

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06057

研究課題名(和文) 汎用電波暗箱を用いたアンテナのPIM測定の高感度化に関する研究

研究課題名(英文) Study on sensitivity enhancement of antenna-PIM measurement using a small anechoic box.

研究代表者

久我 宣裕 (Kuga, Nobuhiro)

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：アンテナで発生する相互変調ひずみ(PIM)測定の高感度化について検討を行った。PIM増加の要因となるコネクタ着脱を排除するために、励振及びPIM検出用にアンテナを用いた非接触PIM測定手法を提案した。ここではアンテナ間結合の影響をネットワークアナライザによる測定結果により補正することで、アンテナ間の相対位置に依存しない一意な測定結果を導出できることを示した。また測定結果と既存の測定法の互換性も確認した。

また測定感度を改善するために、システム残留ノイズの低減法を議論した。低PIM導線を用いたPIM発生源特定手法、および電波吸収体の非接触PIM測定法を新たに提案し、その効果を実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：Sensitivity improvement of passive intermodulation (PIM) measurement for antenna is discussed. To avoid mechanical connection which is a potential PIM source in measurements, a non-contact PIM measurement method in which another antenna is used for excitation and PIM detection was proposed. It is shown that a unique value being independent of the antenna position can be derived by compensating the effect of the mutual coupling between the antennas measured by a network analyzer. It is also confirmed that the measurement is compatible with the conventional method.

As another approach to improve the sensitivity in measurement, the method to reduce the system residual noise is discussed. The method using a low-PIM conductive wire is proposed for PIM-source identification and PIM-performance evaluation of electromagnetic wave absorbers, and its effect is also shown in this project.

研究分野：無線通信

キーワード：Passive Intermodulation mobile communications microwave measurements antenna measurements  
相互変調ひずみ 電波暗箱 アンテナ測定 PIM

### 1. 研究開始当初の背景

Passive InterModulation (PIM)は(線形回路として設計された)受動回路の微弱な非線形性により発生する相互変調ひずみ現象であり、一般的インピーダンス整合特性からは予測できない評価指標である。

図1はその具体例の一つであり、二種類のマイクロ波用終端器 RT (点線)と CT (実線)の反射係数特性およびPIM特性を示したものである。図1(a)に示すように、両サンプルとも反射係数は-20dB以下であり、実用上ほぼ同等かつ良好な特性を呈している。一方で図1(b)に示すように、PIM特性(-43dBm×2波励振、3次PIM)では約70dB程度の大きな差異が生じている。本測定条件の例ではPIMに対する要求仕様として-100dBm以下が要求されることが多い。その観点からは、サンプルCTは良好な特性であるが、サンプルRTのPIM特性は-60dBm程度となり、劣悪な特性であるといえる。このように両者とも極めて微弱な非線形性に起因するひずみ現象であるが、反射係数特性からは予測できないような大きな差異となってシステムに影響を与えることがわかる。

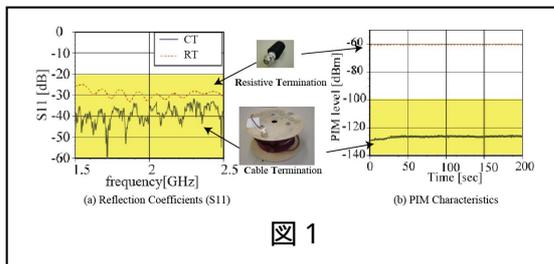


図1

PIMは移動体通信、深宇宙通信等で用いられる送受信共用アンテナシステムにおいて問題となる。これは送信波によって励振されたPIMの周波数が受信波と同一だった場合、PIMをフィルタにより識別除去することは不可能だからである。この問題は、セルラ電話基地局システムを例に挙げれば、特にセルエッジにおける通信速度の大幅な劣化、すなわちサービスエリアの縮小という形の被害を与える。このようにPIMは絶対量としては極めて小さな雑音であるが、システム設計上大きな意味を持つ現象であり、根本的な対策が不可欠な現象である。

PIMに関する研究は、異種金属接触やトンネル効果など電気接点に関わる事例が多数報告されている。また2000年前後よりプリント基板回路自身で発生するPIMが問題とされるようになり、申請者をはじめ欧米の研究者、技術者がこの問題に取り組んできた[1][2]。このようにPIMに関する研究が進むにつれ、システム設計者から求められるPIM特性に対する要求も日々厳しくなっている。一例としては、セルラ電話システムでは700MHz~2.6GHzなど広範な周波数帯でアンテナを共用する必要が生じており、そこでのPIM抑制技術が極めて重要になってきている。

これに対し、申請者はPIM測定法の信頼性

および作業性の向上に関する研究に取り組んできた。例えば科研費(H17~H19)により開発した先端短絡伝送線路法はその一例である[2,3]。これはセミリジッド同軸線路の先端に被測定試料をハンダ接続するだけの簡易な測定方法であるが、特に整合終端が不要という点が従来手法に対する大きな優位性といえる。

また同軸管のような小型金属遮蔽体の中で試料のPIM測定を非接触測定する手法も提案された[3]。この手法は各種サンプルの接続にコネクタを使用しないため、PIM特性の高感度かつ安定した測定を実現することに寄与した。しかし上記手法は同軸管内に配置可能な一次元形状の試料に限定されるため、アンテナなど三次元形状を有する試料の測定には適用できないという難点があった。

以上のような背景から、アンテナのPIM特性測定の非接触化や、アンテナのPIM測定における周囲環境の影響評価などが求められていた。これに対し本研究課題では、電波吸収体で裏打ちされた汎用小型電波暗箱を用いた非接触PIM測定法の実現、および測定感度の向上等を目指した検討を計画することとなった。

[1]A.G.Schuchinsky,et.al., "Distributed sources of passive intermodulation on printed lines," IEEE AP-S/URSI Symp., USA, June 2005

[2]Y.Yamamoto, N.Kuga, "Short-circuit transmission line method for PIM evaluation of metallic materials," IEEE Trans. on EMC, vol.49, no.3, August 2007  
 [3]Y.Yamamoto, N.Kuga, "PIM characteristics of resistive loads," Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings, Vol.5, DOI:10.1109/APMC.2005.1607015, 2005

[4]D.Ishibashi, N.Kuga, "Non-contact PIM evaluation method using a standing wave coaxial tube," IEICE Trans. on Electron., vol. E95-C, no.9, pp1508-1514, September 2012

### 2. 研究の目的

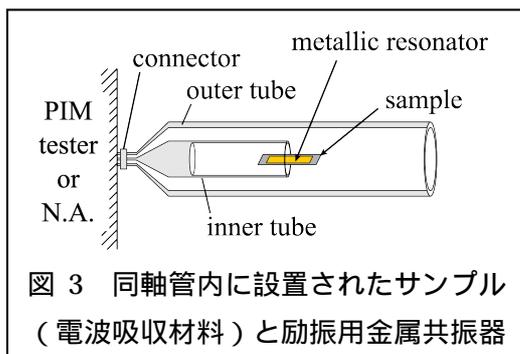
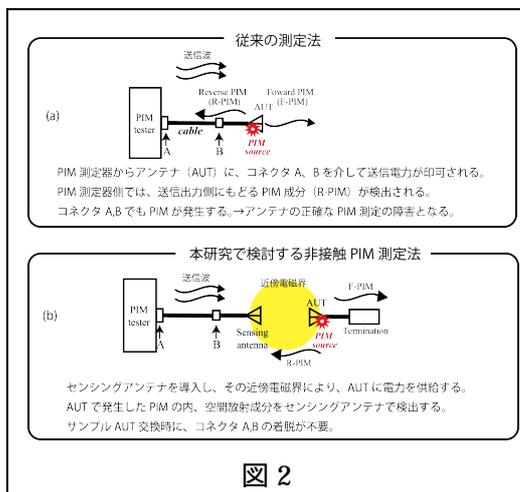
アンテナのPIMを測定する場合、測定系ケーブル着脱やアンテナ周囲の環境条件により測定精度や感度、信頼性が大きく左右される。そのため本研究は、電波暗箱内におかれたアンテナのPIM特性評価を対象とし、その測定感度および精度、測定作業性を飛躍的に改善する技術の提供することを目的とする。

具体的には電波暗箱内で、アンテナを完全非接触測定する際に有効な等価回路モデルを導出し、その有効性を実証する。併せて電波暗箱内に存在する電気接点および電波吸収体で発生するPIMを定量的評価法および低減法を提案する。またアンテナに近接配置可

能な薄型吸収体の実現とその PIM 特性の評価法を実現することにある。

### 3. 研究の方法

汎用電波暗箱を用いて、アンテナの PIM 特性測定を高感度を実施することを目標に各種検討を行う。具体的には高感度測定を実現するために、図 2(b)に示すような、不要な PIM の発生要因となるコネクタ着脱を測定から排除した非接触測定法を実現するための検討を行っている。本研究では、被測定アンテナのモデルとしてプリントダイポールアンテナを用い、これを広帯域パッチアンテナの近傍界を介して励振および PIM 検出を行う。また材料・部材で発生する PIM についての分析は、研究代表者らが過去に提案している同軸管を用いた非接触 PIM 測定を利用する。



(1) アンテナの近傍界を用いた非接触 PIM 測定法を実現し、励振アンテナと被測定アンテナの間隔に依存しない評価量の抽出を実現する。また既存の PIM 測定法との互換性について評価する。

アンテナの近傍界を用いて被測定アンテナを励振する場合、励振状態が両アンテナ間の距離に依存してしまう。これをアンテナ間の相互結合量を何らかの手法で取得し、その影響をポストデータ処理により除去することをめざした。本研究では、ネットワークアナライザにより直接測定した相互結合量を用いて、測定結果の位置依存性が除去できる

という原理をまずは示している。これは研究代表者が既に提案しているの同軸管を用いた非接触 PIM 測定法のコンセプトを発展させたものである。本検討は、従来の同軸管内で測定できない三次元形状を有する大形試料の測定を可能にするために有用な検討とも言える。

また本研究で検討される非接触 PIM 測定の結果が、従来の手法で得られた結果 (PIM 測定器に被測定アンテナを直接接続した際に得られる PIM 特性) と一致することを示すための検討を実施する。その上で、従来の測定手法と本提案手法において、測定結果の差異により得られる情報についても分析する。

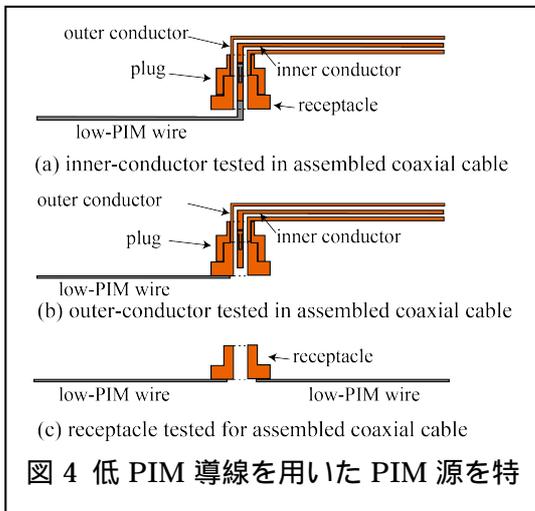
(2) 測定感度を改善するために、システム残留ノイズを低減し、また不要 PIM の発生原因の特定手法を考案する。

PIM 測定系は様々な部品の集合体であり、部材の界面や接続部においては常に PIM が発生しており、その状態は常に変動していると言っても過言ではない。そのようなノイズ源の集合体である測定系の中で、測定感度の根本的な改善を実現するためには、材料・部材レベルでの PIM 発生源を特定する必要がある。

本研究では測定系内での PIM 発生要因を特定するために、図 3 に示した同軸管を用いた PIM 測定手法を利用する。また図 4 に示すような被測定部材と低 PIM 材料を組み合わせた導体共振器を構成し、これを同軸管による非接触 PIM 測定法により評価する。なお、測定精度と再現性を定量的に評価するために、ネットワークアナライザによる反射係数測定の結果を積極的に利用する。すなわち、同軸管を用いた非接触測定により、試料に対して極めて再現性のよい反射係数評価をおこない、その上で PIM 特性の差異を評価する。

(3) 電波吸収体の PIM 性能を定量的に評価するための手法を考案する。

電波吸収体はアンテナの PIM 測定において不要な PIM を発生させないために不可欠なコンポーネントであるが、その一方で、電波吸収体自体から発生する PIM を取り扱った研究例は極めて少なく、具体的かつ直接的な測定結果に関する報告もこれまでに例がない。そのため、本研究では図 3 に示すような同軸管を用いた非接触測定法を用いて、電波吸収体から発生する PIM を検出・評価することを試みる。具体的には、同軸管内に設置した線状導体共振器の強い近傍電磁界により電波吸収体を励振し、かつ発生する PIM を効率よく検出しようとするものである。本研究では本手法の有効性を確認するために、入手しやすく、かつ加工性のよい誘電性電波吸収体とゴムフェライト吸収体等をサンプルとして検討を行う。



#### 4. 研究成果

(1) アンテナ近傍界を用いた非接触 PIM 測定法を提案し、測定結果が既存の PIM 測定法と互換性を有することを確認した。また励振アンテナと被測定アンテナの間隔に依存しない評価量の抽出を実現した。

励振アンテナと被測定アンテナの間隔に依存しない測定法を実現するために、同軸管を用いた PIM 測定法で用いられている理論を電波暗箱へ拡張することを試みた。まずここでは、暗箱内に設置したセンサアンテナの反射係数の測定結果から、電波吸収体の損失を推定できることを示した。(鈴木、久我、信学通ソ大 B-1-151, 2015 年 9 月)しかし、その結果から被測定物への伝送電力の推定することは、精度の観点で問題となることが明らかになった。そのため被測定物に測定端子を設けて伝達特性を精密に測定することで原理の確認を行うこととした。その結果、これまでの非接触測定理論が電波暗箱を用いた非接触測定にも適用可能である事を原理的に示すことができた。(H.Suzuki, N.Kuga, URSI AP-RASC 2016, A4-1, 2016)

次に被測定アンテナに接続する終端の低 PIM 化に関する検討を実施した。整合終端器の低 PIM 化に加え、開放スタブを終端として利用することも検討し、その効果を確認した。また、開放スタブ終端と整合終端の両終端使用時の測定について、測定値の換算法を提案した。(鈴木、久我、信学通ソ大 B-1-126, 2016 年 9 月, 鈴木、久我、信学総大 B-1-142, 2017 年 3 月)

その後、従来の測定手法と本研究課題で検討する非接触アンテナ測定の測定差異について、原因の考察を行った。その結果、アンテナ給電回路内に存在する PIM 源については測定手法によらず同じ測定結果が得られることを確認した。一方で給電回路外に存在する外部 PIM 源は、非接触測定において測定誤

差を生じさせうることを確認した。上記の考察より、またこれ以前に問題となっていた開放スタブ終端と整合終端の両終端使用時の測定における測定誤差の原因が、PIM 源の位置とアンテナ励振方法に起因することを明らかにした。(大河、久我、信学通ソ大会 B-1-155, 2017 年 9 月, 大河、久我、信学総大 B-1-148, 2018 年 3 月, R.Ookawa, N.Kuga, Proc. of 2017 APMC, TH3-A, pp.1163-1166, 2017)

(2) 外部信号の注入してシステム残留ノイズを低減する手法を考案し、効果を確認した。また測定系内の不要 PIM について発生原因を特定するための手法を考案し、コネクタ付き同軸線路の評価を通して有効性を示した。

まず PIM 測定器の残留ノイズを外部信号注入により低減する手法を考案し、これが汎用電波暗箱での測定にも効果を有することを実験により確認した。(鈴木、久我、信学総大 B-1-231, 2016 年 3 月)

次に PIM の原因となる各種微小抵抗の評価モデル実験として、チップ抵抗の PIM 特性を、同軸管を用いた非接触測定により評価する実験を行った。その結果、反射係数測定では設計仕様の範囲内である試料に対しても、同軸管を用いた非接触相互変調ひずみ測定により PIM の個体差を精度よく評価できることを示した。(室伏、久我、信学通ソ大 B-1-161, 2015 年 9 月, 室伏、久我、信学総大 C-2-75, 2016 年 3 月, 室伏、久我、信学論 C, vol. J99-C, no.11m, pp.527-529, 2016)

上記の測定精度実現を踏まえ、実際のコネクタ付き同軸ケーブル (assembled cable) について、その主たる PIM 発生要因を非接触測定により特定する試みを行った。ここでは原理確認のため、非接触測定用同軸管内部に設置可能な寸法である極細線アセンブリ編組同軸線路を試料として用いた。図 4 に示したように、被評価試料と低 PIM 導線と組み合わせた導体共振器を構成し、その PIM を非接触測定することで、主たる PIM 源を特定できることを確認した。(原、久我、信学ソ大 C-2-31, 2017 年 9 月, 原、久我、信学論 C, vol. J101-C, no.02, pp.91-98, Feb. 2018).

なお本測定手法は、導体共振器により発生する強い電圧・電流、電界・磁界を利用したものである。そのため、測定周波数が低くなると試料の寸法が当然増加する。これに対し、高誘電率板を導体共振器の周囲に設置することで電気長を短縮する手法を提案し、その効果も実証している。(土岐他、信学エレス大 C-2-30, 2015 年 9 月, 土岐他、信学総大 C-2-76, 2016 年 3 月)

(3) アンテナの PIM 測定に不可欠な電波吸収体の PIM 性能評価法を提案した。導体共振器の近傍界を利用することで、電波吸収体の PIM 性能を高感度に評価できることを示した。

低 PIM 導体で導体共振器を構成し、それにより生成した強い電磁界により励振することで、電波吸収体など電気伝導度の幅がある材料の PIM 測定が可能になることを実験的に示した。ちなみに、導体を相加した電波吸収体に関する研究例は、反射係数特性の改善という観点からは過去に報告例があるが、本研究のように PIM 特性に評価に利用する例は過去に例がないものであった。また当初、誘電性電波吸収体の測定結果は理論的に説明しやすい者であったにも関わらず、磁性電波吸収体の測定結果は理論的な説明ができず、これが問題となっていた。しかし、その後の検討により、この原因が磁性吸収体の有する「誘電率」に起因することが新たに確認された。その結果、導体共振器と被測定吸収体の間に空間を設け、被測定材料の実行誘電率を低減することで、高誘電率を有する磁性吸収体でも特性評価ができることを確認した。

(石山,久我,信学エレンソ大 C-2-58,2016年9月,石山,久我,信学総大 C-2-52,2017年3月,S.Ishiyama,N.Kuga,Proc.of IEEE Int'l microwave conf., TH-1A-S, 3pages, June 2017,石山,久我,信学ソ大 C-2-30,2017年9月,石山,久我,信学総大 C-2-40,2018年3月)

#### 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5件)

室伏竜之介,久我宣裕,「同軸管を用いた小形抵抗の非接触 PIM 特性評価」,信学論 C、査読有, vol.J99-C, no.11m, pp.527-529, 2016

原宗大,久我宣裕,「コネクタ勘合を含む極細線同軸線路の非接触 PIM 測定における PIM 要因特定」,信学論 C, 査読有, vol.J101-C, no.02, pp.91-98, Feb. 2018  
Hirota Suzuki, Nobuhiro Kuga, "Non-contact PIM Measurement of Large Samples using a Small Anechoic Box," URSI AP-RASC 2016, 査読有, A4-1, August 21-25, 2016, Seoul, Korea.

Shinji Ishiyama, Nobuhiro Kuga, "Non-Contact PIM Measurement of Dielectric Wave Absorbers by Using a Metallic Resonator," Proc. of IEEE International microwave conference, TH-1A-S, 査読有, 3pages, 4-9 June 2017, Honolulu, Hawai'i, USA

Ryosuke Ookawa, Nobuhiro Kuga, "Reverse-PIM Extraction in Non-Contact Antenna-PIM Measurement" Proc. of 2017 Asia pacific microwave conference, TH3-A, 査読有, pp.1163 - 1166, November 13-16, 2017, Kuala Lumpur, Malaysia

#### [学会発表](計15件)

鈴木寛啓,久我宣裕,「小型電波暗箱を用いた IM 測定における結合量補正に関する検討」,信学ソ大通ソ B-1-151, 2015年9月

土岐亮太,内田康雄,久我宣裕,「同軸管を用いた非接触 PIM 測定における電気的小形試料の測定法」,信学ソ大エレンソ C-2-30, 2015年9月

室伏竜之介,久我宣裕,「誘電体板上の帯状導体に対する円筒導体近似の誤差評価」,信学ソ大通ソ B-1-161, 2015年9月

鈴木寛啓,久我宣裕,「PIM 測定におけるシステムノイズ低減方法に関する検討」,信学総大 B-1-231, 2016年3月

室伏竜之介,久我宣裕,「パランを介した平衡線路の負荷で発生する PIM の測定」,信学総大 C-2-75, 2016年3月

土岐亮太・内田康雄・久我宣裕,「異なる周波数帯における非接触 PIM 測定に関する実験的検討」,信学総大 C-2-76, 2016年3月

鈴木寛啓・久我宣裕,「電波暗箱を用いた非接触アンテナ PIM 測定における終端の影響」,信学通ソ大 B-1-126, 2016年9月

石山真司・久我宣裕,「導体共振器を用いた電波吸収体の非接触 PIM 特性の測定評価」,信学エレンソ大 C-2-58, 2016年9月

鈴木寛啓・久我宣裕,「スタブ終端による非接触 PIM 測定の高感度化」,信学総大 B-1-142, 2017年3月

石山真司・久我宣裕,「電波吸収体の PIM 特性における励振モードの影響」,信学総大 C-2-52, 2017年3月

大河亮介,久我宣裕,「アンテナ IM 測定における励振方法の影響」,信学通ソ大会 B-1-155, 2017年9月

石山真司・久我宣裕,「誘電性電波吸収体の PIM 特性に対する損失特性の影響評価」,信学ソ大 C-2-30, 2017年9月

原宗大・久我宣裕,「接続部を含む燃り線導体の PIM 特性評価」,信学ソ大 C-2-31, 2017年9月

大河亮介,久我宣裕,「アンテナの非接触 PIM 測定における PIM 源位置の影響」,信学総大 B-1-148, 2018年3月

石山真司・久我宣裕,「高誘電率を有する磁性電波吸収体の非接触 PIM 測定」,信学総大 C-2-40, 2018年3月

#### [図書](計0件)

#### [産業財産権]

出願状況(計0件)

なし

取得状況(計0件)

なし

#### [その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久我宣裕 (KUGA, Nobuhiro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80318906