

中波帯アイソレータの基礎研究とシステム評価 (2012年度放送文化基金研究)

若井一顕[†]

[†]第一工業大学 情報電子システム工学科 〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2
E-mail: [†]k-wakai@daiichi-koudai.ac.jp

Basic study of medium wave Isolator design and system evaluation

Kazuaki WAKAI[†]

(Hoso Bunka Foundation's study in 2012)

[†] Department of information and electronic system engineering Daiichi institute of technology
1-10-2 Kokubu-chuoh.Kirishima-city.Kagoshima-pre.899-4395 Japan
E-mail: [†]k-wakai@daiichi-koudai.ac.jp

Abstract Medium wave isolator has not been used on the broadcasting transmitting system as compared to the VHF, UHF and SHF frequency Band. Medium wave isolator will be used to improve the antenna characteristics degradation and fluctuation of the impedance. The isolator can be used to the blast furnace on high-frequency heating system which avoids load impedance fluctuations. This paper discusses the basic design of medium wave isolator. The isolator is using 3dB coupler and the quasi gyrator, which are phase adjustor, attenuator, series resonator and super saturation reactor. The Isolator is prospective device has an effect of suppress the antenna impedance fluctuations effectively.

1. はじめに

一般的に中波送信アンテナ鉄塔は電波の周波数に合わせた高さで建設される。特に大電力の送信アンテナは 0.53λ (λ : 波長) という高さで設計されることが多いが、小電力局ではアンテナ高が予め 35m、40m、60m そして 100m 程度に制限されることが多い。また非常災害時のアンテナ設置では 10m～30m 程度のアンテナ長の確保が限界であり、帶域内伝送特性が悪くアンテナ基部インピーダンスもリアルパートが数 Ω 、リアクタンス・パートは $-j150 \sim -j200 \Omega$ 以上とキャパシタンス給電となる。アイソレータを用いることでアンテナ特性を改善して、これらの条件下でも電波発射を可

能とする。また地震、台風、火山噴火、ゲリラ豪雨時等の緊急災害時の放送電波の確保も可能とし国民の生命、財産を守る一助になると考えている。

2. 中波帯アイソレータを必要する理由

現在アイソレータは、VHF、UHF、及び SHF 帯に関するものは実用化されている。残念ながら中波帯、短波帯でのアイソレータの活用例は無く新たなニーズが期待される。非常災害時設置する小型中波アンテナの実数部のインピーダンスは低く、アイソレータは小型中波アンテナ特性劣化の緩衝を目的としている。アンテナの劣化要因とアイソレータの効果を次にあげる。

2.1 小型アンテナの特性劣化、帯域内特性の劣化、気象条件によるインピーダンス変動と応用

- ・降雪、風雨、強風、塩害のインピーダンス変動
 - ・非常災害時の中波アンテナ建設の容易化
 - ・小型アンテナ建設時の伝送特性の確保
 - ・高周波溶融装置の負荷安定化
 - ・半導体溶融時のインピーダンス変動緩衝

図1は本研究がターゲットとする中波帯アイソレータの位置づけである。

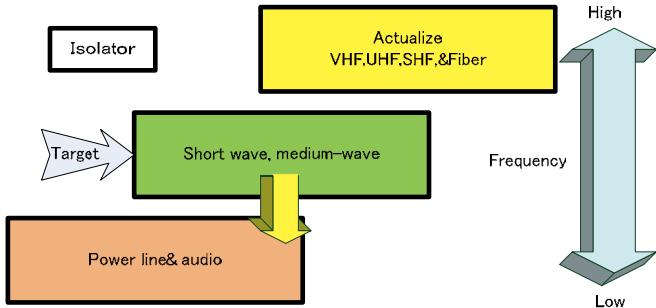


図1 中波アイソレータの研究ターゲット

3. 中波帯アイソレータの実現と課題

中波帯のアイソレータの実現に向けた従来技術との隔壁は次のような部分が挙げられる。

- ・使用周波数が既存に比べて低い
 - ・通過ロスが大きい
 - ・回路の Q が低い
 - ・ドライビング・インピーダンスが低い (1Ω 程度)
 - ・フェライト等の焼結が難しい
 - ・材料の強磁性共鳴特性 + μ , - μ の差が小さい

参考文献にも記載したが、筆者等が以前実施した磁歪素子と電歪素子を機械的に接合した装置を用いた研究では機械振動系を利用するところから適用周波数を高めることは難しかった^[1]。基本構成を図2に示す。また増幅器を巴（ともえ）に組んだ広帯域アクティブサーチュレータ等はマイクロ波領域で研究されているが使用電力を上げることが難しい^[2]。

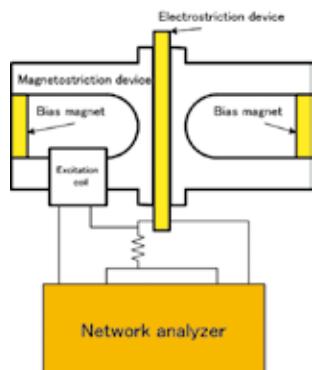


図 2 電歪・磁歪素子を組み合わせたアイソレータ

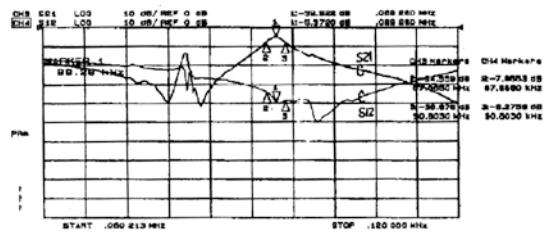


図3 試作アイソレータの伝送特性

表 1 電歪・磁歪素子の諸元

Specifications

- Magneto-striction device
 - Vibrating surface: 21mm×10mm
 - Leg:20mm
 - Resonance frequency:100kHz
- Electro-striction device
 - Vibrating surface: 23mm×10mm
 - thickness:20mm
 - Resonance frequency:99.95kHz
 - Capacitance:130pF

今回は従来の動作原理を検証すると同時に、3dB カップラと位相器やジャイレータで構成するアイソレータの実用化検討を行う。

4. 中波アンテナの特性

図4は中波小型アンテナの設置構成の例である。

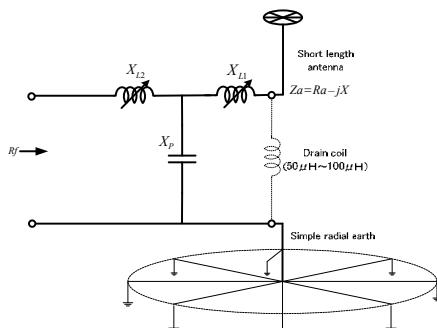


図4 中波アンテナの設置構成

図 5 は、中波帯短小アンテナのインピーダンスの周波数特性の軌跡イメージである。

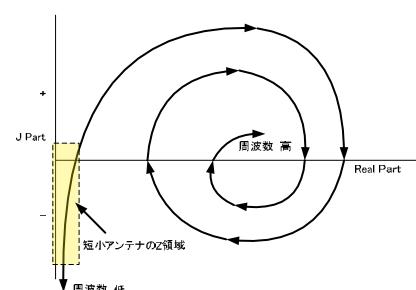


図 5 中波アンテナの基部インピーダンス軌跡

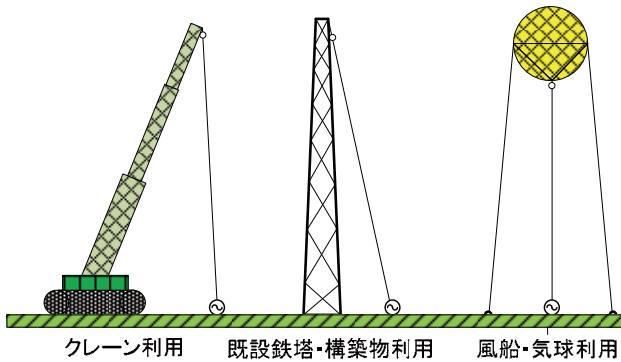
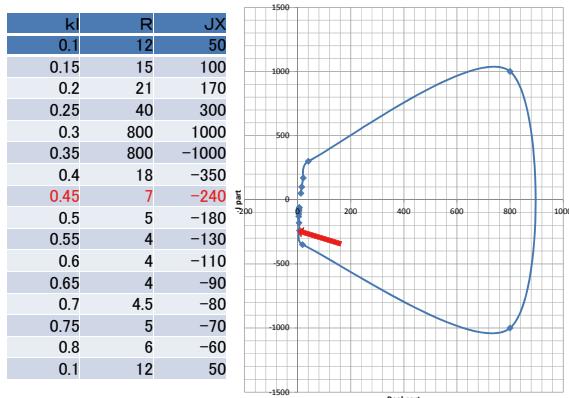
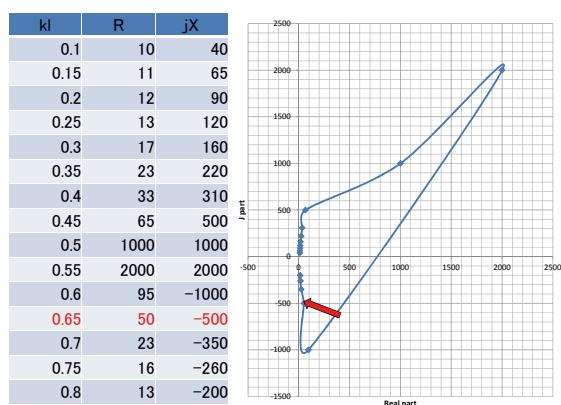


図 6 中波小型アンテナの設置例

図 6 は緊急時を想定した小型アンテナの設置例である。図 7、図 8 は小型アンテナの代表的な「かご型」と「折返し型」アンテナの基部インピーダンスの周波数特性の軌跡である。図中の記号は $kL=2\pi L/\lambda$, $L: \text{length(m)}$, $\lambda : c/\text{freq(m)}$ である。

図 7 かご型アンテナ高さ 20m のインピーダンス特性
(使用周波数 1026kHz)図 8 折返しアンテナ高さ 20m のインピーダンス特性
(使用周波数 1557kHz)

5. アイソレータの基礎実験

5.1 3dB カップラ用ブリッジド T 型回路

図 9 は中波帯で使用する 3dB カップラである。各アームは LCR の集中定数素子で構成した。写真 1 に外観を示す。図の中で表現している R は、所要周波数 1MHz で 50Ω と設定した。

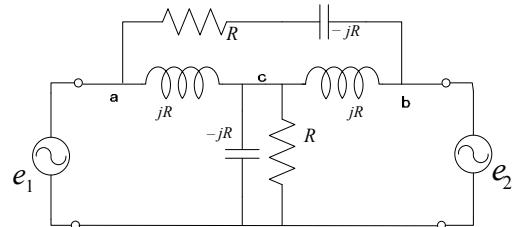


図 9 ブリッジド T 型 3dB 出力合成回路



写真 1 製作した 3dB カップラ外観(100W 対応)

5.2 ブリッジド T 型回路の特性評価

ブリッジド T 型回路を使った出力の合成・分配回路を作製した。100W 程度の通過電力を考慮した。適正な定数を選択していれば、 e_1 , e_2 の電源間のアイソレーションは 30dB 以上確保できる。図 10 は製作した 3dB カップラの特性を確認するための open-short 測定法である。図 10 の SW を on-off しても入力インピーダンスは 1MHz で 50Ω と安定していることを確認する。

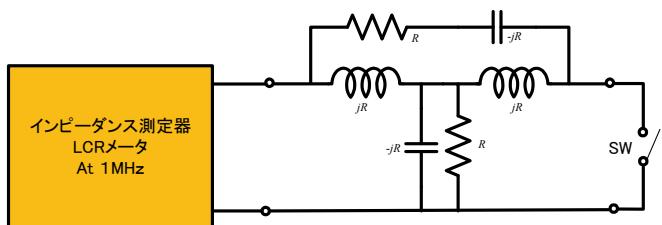


図 10 3dB 回路の特性評価

図 11 は双方の入力間でのアイソレーションを観測する伝送測定である。掃引発振器の出力周波数範囲を 200kHz～2MHz 程度に設定して片方への信号の漏れが抑圧されることを確認する。3dB カップラの構成素子が 1MHz で 50Ω に規制されていれば伝送特性上にノッチ特性が観測される。

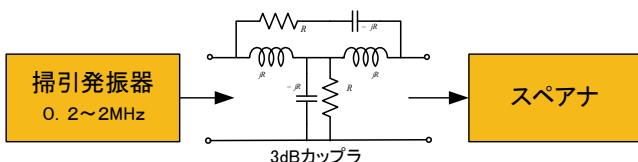


図 11 簡易ノッチ特性測定評価

図 12 はノッチ特性的簡易測定の結果である。ノッチ量は 1MHz で 35dB 程度である。

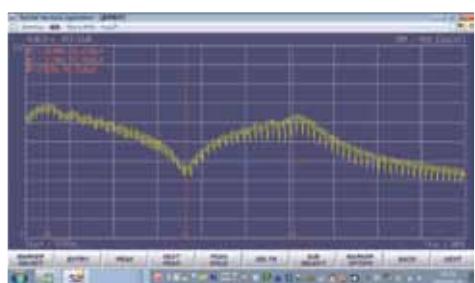


図 12 3dB カップラノッチ特性

6. ジャイレータの挿入とアイソレータ

中波帯大電力送信機・中電力送信機では、出力合成にブリッジド T 型回路を用いることが多い。今回は 3dB カップラをブリッジド T 型回路で構成した。急激なインピーダンス変動に対しては、自動整合方式では負荷変動を吸収することは困難である。中波帯のアイソレータやサーキュレータに拘る理由はそこにある。電歪素子と磁歪素子を使った微少電力の中波アイソレータを試作し学会発表したが、100W, 1kW を実現するにはブレークスルーが必要である^[1]。筆者が継続して取組んでいるテーマの一つである。

3dB カップラを用いた方式の基本原理を図 13 に示した。ジャイレータには片方向性の通過デバイスを求める必要がある。最初に位相器、フェライトデバイス、共振回路、及び半導体等の応用を検討した。本研究では位相を効果的に制御してアイソレーション効果を実現する方法を解説する。

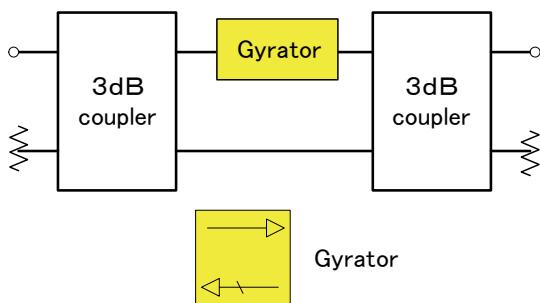


図 13 アイソレータの原理的な構成の例

6.1 アイソレータの基本回路

図 14 はアイソレータの基本回路である。位相器は特性インピーダンスを 50Ω として設計した。この回路を簡易化して表現したのが図 15 である。一部のアームにマイナス抵抗成分が含まれている。回路計算では位相器の取り扱いが難しいが電源回路の位相を変化させる方法での解析が簡便と思われる。

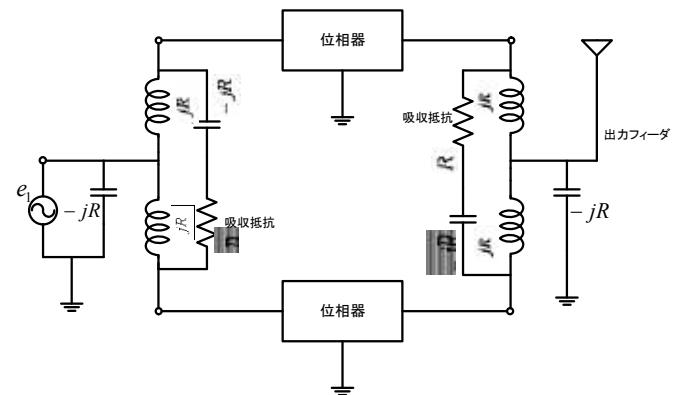


図 14 アイソレータの基本回路

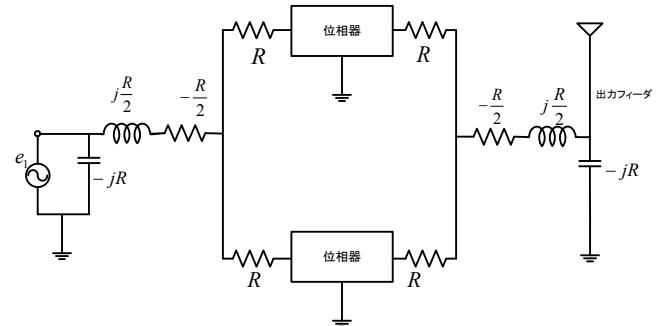


図 15 アイソレータの簡易化回路図

6.2 位相器がスルーの場合

位相器が無い状態の回路は、図 16、図 17 に示すシンプルな π 型 $\lambda/4$ 回路となることが分かった。この場合はインピーダンスの抑圧効果は期待できない。

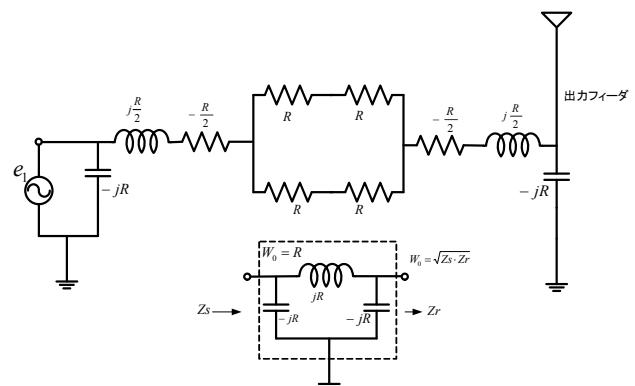


図 16 位相器をスルーとした場合の回路

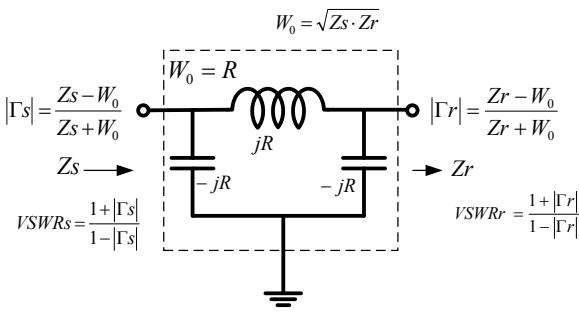
図 17 位相器スルー時の等価回路(π 型の $\lambda/4$ 回路)

図 17 は、位相器がスルーのときの等価回路である。負荷の Z_r が入力のインピーダンス Z_s に変換されることを示したが、この回路では VSWR の抑圧効果は無く、負荷端の VSWR が入力端の VSWR に保存されたままである。

6.3 位相器を挿入した場合の等価回路

図 18 は 3dB カップラの接続間に位相器を挿入した場合を示す。

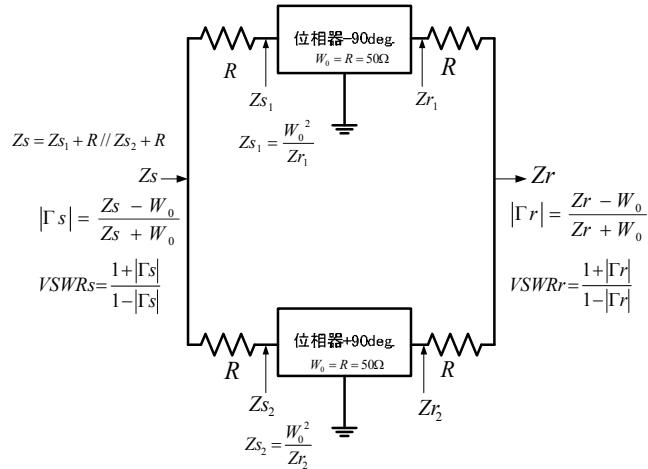


図 18 位相器を挿入した場合のインピーダンス変換過程

この場合、位相器の位相設定より負荷インピーダンス Z_r に負荷電流が流れる場合と、全く流れない状況をつくり出すことができる。電流をノルマルモード成分とコモンモード成分に分けて考えることでも解析が可能である。

相対的な位相が 180 度の場合の等価回路を図 19 に示した。この場合、 Z_r には各電源からの電流がキャンセルされて、3dB カップラの入力端のインピーダンスは、負荷インピーダンスには関係しない。本実験では入力インピーダンスは 50Ω で一定となる。

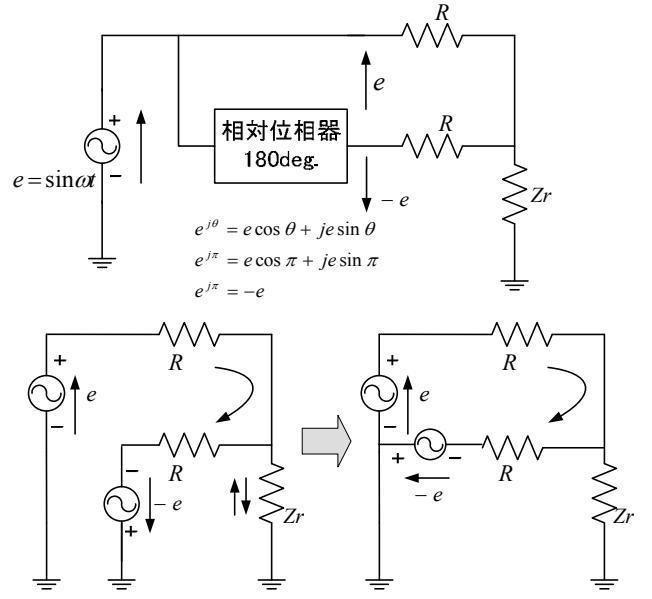


図 19 相対位相が 180 度の等価回路

また相対位相が 90 度の場合を図 20 に示した。インピーダンスは電圧 je によって Z_r に流れる電流成分と、電圧 e によって R 回路に流れるループ電流成分の合成ベクトルによって解析することができる。

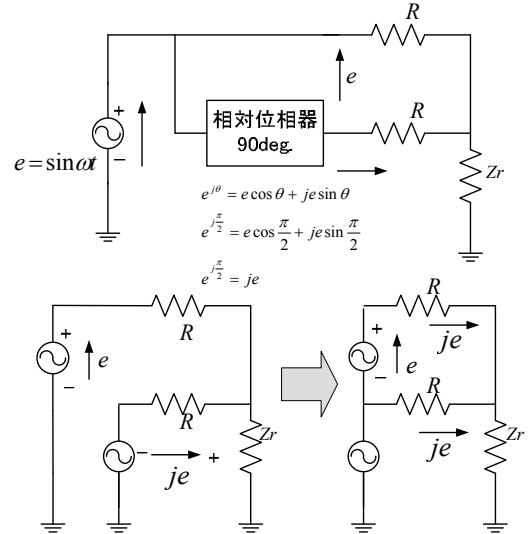


図 20 相対位相が 90 度の等価回路

6.4 ジャイレータを挿入した場合の回路構成

基礎実験では位相器を、+90 度、-90 度そして 180 度にして計算と実測を進めた。負荷の VSWR や反射係数に応じて位相量をフィードバック制御する方法を実験中である。他に位相を可変する方法としては共振点付近の急峻な位相特性の利用、フェライトコアの過飽和特性の利用がある。その他、半導体デバイスを用いた検証も図 21 に示す回路を用いて検証していく。

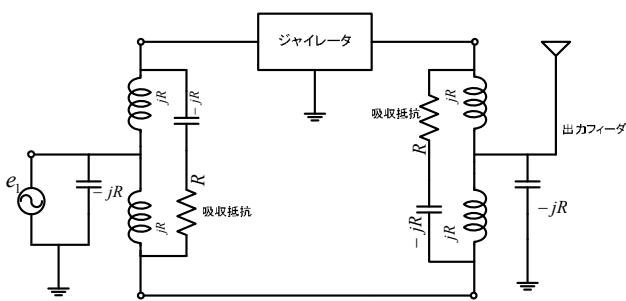


図 21 ジャイレータを挿入する回路構成

7. 疑似ジャイレータの基本性能

7.1 中波帯アイソレータの実現と課題について

筆者が以前から興味を持って研究している緩衝整合がある。自動整合を使って負荷変動による VSWR の劣化を改善して VSWR を 1 付近に設定するという概念である。負荷の変動に対する整合調整を VSWR が完全に 1 となるような制御を求めるのではなく、VSWR が 1 付近で止める方が有利な場合がある。

有利とは、①制御素子の数が減る、②制御動作の安定化、③信頼性が向上するといったことが挙げられる。降雪等の環境変動によってはインピーダンスの変動が一方向の場合もあるし変動過程が非対称となることも想定される。変動という一過性の現象を扱うために、また未知の負荷変動に対処するための自動整合回路を常設することは一般的にはしない。変動が季節的に発生する場合や周辺環境の影響を受ける場合などを想定した応用展開を考えるのが通常である。参考文献にも記載したが、筆者等が以前実施した磁歪素子と電歪素子を機械的に接合した装置を用いた研究では機械振動系を利用することから適用周波数を高めることは難しかった^[1]。マイクロ波系では、微小電力用 PA をリンク上に配置したアクティブサーキュレータの研究もある^[2]。今回は 3dB カップラと位相器、疑似ジャイレータで構成するアイソレータの検討を行った。そのためにジャイレータとなるデバイスの選定が重要であり、位相器による方式、過飽和リアクトルによる方式、また負荷の反射係数を検出し位相制御による等価ジャイレータの製作も進めた。

7.2 ジャイレータを挿入した場合の回路構成

基礎実験では位相器を、+90 度、-90 度そして 180 度にして計算値と実測値を求めた。疑似アイソレータとして動作させるためには、負荷の VSWR に応じて位相を可変する方法を検討している^[3]。位相を可変する方法としては、固定位相器の切替え、共振点付近の急峻な位相特性の利用、またフェライトコアの過飽和リアクトル特性の利用等がある。

7.3 位相器の応用

位相器を用いて 3dB カップラへの入力相対位相を変化させる。図 22 は位相可変型アイソレータの原理図である。位相器は LC 回路で構成される。位相の可変には可動インダクタンスを用いてもよいが、時間遅れが発生するために得策ではない。負荷インピーダンスが緩やかに変動する系であれば応用は可能である。本実験は位相制御による負荷インピーダンスの緩衝を確認する基礎実験と位置付けている。

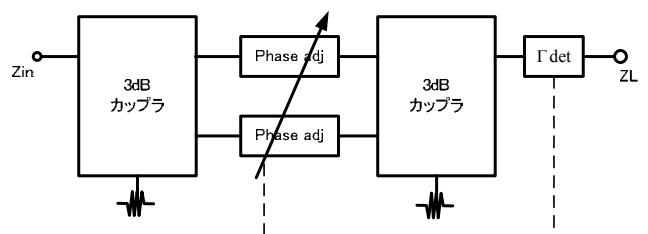


図 22 位相可変型アイソレータ

図 23 は、位相回路がスルー、90 度、-90 度、そして 180 度として、負荷インピーダンス Z_L が 0Ω から 200Ω に変化した場合の入力インピーダンス Z_i の値を示した。図中の「Unbalance」とは 3dB カップラの接続部の両位相器が「through」のときにアームの片方を開放する方法である。これによるインピーダンスの抑圧効果も認められる。

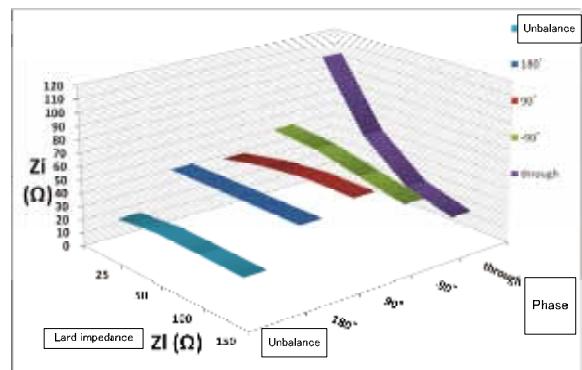


図 23 負荷インピーダンスと VSWR

7.4 過飽和リアクトル

インダクタンスの可変を、フェライトを用いた過飽和リアクトルに直流を重畠することで連続的に可変する方法を確認した。

図 24 は今回試作した直流電流によるインダクタンス可変回路である。伝送容量は 100W 程度の通過電力に耐える設計構造とした。



図 24 多目的過飽和リアクトル

1次、2次の巻き数は7T～14Tとして製作した。直流重畠用の巻き線も設けて、高周波が直流回路と干渉しないようにチョークコイルとバイパスコンデンサを設置した。図25は、巻き数が14T、10Tにおける直流重畠電流に対するインダクタンス可変特性の一例である。

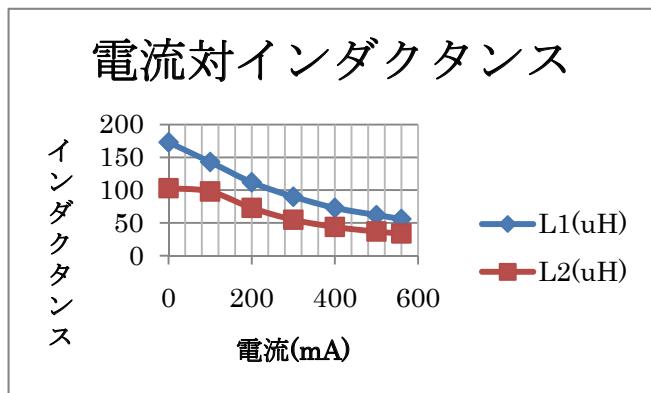


図 25 過飽和リアクトルの電流特性

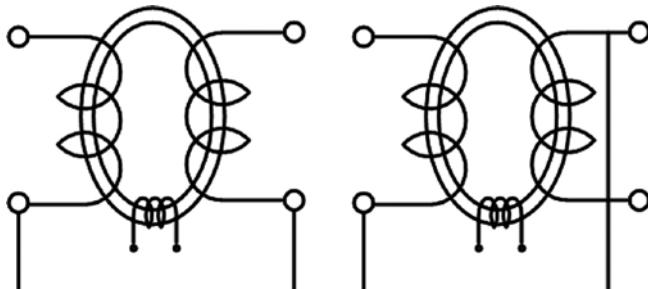


図 26 インダクタンス増加のための結線

図26に示すようにインダクタンスを増加させるために1次巻き線と2次巻き線を直列に接続した。結線方法によってはインダクタンスが激減する条件もある。それはフェライト内の磁束が加算される場合と、キャンセルする場合とがあるためと考えられる。インダクタンスの増加とともに等価抵抗 R_s も増加する傾向にある。理想的なインダクタンスだけではなく、磁気回路に $\tan \delta$ が存在するためと考えられる。等価抵抗は回路の損失として評価する必要がある。図27は、可変

インダクタンスを3dBカップラの接続点に挿入した例である。重畠した直流電流は可変電源で行った。設計目標としては、負荷の反射係数電流をリアクトルにフィードバックする方法を採用する^[4]。

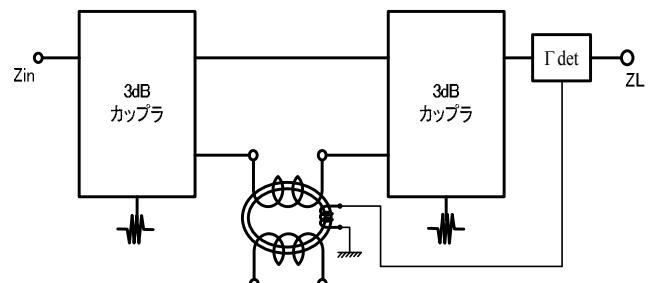


図 27 過飽和リアクトルによるアイソレータ

7.5 過飽和トランスのスイッチ制御

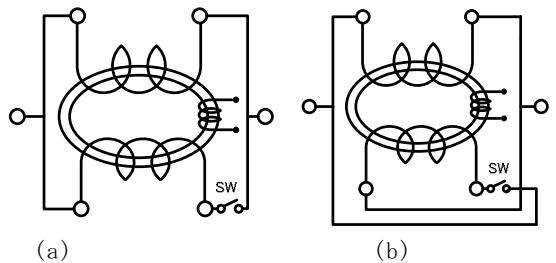


図 28 リアクトルのスイッチ制御

図28の結線は磁気回路的に考察できる。磁束密度の状況によってインダクタンスが数nHのときと数 μ Hが実現できる。両方の回路ともSWが開いた瞬間2次回路開放のときのインダクタンス特性となる。SWはダイオードSWなどの半導体が応用できる。

7.6 直列共振素子による位相制御方式

過飽和リアクトルを用いた可変インダクタンスについてはインダクタンスの他に R_s という実数値を持ち、これがリアクトルに加わることによる動作解析が要求される。これらの R_s 値を包含したかたちでアイソレータを考えることが必要である。図29は、純粋に可変インダクタンス素子を直列共振回路の一部に用了いた方法である。

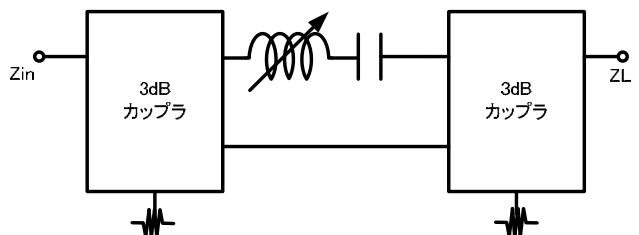


図 29 直列共振回路による位相可変

図30は可動型の約 $30\mu H$ のインダクタンスである。当然、高速動作は望めない。基本動作を検証した。



図30 可変インダクタンス素子とドライブ回路

図31は3dBカップラの両接続アームに直列共振回路を2基設置して可変インダクタンスが逆方向に動くことで共振点の左右を用いることになる。それによる3dBカップラの入力部への相対位相を広げることを可能とした。

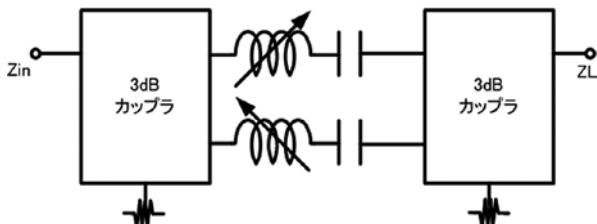


図31 直列共振回路とアイソレータ

7.7 アンテナと整合維持

アンテナインピーダンスが悪化した場合のVSWR及び帯域特性の劣化と問題点を整理した。

- ① 整合回路、送信機内の異常電圧、異常電流の発生
 - ② 伝送フィーダの耐圧マージンの低下
 - ③ 高域音声の特性劣化（被変調波形の谷側の劣化、IPM: Incidental phase modulation 特性劣化）
 - ④ 送信機（增幅器）の効率低下
 - ⑤ 増幅器デバイスの許容電圧、電流、及び損失電力の規格越えと破壊
- 等が挙げられる。

8.まとめ

現在アイソレータは、VHF、UHF、及びSHF帯に関するものは実用化されている。残念ながら中波帯、短波帯でのアイソレータの活用例は無く新たなニーズが期待される。非常災害時等に設置する小型中波アンテナの実数部のインピーダンスは低く帯域内伝送特性も劣悪である。また風雨、降雪、及び塩分付着によるアンテナのインピーダンスの変動も発生する。本研究はこれらの分野への応用展開を目標に進めている。効果的なジャイレータ素子を見つけて中波帯アイソレータの実現を目指しているが、今回はブリッジドT型回路を

用いた中波3dBカップラと、疑似ジャイレータを用いた中波帯アイソレータの基礎実験を行った。3dBカップラの接続アームに位相器、減衰器、共振回路及び過飽和リアクトル等を挿入して負荷インピーダンスの抑圧効果を検証した。可動部分を極力少なくすると共に、動作遅れの改善、運用時の通過損失の低減を目標に更なる研究を進めている。本研究は23年度、24年度の卒業研究の一部であることを紹介しておく。今後の更なる研究の継続を推進して行くことを誓って報告を終える。

文 献

- [1] 若井、鳥畠、山添，“中波帯域用アイソレータの開発” 2004年電子情報通信学会総合大会 C-6-1.
- [2] 豊田，“0.5～2.4および5～18GHz帯アクティブサーチューレータ” 電子情報通信学会誌 Vol. j72-C- I No. 3 pp. 204-207, (1989年3月)
- [3] 若井、“中波帯アイソレータの開発” 信学技報 IEICE Technical Report R2012-54, pp. 1-6. (2012年10月)
- [4] 若井、“疑似ジャイレータを用いた中波帯アイソレータの研究” 信学技報 IEICE Technical Report R2012-76, EMD2012-107, pp. 23-28. (2013年2月)