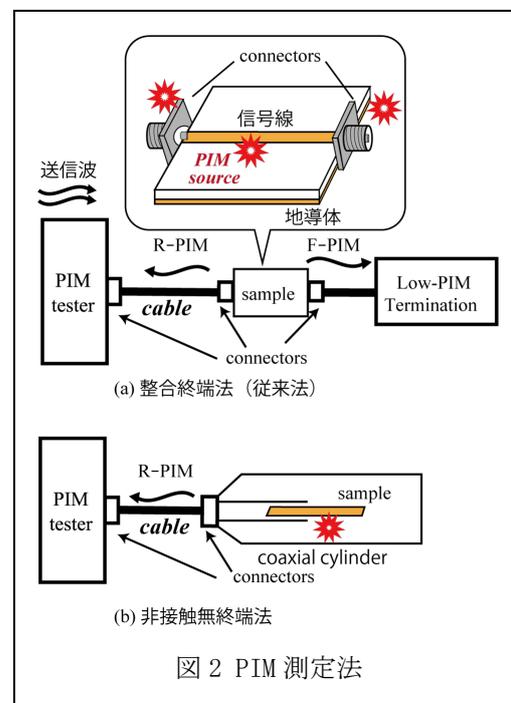


図2 PIM測定法

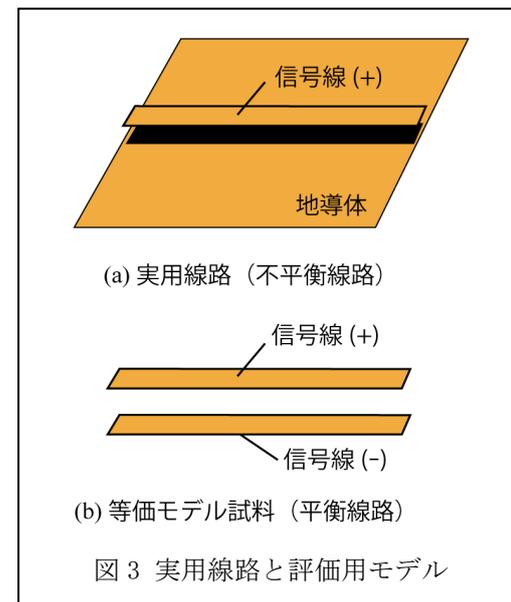


図3 実用線路と評価用モデル

そこで平衡線路により構成された等価モデル試料を非接触評価できることを示す。これにより地導体がある不平衡マイクロストリップ線路(図3(a))と等価な電磁界分布でのプリント線路のPIM性能評価を実現することができる。

これらの研究成果により、測定プロセスから金属接触コネクタの着脱が完全に排除されるため、PIM測定の精度は飛躍的に向上する。これまでPIM特性評価にかかっていた労力が激減し、誰の手でも容易かつ再現性よくPIM特性評価ができるようになる。これは更なる低PIM材料の研究開発に貢献し、移動体通信の高速・低遅延化に貢献することになる。

3. 研究の方法

まず既存の測定法である終端法に対応する平衡系PIM測定系を構築した(図4(a))。ここでは低PIM終端や非接触コネクタ等の部材の実現を主な課題とした。次に平衡系PIM測定用の無負荷測定系を構築した(図4(b))。続いて伝送線路としての電磁界分布を考慮した終端法および無終端法、双方に共通な標準試料を考案・選定・評価を行った。その上で、両測定法の互換性を定量的に評価した。最後にこれらの成果をふまえ、高感度化に関する検討を行った。

これらは原理検討のため、すべて誘電体基板を用いて実施した。原理確認用の評価試料としては、高いPIMを発生するニッケル箔およびニッケルメッキ銅箔で構成したプリント線路を用いた。

なお無終端法では試料上の電流分布が一定でないことが従来の終端法と大きく異なっている。この影響を定量的に評価化するために、終端法と無終端法の双方で評価可能な共通試料の実現し、かつその差異を、調波平均法を用いた等価回路シミュレーションにより定量的に表現した。

4. 研究成果

既存の測定法である終端法に対応する平衡系PIM測定系を構築した。その際に、被接続線路の形状を変えずに非接触接続を実現できることが新たな特徴となる平衡系PIM測定系用非接触コネクタとその設計法を開発した。また可変参照信号を発生でき、終端器や測定系のPIM性能定量化という新たな付加価値を有する新たな低PIM整合終端を開発した。

また集中定数等価回路と調波平均法を用いた高周波回路シミュレーションを導入し、各種検討を進めた。これにより微小なインピーダンス不整合がPIM測定に与える影響を定量的に把握できるようになり、かつその影響が予想よりも大きいものであることを確認した。そのため、平衡系線路を用いた非接触PIM測定法にTRLキャリブレーションを導入し、測定系内の不整合損の影響を除去できるPIM推定法を提案した。

非接触コネクタにおいて発生する残留PIMが測定結果に与える影響およびその低減法をシミュレーションにより解析した。その結果、終端法においては、2つの非接触コネクタで発生する残留PIMが互いに打ち消し合い、かつ試料内で発生するPIMが最大化する資料寸法が存在することを明らかにした。また3次PIMの場合には線路内波長の4分の1が適切であることを確認した。

一方で、より簡易な測定法となる無終端法の測定系を構築し、その動作、および終端法に対する測定値換算について検討を行った。また両測定法における共通標準試料として、「被接触コネクタ領域で発生するPIMの影響」を無視できるような、非接触コネクタ領域以外を部分的にニッケルメッキした被測定試料を提案した。またそれを利用して終端法および無終端法の互換性および測定結果の相互換算を検討した。その結果、3次PIMでは無終端法の測定最大値が整合法より最大24dB高くなることを示した。また周波数変動のある測定装置・被測定試料間の結合量の除去方法を検討した。終端法では本補正により測定結果が一定値に収束するが、無終端法では補正結果が試料長に依存し、かつ比較的大きな誤差が観測されることを確認した。

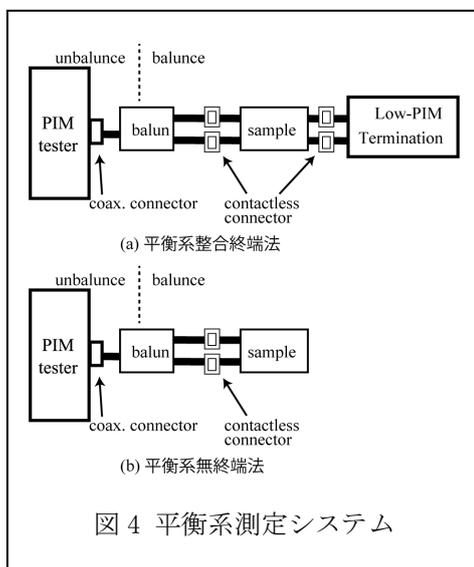


図4 平衡系測定システム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 室伏 竜之介、久我 宣裕、花山 英治	4. 巻 J105-B
2. 論文標題 被接続線路の構造を変更不要なMSL用非接触コネクタ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 802 ~ 803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2021MJL0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kuwata Masayoshi、Kuga Nobuhiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Residual noise identification for PIM measurement systems using variable low-PIM termination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 772 ~ 777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2022COL0030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Xiao Kun、室伏 竜之介、久我 宣裕	4. 巻 J106-B
2. 論文標題 非接触PIM測定における高強度IM源の物理的構造の影響評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 398 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2022BLL0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 MUROFUSHI Ryunosuke、KUGA Nobuhiro、HANAYAMA Eiji	4. 巻 E106.B
2. 論文標題 Non-Contact PIM Measurement Method Using Balanced Transmission Lines for Impedance Matched PIM Measurement Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1329 ~ 1336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2023CEP0004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 室伏 竜之介、久我 宣裕、花山 英治	4. 巻 J107-C
2. 論文標題 整合終端を用いないマイクロストリップ線路用非接触PIM測定系の原理的検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C エレクトロニクス	6. 最初と最後の頁 107 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2023PJP0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shirakawa Musashi, Murofushi Ryunosuke, Kuga Nobuhiro, Hanayama Eiji	4. 巻 13
2. 論文標題 Determination of optimal sample length for passive intermodulation measurements in microstrip lines with non-contact connections	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 210 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/comex.2024XBL0026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iori Serizawa, Nobuhiro Kuga	4. 巻 13
2. 論文標題 System residual noise reduction for non-contact passive intermodulation measurements of array antennas using multiple testers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express (In press)	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 室伏 竜之介、白川 武蔵、久我 宣裕、花山 英治
2. 発表標題 容量結合3ストリップ共振器を用いた無終端法PIM測定系によるPIM測定
3. 学会等名 2024電子情報通信学会総合大会, B-1C-22
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 白川武蔵, 村田翔, 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治
2. 発表標題 厚み違いのマイクロストリップ線路を接続可能な非接触コネクタ
3. 学会等名 2024電子情報通信学会総合大会, B-1C-21
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治
2. 発表標題 伝送線路の結合量補正による整合法と無終端法のPIM関連の評価
3. 学会等名 2023電子情報通信学会アンテナ伝搬研究会, 2023年4月
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治
2. 発表標題 マイクロストリップ線路と電氣的に等価な平衡線路における受動相互変調の非接触測定系
3. 学会等名 2024電子情報通信学会アンテナ伝搬研究会, 2024年3月.
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治
2. 発表標題 容量結合3 ストリップ共振器を用いた無終端法PIM測定系のPIM評価
3. 学会等名 2023電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-1-108
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 白川武蔵, 村田翔, 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治
2. 発表標題 PIM測定における非接触コネクタの影響軽減手法
3. 学会等名 2023電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-1-109
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治
2. 発表標題 整合法による平衡化MSL上で発生するPIMの評価
3. 学会等名 2022電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-2-32
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 白川武蔵, 室伏竜之介, 久我宣裕
2. 発表標題 平衡系PIM測定用終端器の構成
3. 学会等名 2022電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-2-33
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 肖崑, 室伏竜之介, 久我宣裕
2. 発表標題 調波平均法を用いたアンテナの非接触PIM測定におけるプローブ結合損失の影響評価
3. 学会等名 2022電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, C-2-33
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 白川武蔵, 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治
2. 発表標題 平面線路のPIM測定における非接触コネクタの影響評価
3. 学会等名 2023電子情報通信学会総合大会, B-1-123
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 小川公基, 白川武蔵, 久我宣裕
2. 発表標題 リングハイブリッドを用いた非接触接続可能な立体型バラ
3. 学会等名 2023電子情報通信学会総合大会, B-1-124
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Musashi Shirakawa, Ryunosuke Murofushi, Nobuhiro Kuga, Eiji Hanayama
2. 発表標題 Small and planar termination for non-contact PIM measurement using planar balanced-transmission line
3. 学会等名 2022 Asia Pacific Microwave Conference, pp.958-960, (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 山下多聞, 桑田昌佳, 久我宣裕
2. 発表標題 可変IM源と線形減衰器を用いたPIM測定系のシステムノイズ同定
3. 学会等名 2021電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-1-89
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 桑田昌佳, 久我宣裕
2. 発表標題 可変IM源と線形減衰器を用いたPIM測定系のシステムノイズ同定
3. 学会等名 2022電子情報通信学会総合大会, B-1-173
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 江尻真希志, 桑田昌佳, 室伏竜之介, 久我宣裕, 花山英治,
2. 発表標題 集中定数型IM源を用いた平衡系PIM測定と不平衡系PIM測定のための測定レベル換算に関する検討
3. 学会等名 2022電子情報通信学会総合大会, B-1-178
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 江尻真希志, 桑田昌佳, 久我宣裕
2. 発表標題 同軸管を用いた平面回路用小型IM源の特性評価
3. 学会等名 2021電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-1-91
4. 発表年 2021年～2022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
---------	---------