

アンテナ用電磁波暴露型 パッシブIM測定システム

横浜国立大学大学院工学研究院

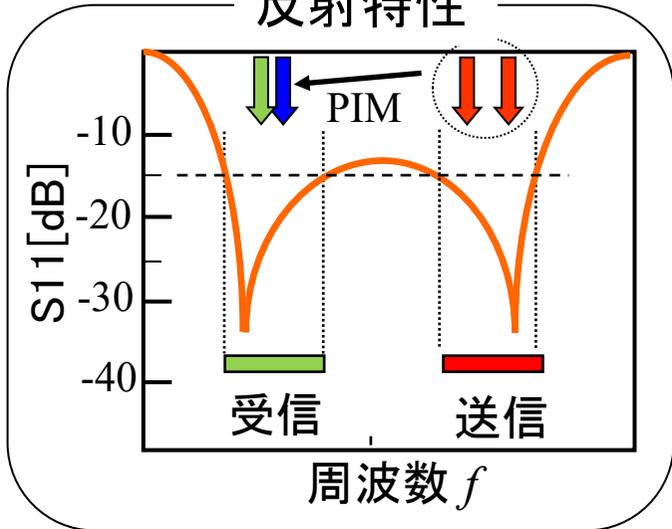
知的構造の創生部門

准教授 久我宣裕

2022年6月9日

移動体通信とパッシブIM

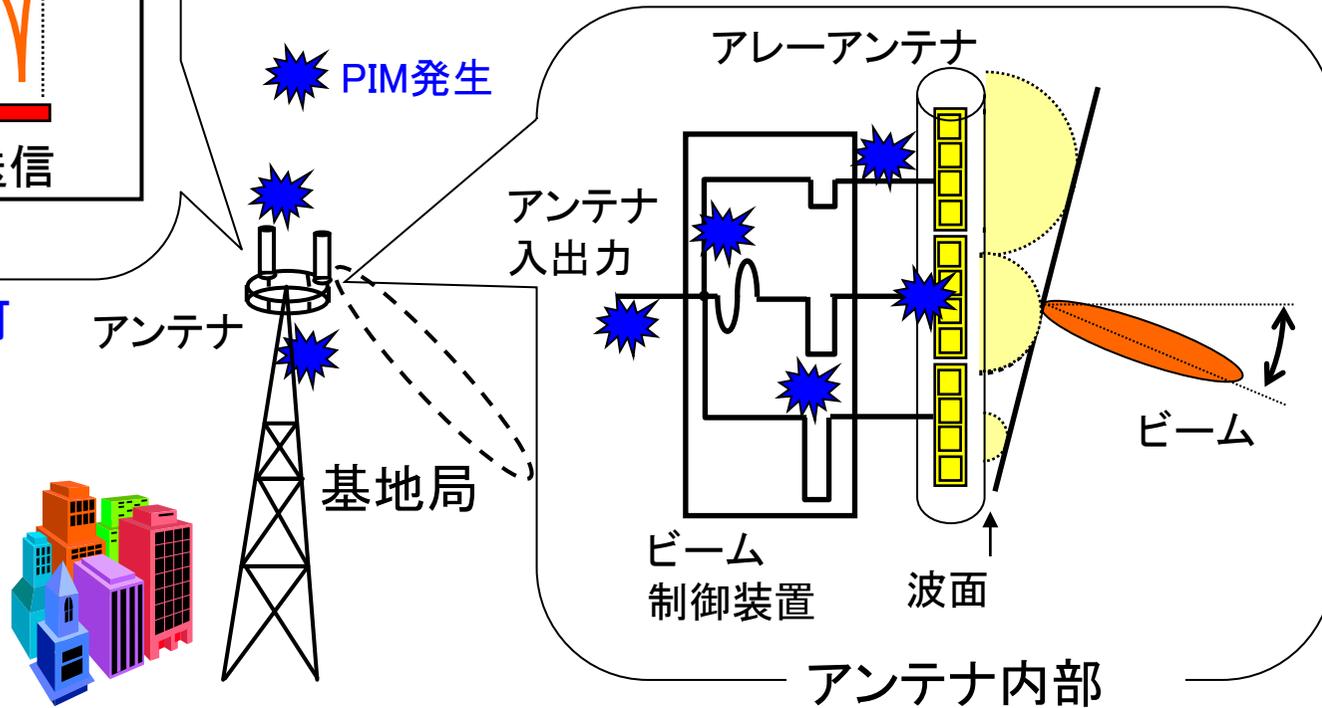
反射特性



PIM:フィルタ除去不可

PIM : Passive Inter-Modulation

受動回路で発生する相互変調ひずみ



$$\underbrace{\text{非線形性}}_{\text{微弱}} + \underbrace{\text{送信電力}}_{\text{強大}} = \underbrace{\text{PIM}}_{\text{微弱}}$$

$\approx 43\text{dB}_m$

← 干渉 →

アップリンク波
微弱

反射係数とPIM

- マイクロ波コンポーネントの評価指標

- 反射係数(S11) → 「インピーダンス整合良否」の指標

- ◆ 例) S11<-20dB → **PASS!**

- 相互変調ひずみ(PIM) → 「残留する非線形性」の指標

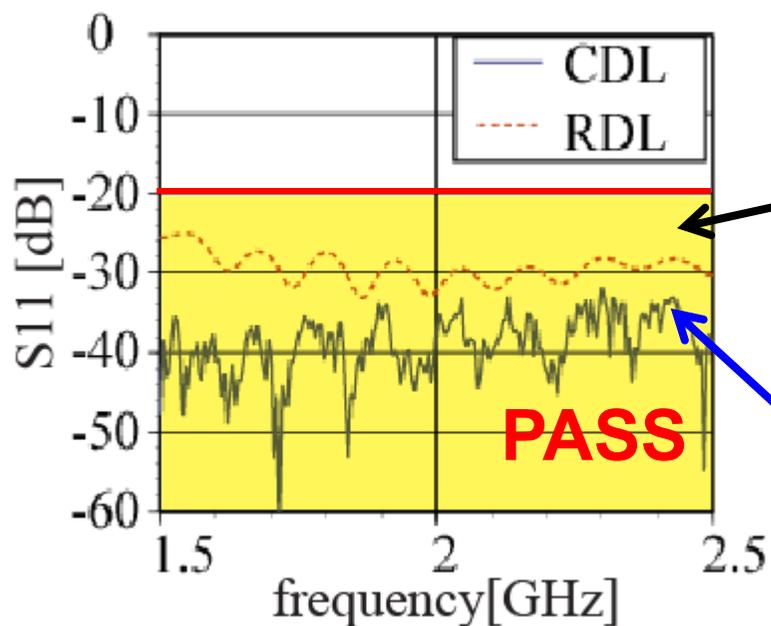
- ◆ 例) 43dBm(20W) × 2波

- 抵抗終端(汎用) : -60dBm → **BAD!**

- ケーブル終端 : -130dBm → **GOOD!**



S11による評価不可



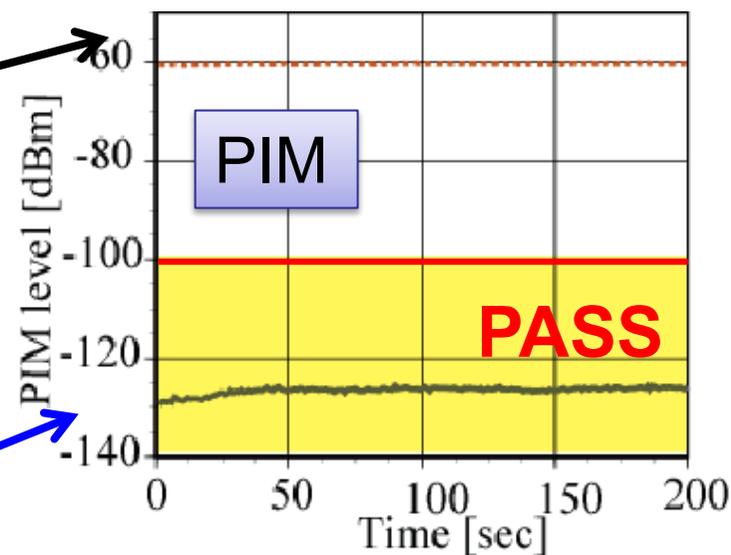
反射係数(S11)



抵抗終端器



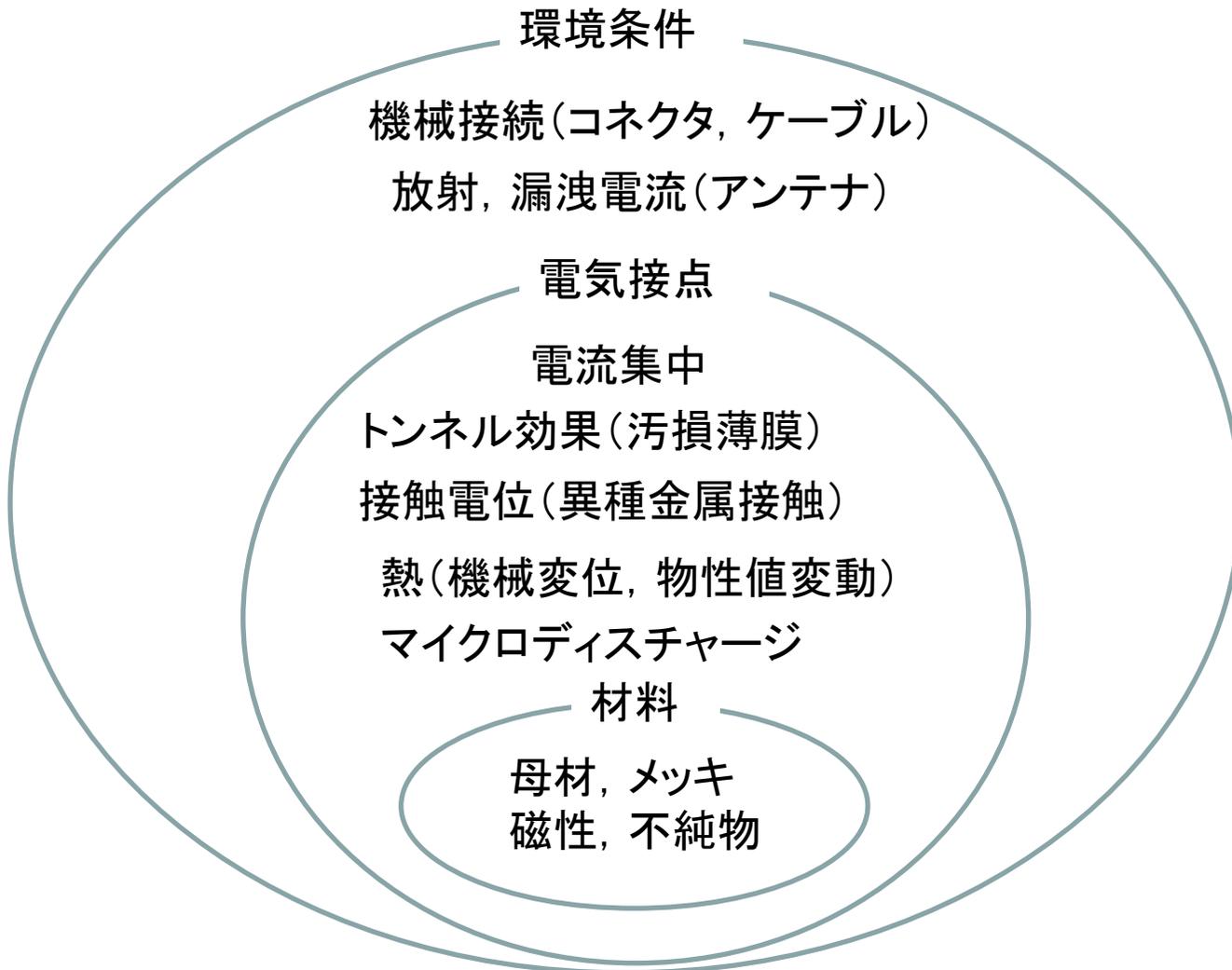
ケーブル終端器



相互変調ひずみ(PIM)

PIMの原因

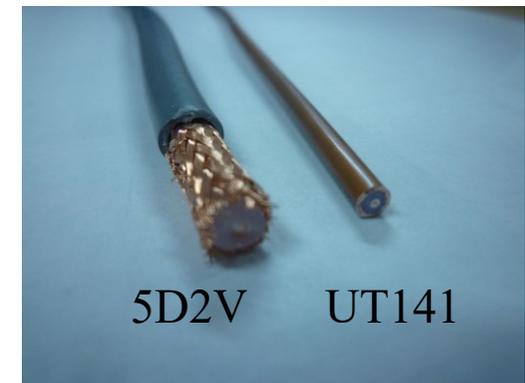
◎問題となるデバイス：送信・受信で共用するコンポーネント
例)コネクタ, ケーブル, フィルタ, 移相器, 電力合成器, アンテナ



SMA

DIN7/16

コネクタ



5D2V

UT141

ケーブル

アンテナのPIM測定

直接測定法

Direct Measurement

従来の測定法

図 1

送信波

Reverse PIM (R-PIM)

Foward PIM (F-PIM)

PIM tester

cable

A

B

PIM source

AUT

PIM測定器からアンテナ（AUT）に、コネクタ A、B を介して送信電力が印可される。PIM測定器側では、送信出力側にもどる PIM成分（R-PIM）が検出される。コネクタ A、B でも PIMが発生する。→アンテナの正確な PIM測定 の障害となる。

非接触測定法

（受信のみ）

Partially Non-Contact Measurement

過去の研究例（部分的非接触測定）

図 2

送信波

F-PIM

PIM tester

Tx

Rx

cable

A

B

PIM source

AUT

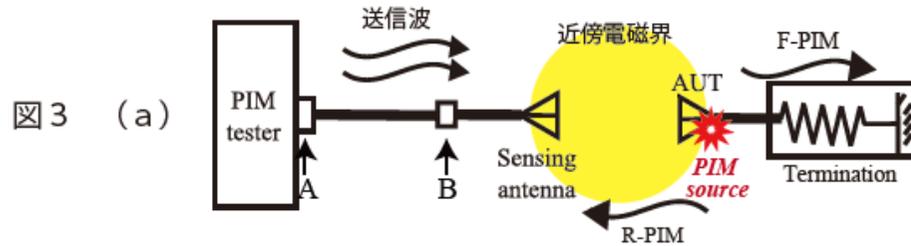
C

cable

AUTで発生した PIM の内、空間放射成分（F-PIM）を違うアンテナで検出する。送信電力はコネクタ A、B を介した物理的な接続により供給される。

完全非接触PIM測定

本研究で検討する非接触 PIM 測定法

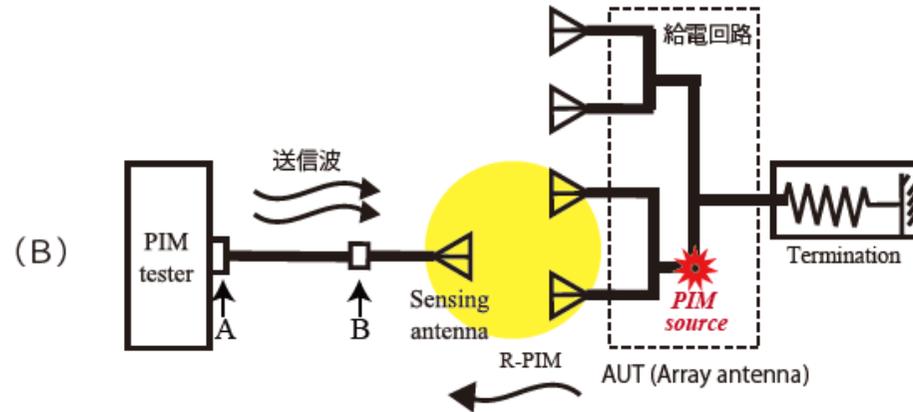


センシングアンテナを導入し、その近傍電磁界により、AUT に電力を供給する。
AUT で発生した PIM の内、空間放射成分をセンシングアンテナで検出する。
サンプル AUT 交換時に、コネクタ A,B の着脱が不要。

電磁波暴露型



送信の非接触化



AUT がアレーアンテナの場合、PIM 源と PIM テスタをつなぐ経路は複数化・複雑化する。
単一素子をセンシングアンテナに利用。→ 経路を限定できる。→ PIM 源の位置特定法の検討。
アレー型センシングアンテナ → 一般化できるが、非常に複雑。 → 本研究以降の課題。

Non-Contact Measurement

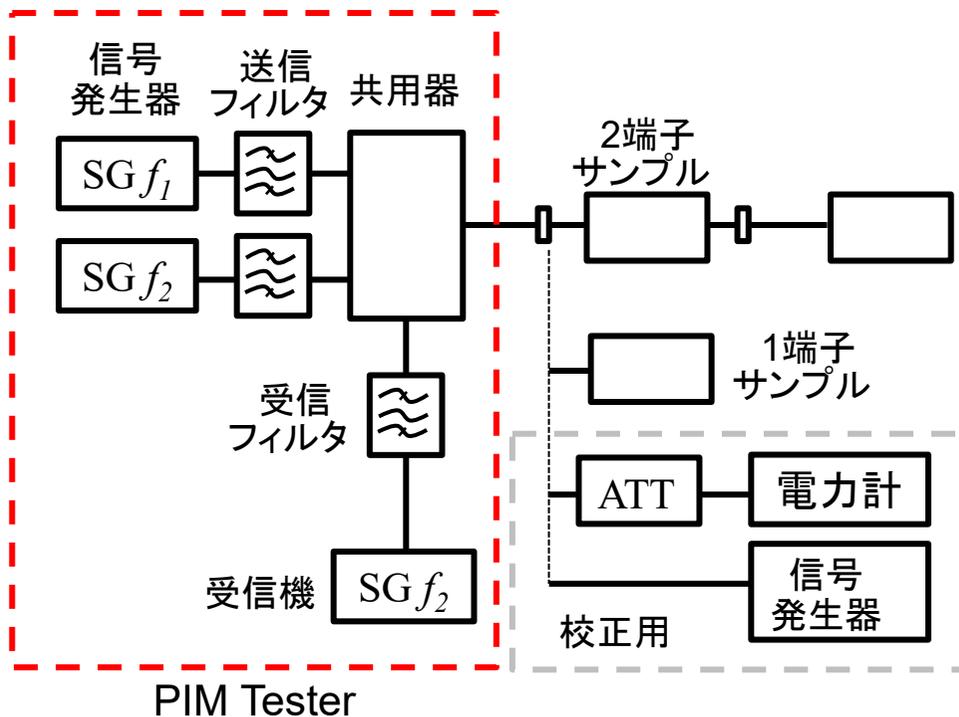
従来技術とその問題点

既に実用化されているものには、IEC標準等で紹介される**直接測定法(DM)**等があるが、

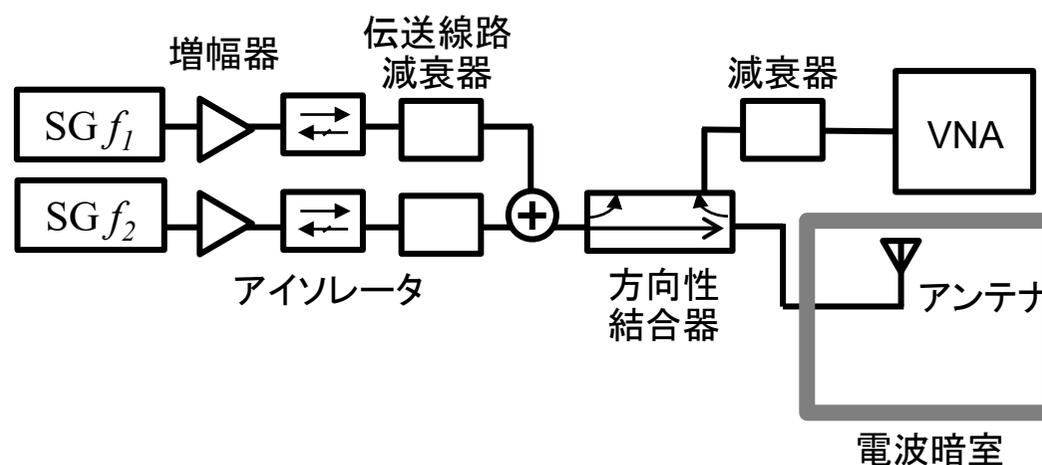
- ・ **測定器接続に起因するPIM** → **測定精度劣化**
 - ・ **大電力測定** → **低PIM測定系構築の労力大**
- 等の問題がある。

アンテナPIMの直接測定

文献[3]



文献[4]



PIM源 (電気接点、磁性体) を「大きな送信電力」が通過

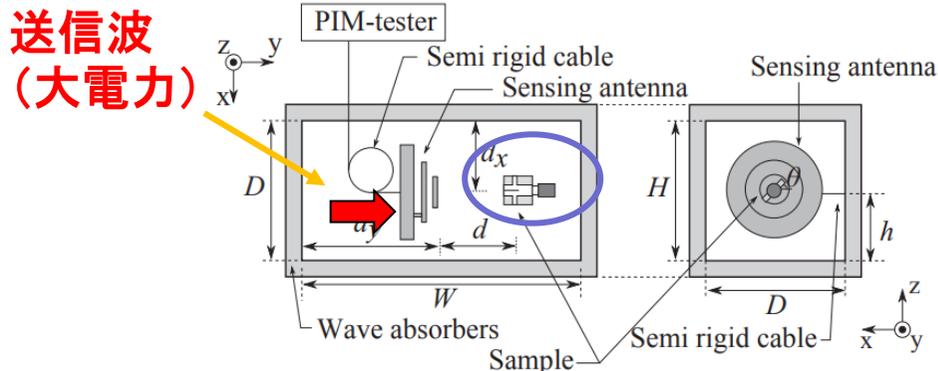
↳ コネクタ: 着脱の繰り返し → 不安定なPIM源 → 不安定な測定

[3] IEC International Standard 62037-1

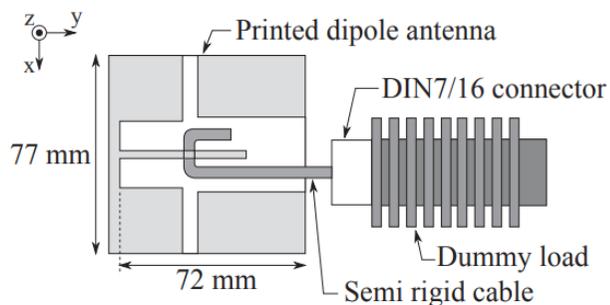
[4] J. R. Wilkerson, *et.al.* "Passive Intermodulation Distortion in Antennas," IEEE Trans. AP., Vol. 63, no.2, Feb. 2015.

非接触アンテナPIM測定

文献[5]

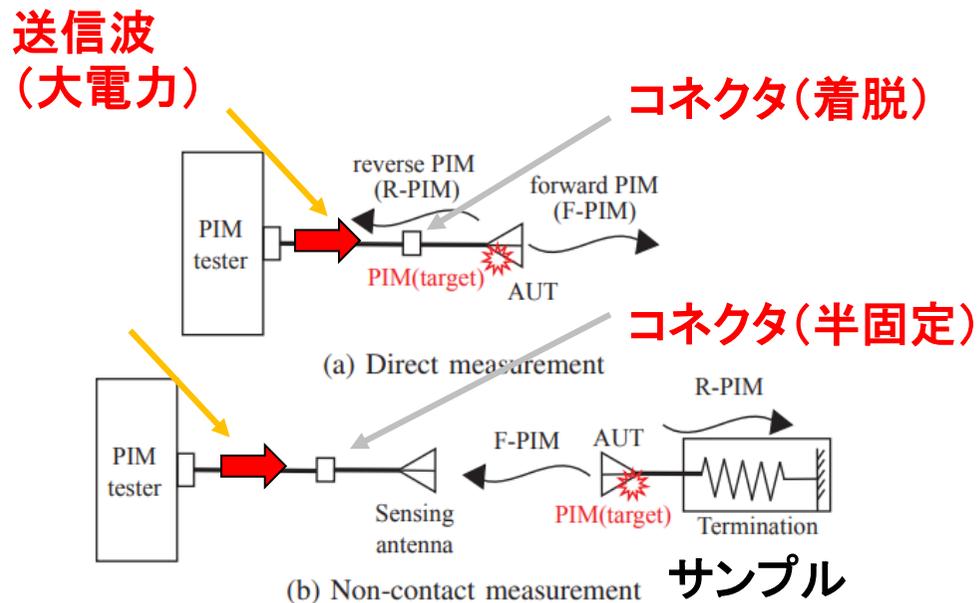


(a) An arrangement of a sensing antenna and a sample.



(b) Printed dipole antenna as sample.

文献[6]



サンプルと測定器は「非接触」

「大きな送信電力が通過」するコネクタの着脱が回避された。

課題: 非接触測定 (F-PIM) → 直接測定 (R=PIM) への換算

結合損失の事前測定が必要 → VNA ⇒ 労力大、高価

[5] H.Suzuki, N.Kuga, "Non-contact PIM Measurement of Large Samples using a Small Anechoic Box," 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, Aug. 2016

[6] R. Okawa, N.Kuga "Reverse-PIM Extraction in Non-Contact Antenna-PIM Measurement," Proc of 2017 APMC, 2017.

アレーアンテナ測定

単一PIMテスト測定

アンテナ全体の励振 → 遠方界励振 → 感度劣化

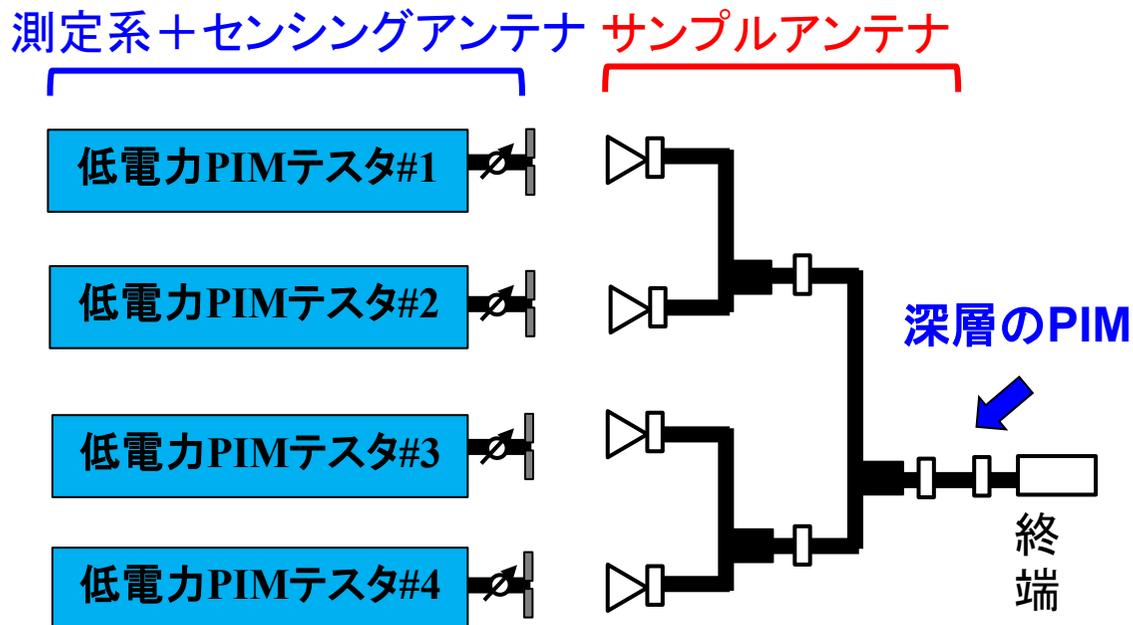
マルチテスト測定 [7]

近傍界測定

低電力PIMテスト

→ 電力合成

→ **深層のPIM観測**



課題: 結合損失 (センシングアンテナ ~ サンプルアンテナ) ⇒ 測定と補正が必要

移相器から発生するPIM ⇒ ノイズフロアの上昇 (測定感度の低下)

テスト毎の独立測定 ⇒ 受信PIMを合成・総合評価する手法が必要

非接触アンテナPIM測定-解決すべき課題-

- ◆ アンテナのPIM特性評価 → 実運用時のPIM特性を想定
 - 直接測定法(DM : Direct Measurement)が有効
- ◆ 直接測定法: センシティブ。コネクタ着脱の繰り返しは測定誤差の原因。
 - 非接触測定法(NCM : Non-contact Measurement)が有効

➔ NCMでDM測定値が推定(NCM-DM換算)できると便利

□ NCMによるDMLレベルの推定[6]

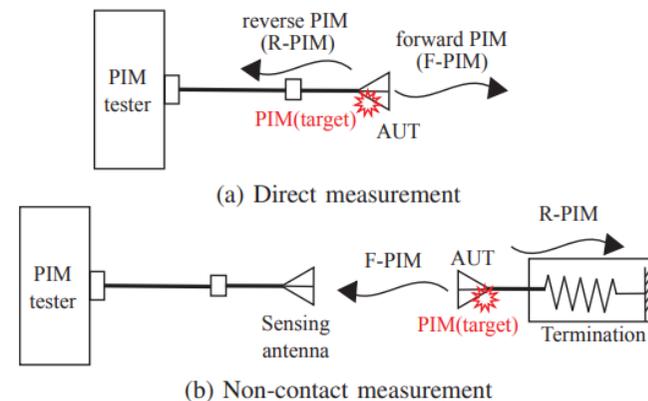
- VNAによる結合損失測定(センシングアンテナ~サンプルアンテナ)

➔ 損失補正により、NCMからDMLレベルを推定

課題点

PIM-TesterとVNAを共用する測定機構は複雑であり高価

➔ PIM-Testerを用いて結合損失を推定したい



[6] "Reverse-PIM Extraction in Non-contact Antenna PIM Measurement"
IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, TH3A-3, p1163-p1166, Nov. 2017

新技術の特徴（従来技術との比較）

- **完全非接触PIM測定**

- 「大きな送信電力」が「着脱コネクタ（不安定PIM源）」を通過しない。

- **PIM測定系のみで測定完結**

- 従来技術：VNA必須（結合損失測定）。

- 新技術：参照IM源を用いたPIM測定から結合損失算出。VNA不要。

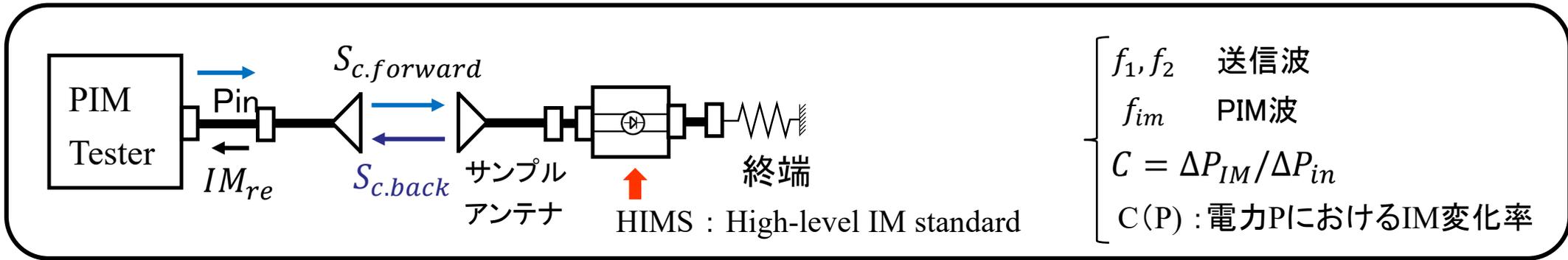
- **PIM測定系への要求性能緩和**

- 従来技術：単一PIMテスト → 大電力送信：低PIM化・難。

- 新技術：マルチPIMテスト測定の導入。

- テスタ1台あたりの電力低減 → 低電力送信：低PIM化・容易。

提案測定法の基本原則



$$IM_{re.dB} = IM_{gen.dB}(P_{in}) + \underbrace{\frac{2C}{3} S_{c.dB_forward.f_1} + \frac{C}{3} S_{c.dB_forward.f_2} + S_{c.dB_back.f_{im}}}_{\text{結合損失の影響}(S_C)}$$

非接触法
直接法

測定プロセス

STEP1, STEP2 校正
結合損失算出(HIMS)

STEP3 測定本番

狭帯域近似 $S_{c_forward.f_1} \approx S_{c_forward.f_2} \approx S_{c_back.f_{im}} \equiv S_C$

$$S_C = \frac{IM_{re.dB} - IM_{gen.dB}(P_{in})}{1 + C(P)}$$

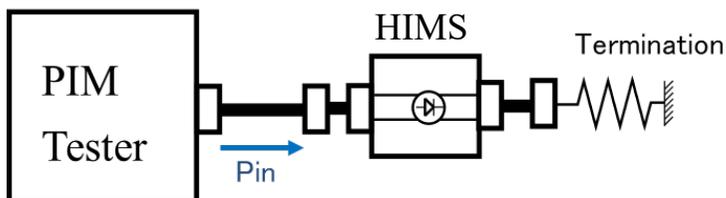
$$C = \sum_{P=P_{in}+S_C}^{P_{in}} C(P) / |S_C|$$

$$f(S_C) = S_C - \frac{IM_{re.dB} - IM_{gen.dB}(at P_{in})}{1 + (\sum_{P=P_{in}+S_C}^{P_{in}} C(P)) / |S_C|} = 0 \quad \leftarrow \text{超越方程式}(S_C)$$

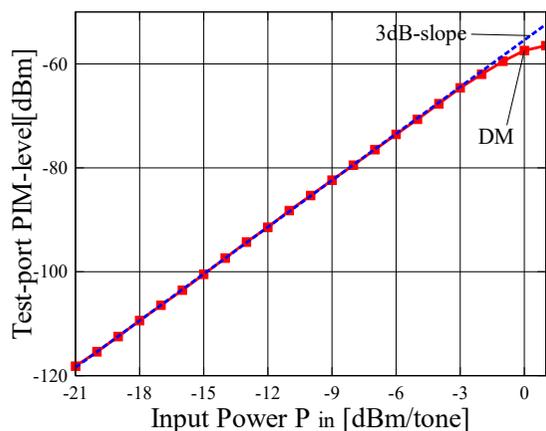
測定手順(校正: 1/3, 2/3)

【STEP1】HIMSの直接測定

◆ 測定系構成



◆ HIMSの直接測定

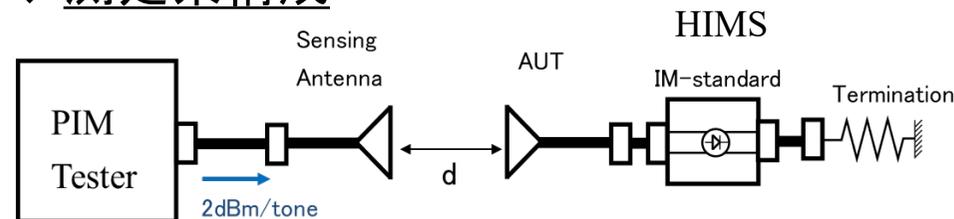


$$C = 3\text{dB/dB}$$

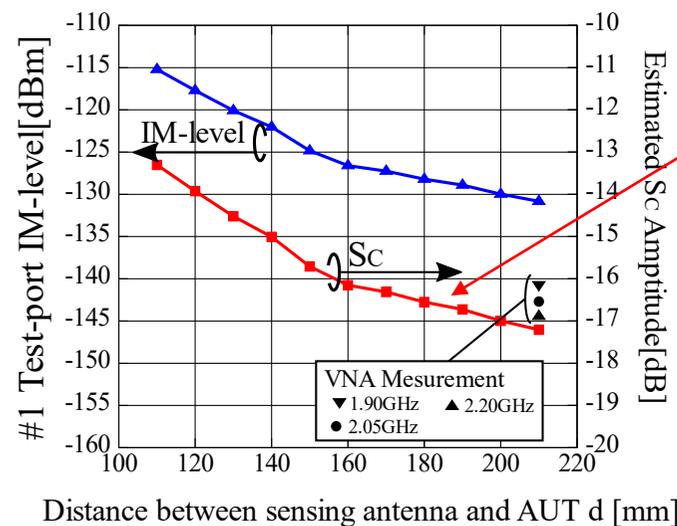
$$\therefore S_c = \frac{IM_{re.dB} - IM_{gen}(at P_{in})}{C + 1}$$

【STEP2】HIMSの非接触測定

◆ 測定系構成



◆ 非接触測定(HIMS) → 結合損失 S_c の推定



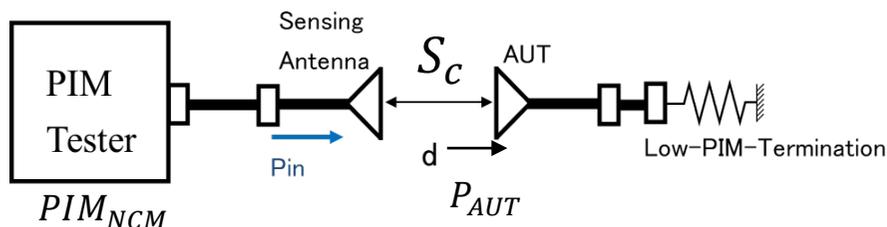
S_c
推定完了

$$\therefore S_c = \frac{IM_{re.dB} - IM_{gen}(at P_{in})}{C + 1}$$

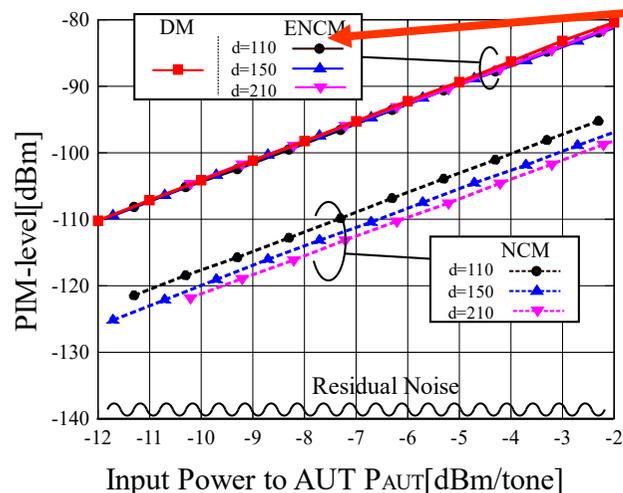
測定手順(本測定: 3/3)

【STEP3】 サンプルアンテナの非接触測定

◆ 測定系構成 (NCM)

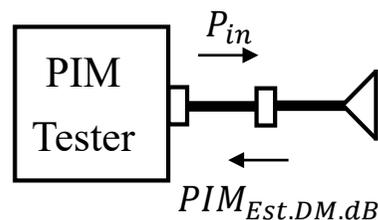


◆ サンプルアンテナの非接触測定

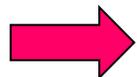


推定結果

◆ 直接測定 (DM: Direct Measurement)



直接測定への換算



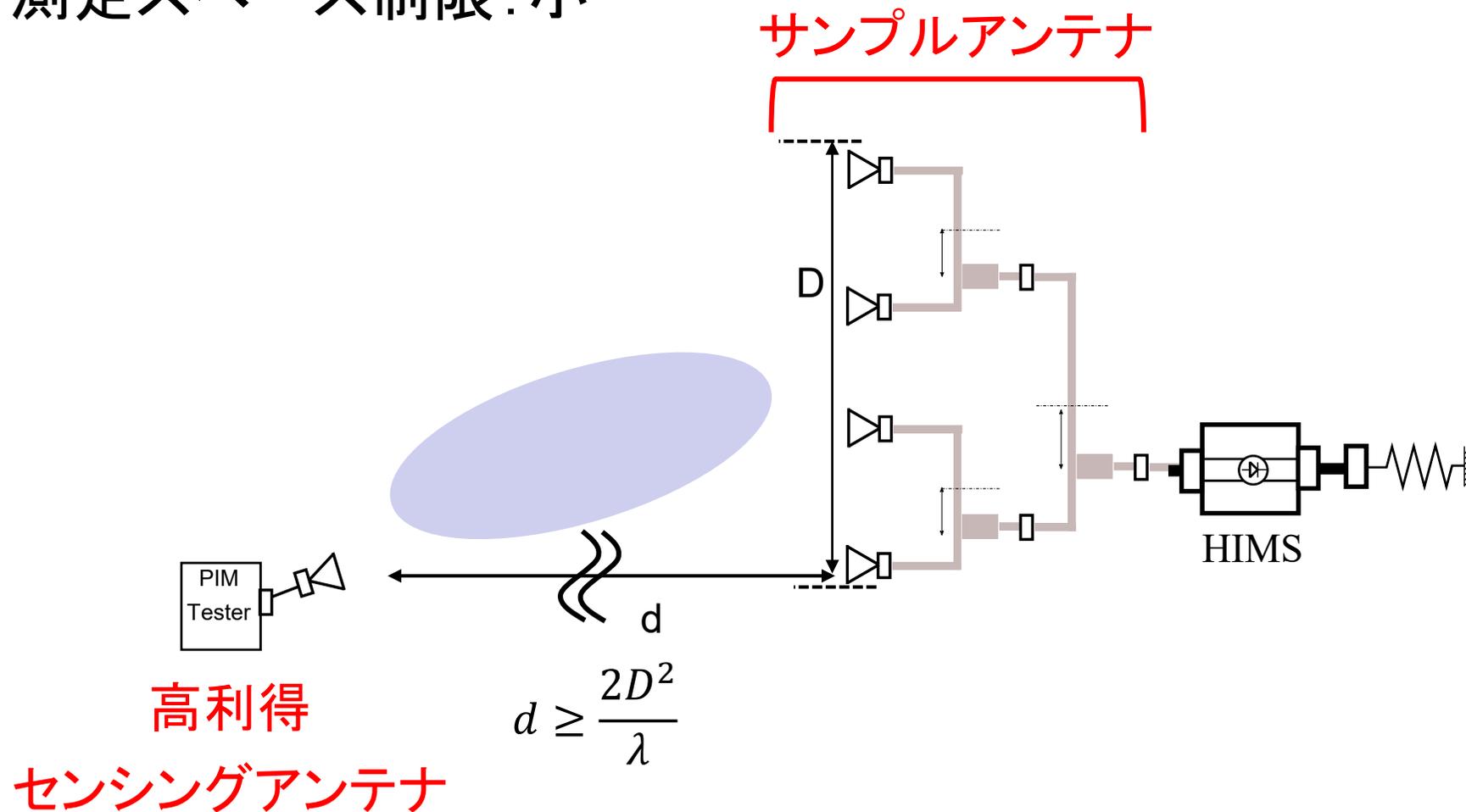
$$PIM_{Est.DM.dB} = PIM_{NCM} - S_{c.dB}$$

想定される測定場面

- **従来型PIM測定器を用いた測定：単一テストタ**
 - 大電力送信、微弱PIM受信
 - 測定スペース制限：小 → 遠方界測定
 - 測定スペース制限：大 → 近傍界測定
 - PIM測定器・センシングアンテナの低PIM化が必須
- **改良型PIM測定器を用いた測定：マルチテストタ**
 - 小大電力送信、微弱PIM受信
 - 近傍界測定 → 省スペース
 - 測定系の低PIM化：制限緩和

単一テスト測定（遠方界）

測定スペース制限：小



難点：測定スペース大

単一PIMテスト測定(省スペース)

➤ 単一PIMテスト

- 省スペース(近傍界測定)
- センシングアンテナ
 - サンプルアンテナと同形状
 - 回転対象配置
 - 近傍界測定

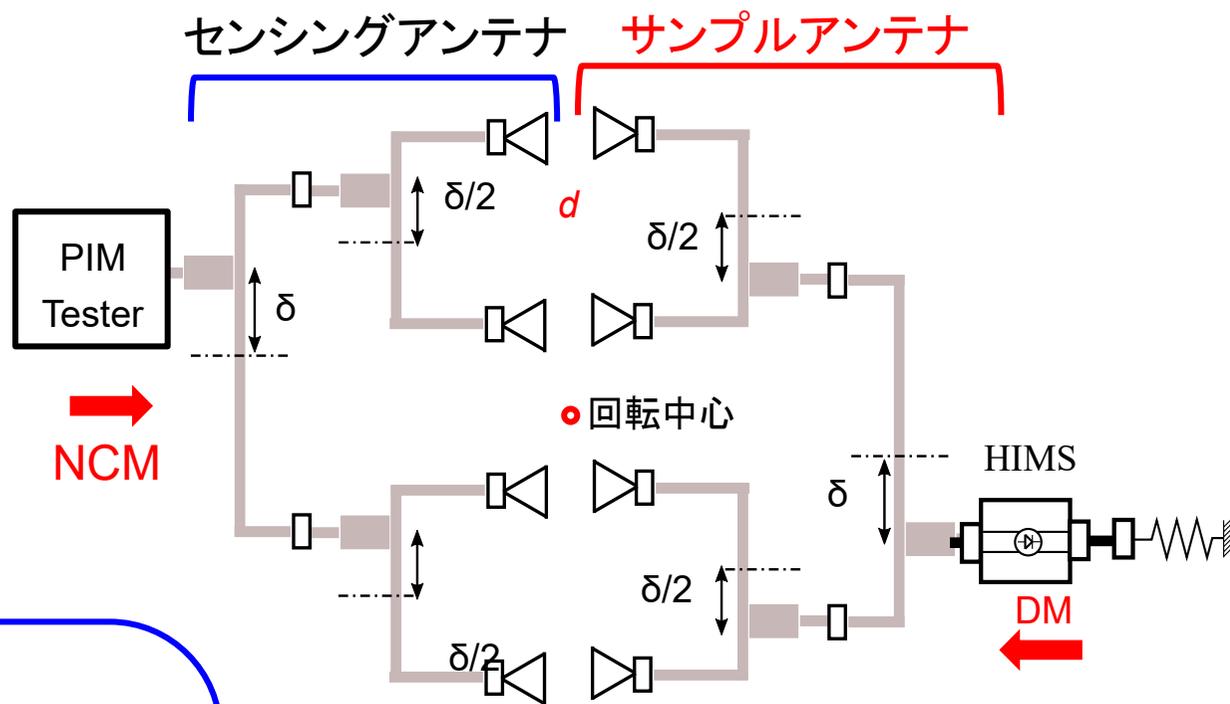
【利点】

- ・省スペース
- ・高感度

【欠点】

- ・大電力PIMテストが必要

→ 測定系の低PIM化必須 → 難



単一PIMテスト測定：利害得失

- **利点**

- 既存の測定系利用可

- **問題点**

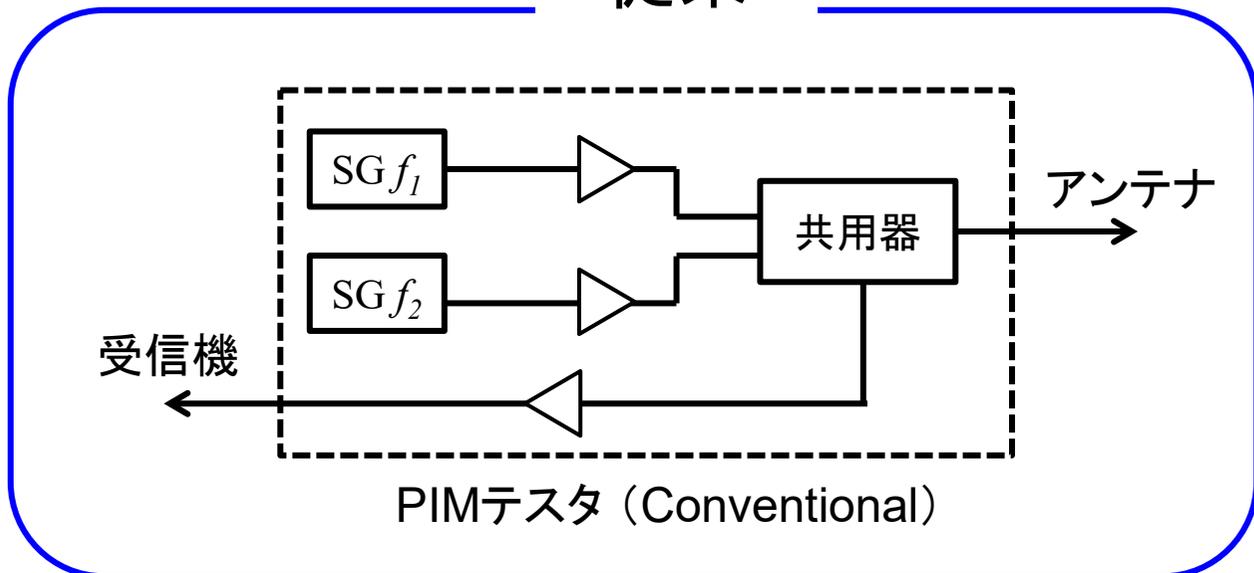
- 非接触化に伴う結合損失 (S_c) の補償
 - 送信波の高出力化
 - センシングアンテナの低PIM化
 - PIMテストのノイズフロア上昇

- **解決法**

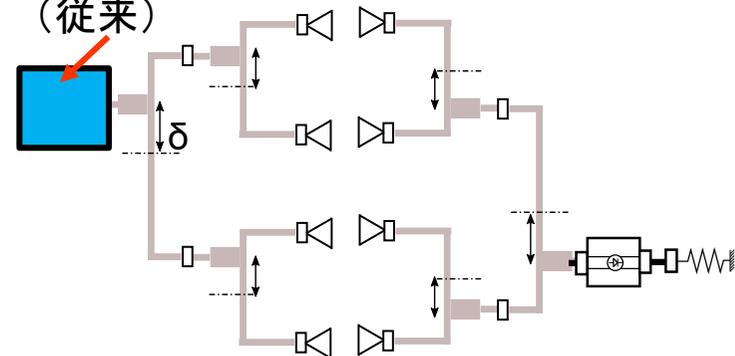
- マルチPIMテスト測定

PIMテストの改良

従来

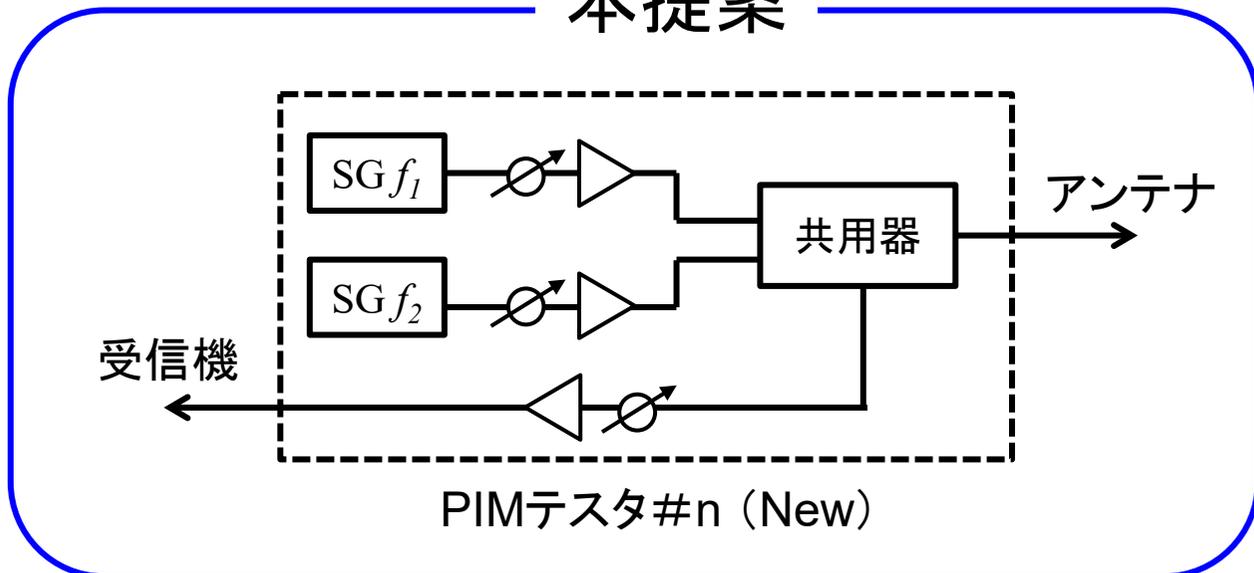


PIMテスト
(従来)

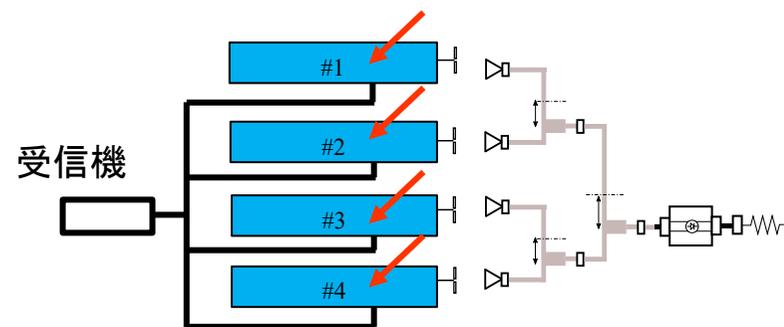


大電力送信 → 低PIM: 難

本提案



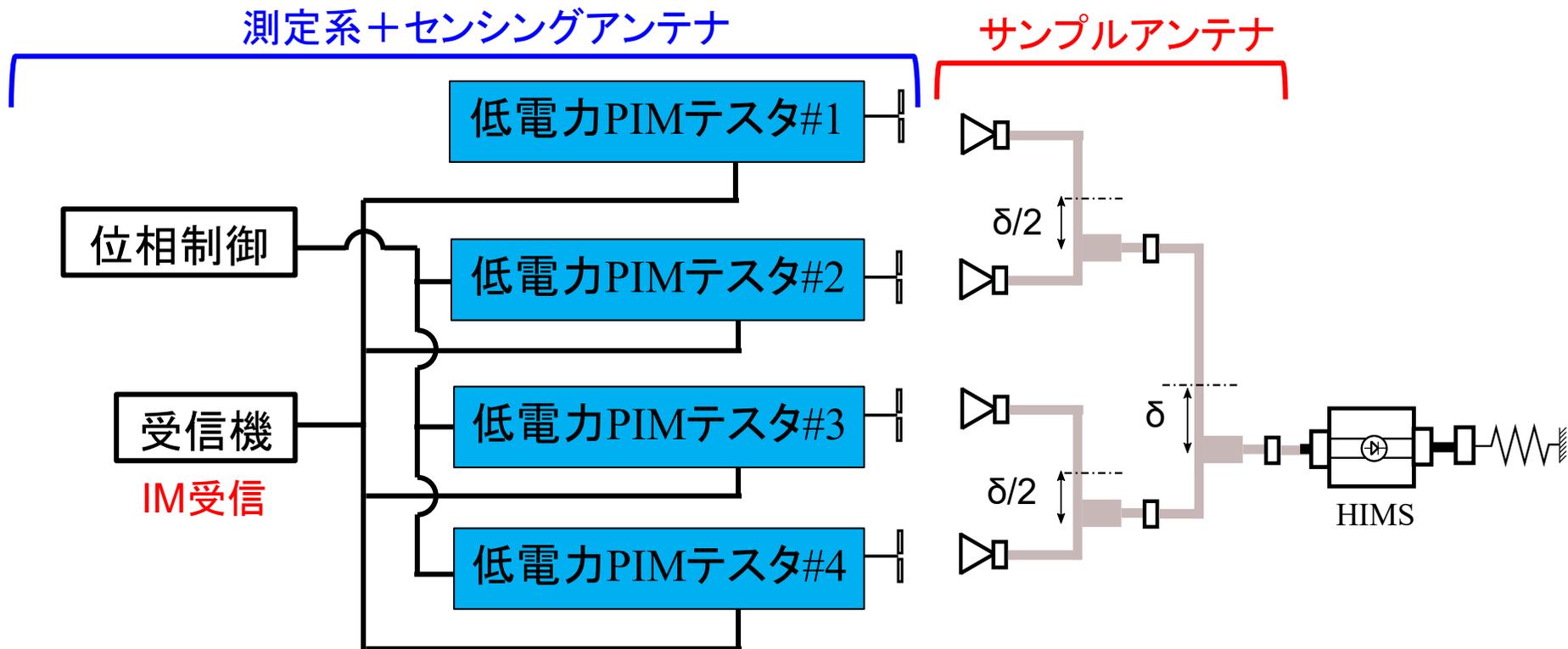
PIMテスト(改良)



低電力送信 → 低PIM: 易

マルチPIMテスト測定

低出力PIMテスト・複数台で構成 → 測定系システムノイズ低減
可変位相器 → 任意励振条件のアレーアンテナに対応可能



公知技術に対する
優位性

□ 文献[7]
テスト毎の独立測定
結合損失測定不可
位相器でIM発生



□ 本手法
受信系統合
HIMSを用いた結合損失測定
※位相制御可能なPIMテスト必要

実用化に向けた課題

- **大学設備で開発可能な範囲**
 - 単一PIMテスト測定
 - 小規模アレー
 - 2素子アレーでの原理確認
- **実用化に向けて必要な課題**
 - マルチPIMテスト測定
 - **実用規模(16素子程度)での実証・検証**
 - 自動計測制御系の開発
 - 無終端測定

想定される用途

- 本技術の特徴

- 送信電力を無線供給するPIM測定法
- マルチテスト方式
 - 「要求性能の低い安価なPIMテスト」を複数台利用
 - サンプルアンテナ内で電力合成
 - 「大きな送信電力」が、不安定なPIM源となる「着脱コネクタ」を通過しない。

- 応用展開(エレクトロニクス実装分野)

- PIM: 接触不良・接続不良に敏感 → 「不良検出」への利用
- ボンディング性能評価技術としての可能性
- 解決すべき課題
 - 誘導電力による部品損傷回避
 - 能動部品で発生するIM(強)との区別 → ボンディングは受動回路

企業への期待

- **アレーアンテナの特性評価**
 - アンテナ製作、測定
- **マルチテスト測定用PIMテスト・システム開発**
 - マイクロ波コンポーネント、フィルタ技術必要。
 - 大電力PIMテスト開発に比べ、コンポーネントへの要求精度は大幅に緩和。
 - 複数台の製作・制御を実現するソフトウェア技術。
- **エレクトロニクス実装分野への応用展開**
 - 解決すべき問題多数。
 - 独自の測定系構築必要。
 - マルチテストにより、要求精度は大幅に緩和。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称① : 測定システムおよび測定方法
- 出願番号 : 特願2021-139435
- 出願人 : 横浜国立大学
- 発明者 : 久我宣裕、桑田昌佳

- 発明の名称② : 双指向性アンテナおよび偏波共用アンテナ
- 出願番号 : 特願2021-026458
- 出願人 : 横浜国立大学
- 発明者 : 久我宣裕、滝波真

お問い合わせ先

横浜国立大学

研究推進機構 産学官連携推進部門

山本 亮一

TEL : 045-339-4382

FAX : 045-339-3057

e-mail : sangaku-cd@ynu.ac.jp