

令和元年6月14日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06372

研究課題名(和文)円筒導波管遮断モードを用いた左手系漏洩波アンテナの放射特性とその制御に関する研究

研究課題名(英文) Radiation characteristics of left-handed leaky-wave antennas utilizing the cutoff modes in a circular waveguide and its control

研究代表者

辻 幹男 (TSUJI, MIKIO)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：50148376

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来提案してきた等価的に負の誘電率、負の透磁率を同時に示す左手系人工媒質を有する導波管構造の管壁に周期配置されたスロット、あるいは管軸に平行なスリットを設けることで、漏洩波アンテナを実現したものである。この種のアンテナの特長は、左手系媒質を含むことから、周波数を連続的に変化させることでアンテナの放射方向をアンテナ軸の後方方向から前方方向に切れ目なく走査できることにあり、数値解析および測定実験の両面から放射特性の妥当性を検証している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属導波管だけで反射損失の少ない右手/左手系媒質を構成し、導波管壁にスリットなどを設けることで、それを漏洩波アンテナに応用した例はなく、周波数によるビーム走査が可能なアンテナであることから、今後、物体検知や人感センサなど幅広い応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Leaky-wave antennas based on composite right/left handed metal waveguides have been realized by installing slots periodically arranged or slits on the metal wall. This kind of antennas has a merit that the radiation beam can seamlessly scan from the backward to the forward directions along the antenna axis when the frequency is varied continuously. The radiation characteristics have been verified from both the numerical calculations and the experimental measurements.

研究分野：電磁波工学

キーワード：右手/左手系複合伝送線路 漏洩波アンテナ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、超スマート社会を合言葉にサステイナブルなエコシティの建設が各地で進められている。ミリ波を用いた人感センサ、車搭載の障害物レーダ、光波では遮蔽されて見ることができない物体内部に存在する金属探知用イメージング、あるいは障害者の認知機能の代償機器などもその構成要素の1つとして開発が進められるべきものとして認識されている。これら要素に組み込まれる単体のアンテナとして申請者はこれまでにスタブ装荷漏洩導波管構造のアンテナや人工媒質を用いた右手系/左手系複合伝送線路構造の漏洩波アンテナを開発してきた。この種のアンテナは伝送線路上の一部にスロットやパッチなどの放射機構を設けて電磁波の放射を促すのではなく、伝送線路に何も付加的構造を設けない様線路上の漏洩波を利用するものであり、周波数掃引によるビーム走査が行える特徴を持つ。一方、平面でのビーム走査ではなく、容易に平面をビーム走査する方法として大地に対し垂直に立てた等方性の指向特性を持つ漏洩波アンテナを用いれば、大地上でアンテナを中心にした半径方向に周波数によるビーム走査が行えることになる。しかしながら、通常の間筒導波管の伝搬モードを用いたアンテナでは速波の電磁波となるため、単純構造では伝搬方向への前方漏洩波しか生じない。このことは給電点が大地上にあることを考えると、漏洩波の放射はアンテナから上方の天空へ向かう方向となり、大地面での検知には不適である。それゆえ、アンテナから下方の大地に向かう放射を実現するには間筒導波管を自然界には存在しない左手系媒質をもつ線路として動作させることが必須となる。

2. 研究の目的

申請者の提案した円筒導波管遮断TM、TEモードで構成された左手系媒質伝送線路に開口スリットを設け漏洩波アンテナとしたときの放射特性を明らかにするとともに、スリットの形状、個数、および設置の位置により、その放射指向性を制御することが主要な目的である。また、方形導波管についても同様の検討を進めるとともに、複合線路への励振法が問題となることから、複合線路と入出力線路の整合法についてマイクロストリップ線路を用いた基礎的研究により新たな励振法を見出すことも目的の1つである。

3. 研究の方法

(1) 申請者が提案した円筒導波管の遮断 TM_{01} モードと仕切り導体板装荷の遮断TE基本モード区間を交互に周期配置した右手/左手系複合伝送線路に開口スリットを設け、漏洩導波管としたときの放射特性についての理論的、実験的検討をまず行う。そして放射特性の指向性制御を伝搬軸方向および断面方向の両面について行うために、開口スリットの形状および管壁上の配置の検討を行う。

(2) (1)で検討した右手/左手系複合伝送線路の構成法を方形導波管に適用し、導波管の一面にスリットを設けた場合の放射特性について理論的、実験的検討を行う。

(3) 右手/左手系複合マイクロストリップ線路を用いて、入出力線路と複合線路との整合をインピーダンスの観点から行い、導波管問題への適用を検討する。

4. 研究成果

(1) 図1は円周方向にスリットを設けた場合の右手/左手系複合円筒導波管の形状を示したものであり、 $l_1 = 1.0$, $l_2 = 10.0$, $r = 10.22$, $d = 2.0$, $w = 2.0$, $h = 4.7$ [mm]において阻止域のないバランス条件を満たすことをその伝送特性の数値解析結果から確認している。なお、計算は電磁界解析シミュレータであるHFSSを用いて行っている。図2は円周上に長さ $S_1 = 10.7$ [mm]と幅 $S_2 = 2.4$ [mm]のスリットを遮断TMモード区間に設けた場合の30段周期の場合の放射特性を周波数毎に求めたものである。

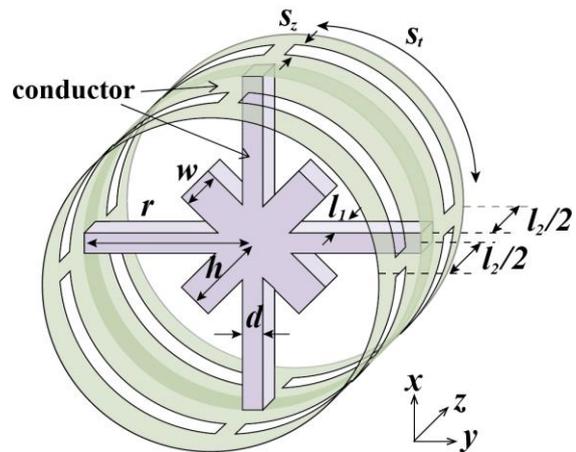


図1 スロット装荷右手系/左手系複合漏洩導波管

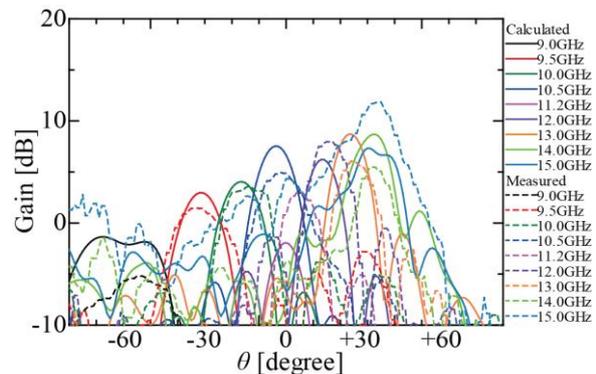


図2 周波数をパラメータとした放射特性

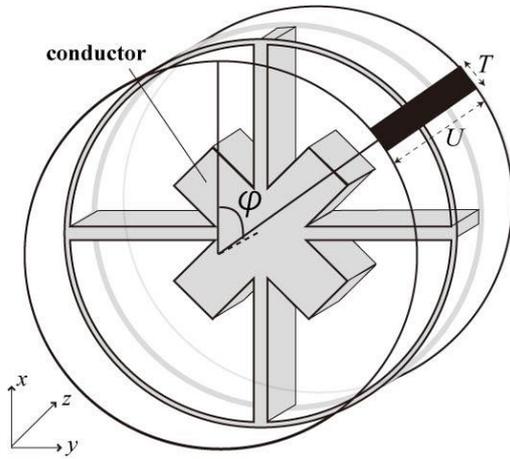


図3 スリット装荷右手系/左手系複合漏洩導波管

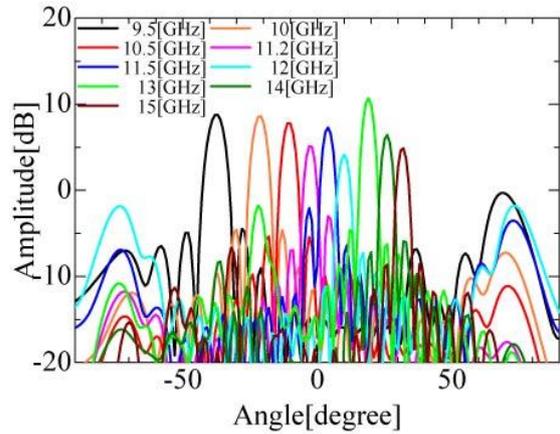


図4 周波数をパラメータとした放射特性



(a)



(b)

図5 (a)試作 TE および TM モード区間と (b) 試作アンテナ全体の写真

図から明らかなように、スロットの長さが設定周波数の 1/2 波長のときに放射値のピークを取るため、周波数を変化させた場合に一律な利得を得ることができない。そこで一律に放射できるアンテナとして動作させるためにスロットに代わり円筒導波管外壁に図3に示すようなスリットを設ける。 $\phi = 30[\text{deg}]$, $U = 320[\text{mm}]$, $T = 2[\text{mm}]$ とした場合の放射特性の数値解析結果を図4に示す。図5は測定のために試作した TE および TM モード 1 区間の導波管とそれらを 30 区間接続したアンテナの写真であり、図6は、このアンテナを用いて放射特性を測定した結果を示したものである。理論値と測定値はよく一致しており、周波数によるビームシフトが実験的にも検証され、提案アンテナの有用性が明確となった。

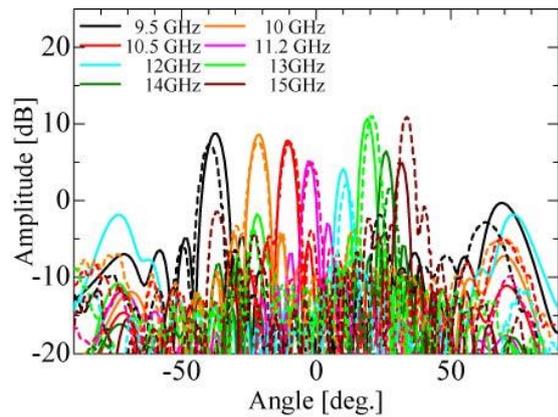


図6 放射特性の測定結果

(2) 図7は方形導波管を用いた場合のスリット装荷右手/左手系複合漏洩導波管の形状を示したものであり、 $a = 30.0$, $b = k = 15.0$, $u = 3.0$, $l_1 = 3.0$, $l_2 = 10.0$, $t = 4.0[\text{mm}]$ において阻止域のないバランス条件を満たすことをその伝送特性の数値解析結果から確認している。図8は30周期の長さをもつ試作アンテナの導波管内部の写真であり、図9はスリットの幅 $w = 3.0[\text{mm}]$, 中心からのオフセット量を $p = 3.0[\text{mm}]$ とした場合の 9GHz および 11GHz における放射特性の数値解析結果と測定結果を比較したものである。両者の特性は概ね一致しており、方形導波管を

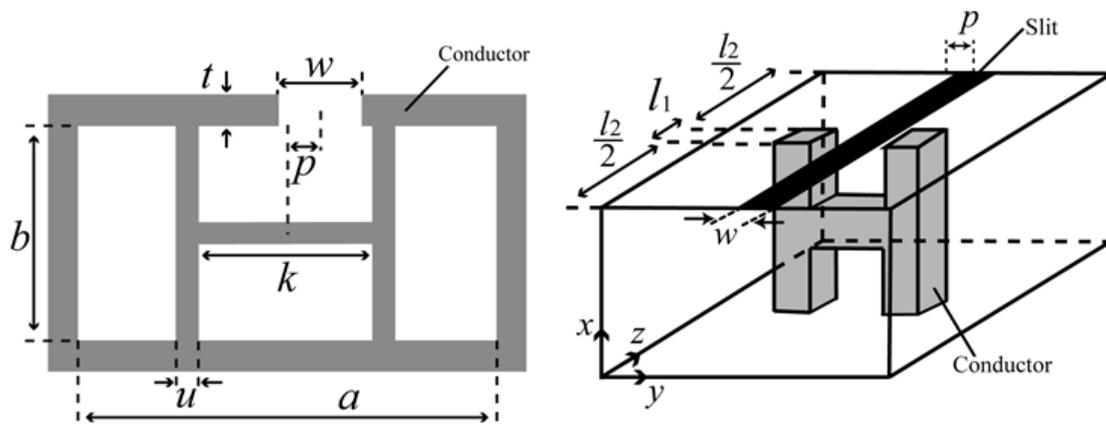
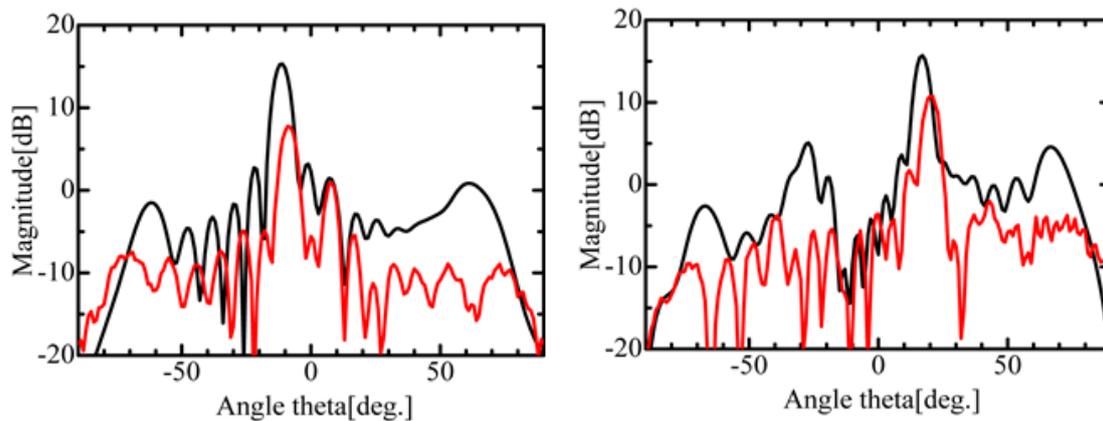


図7 スリット装荷右手系/左手系複合漏洩方形導波管



図8 (a)試作 TE および TM モード区間と (b)試作アンテナ全体の写真



(a) 9 GHz

(b) 11 GHz

図9 放射特性の理論値（黒線）と測定値（赤線）の比較

用いた右手/左手系複合漏洩波アンテナの有用性が明らかとなった。

(3) 遺伝的アルゴリズムを用いて任意形状の右手/左手系複合マイクロストリップ線路を設計した伝送特性の一例を図10に示す。設計は評価周波数帯域 6.3-6.7GHz において左手系媒質が得られるように最適化を行ったものであり、10周期における特性を示している。図より通過域において入出力線路と左手系媒質線路間の不整合により顕著なリップが生じ、特性の劣化がみられる。そこで、左手系媒質線路が周期構造を有していることから、その特性インピーダンスとしてブロッホインピーダンスを用いて、給電部分と左手系媒質線路間の整合を取る回路を設計する。整合回路はマイクロストリップを用いた図11に示すオープンスタブで設計し、その寸法はイミタンス図表を用いて算出した。オープンスタブの幅を 50Ω (幅 2.62mm) として設計したスタブの位置 d_m およびスタブの長さ l_b はそれぞれ 9.25mm, 4.38mm となった。得られたスタブを入出力端に装荷して求めた伝送特性が図12である。図ではスタブ装荷の有無による特性の比較を行っており、整合回路を用いることで通過域のリップが消失し、伝送特性の改善が図られることが明らかとなった。この整合回路の手法を遮断導波管で構成された右手/左手系複合線路に直ちに適用するためには多少の工夫が必要であり、今後の検討課題と言える。

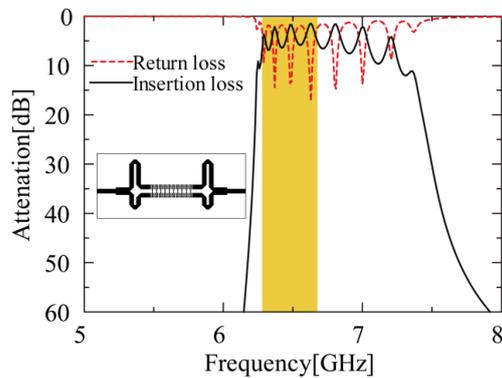


図 10 10周期の伝送特性

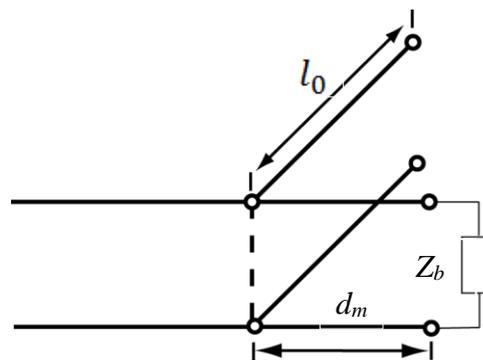


図 11 開放スタブを用いた整合回路

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① S. Nishimura, H. Deguchi, M. Tsuji, “Transmission characteristics on composite right/left-handed cylindrical waveguides constructed by the cutoff TE and TM Modes,” Progress In Electro- magnetics Research M, 72 巻, 2018, pp. 89-96 (査読有)
DOI: 10.2528/PIERM18053002
- ② J. Nakajima, S. Nishimura, H. Deguchi, M. Tsuji, “Leaky-wave antennas of CRLH waveguide using the cutoff TM₀₁ mode and the sector shaped cutoff TE Mode,” Proceedings of Asia Pacific Microwave Conf., 2018, pp.1-3 (査読有)
DOI: 10.23919/APMC.2018.8617614
- ③ T. Nakabayashi, A. Mishiro, H. Deguchi, M. Tsuji, “Improvement of transmission characteristics of composite right/left-handed microstrip lines by using impedance matching,” Proceedings of Asia Pacific Microwave Conf., 2017, pp. 1076-1079 (査読有)
DOI: 10.1109/APMC.2017.8251678
- ④ S. Nishimura, H. Deguchi, M. Tsuji, “Radiation characteristics of leaky-wave antenna using ridge-loaded composite right/left-handed cylindrical waveguides,” Proceedings of IEEE AP-S Intern'l Symp. 2016, pp. 86-87 (査読有)
DOI: 10.1109/APS.2016.7695751
- ⑤ K. Uyama, S. Nishimura, H. Deguchi, M. Tsuji, “Transmission characteristics of CRLH rectangular waveguides constructed by the cutoff modes of TM and TE waves,” Proceedings of. Intern. Conf. on Electromag. in Advanced Appl., 2016, pp. 728-731 (査読有)
DOI: 10.1109/ICEAA.2016.7731502

[学会発表] (計 21 件)

- ① S. Nishimura, H. Deguchi, M. Tsuji, “Leaky-wave antennas using composite right/left-handed cylindrical waveguides,” Progress In Electromagnetics Research Symp., 2018.
- ② A. Mishiro, H. Deguchi, M. Tsuji, “Improvement of transmission characteristics of composite right/left handed transmission lines by using impedance matching,” Progress In Electromagnetics Research Symp., 2018.
- ③ 仲嶋淳吾, 出口博之, 辻 幹男, “遮断 TE および TM モードを用いた右手/左手系複合円形漏洩導波管の放射特性”, 電子情報通信学会総合大会, 2018.
- ④ 竹内裕太, 仲野良祐, 出口博之, 辻 幹男, “多層平面構造デュアルバンドフィルタの特性改善について”, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2018
- ⑤ 鶴山和哉 西村茂幸 出口博之 辻 幹男, “遮断 TM・TE モードによる右手/左手系複合方形漏洩導波管の放射特性”, 電気学会電磁界理論研究会, 2018

[その他]

ホームページ

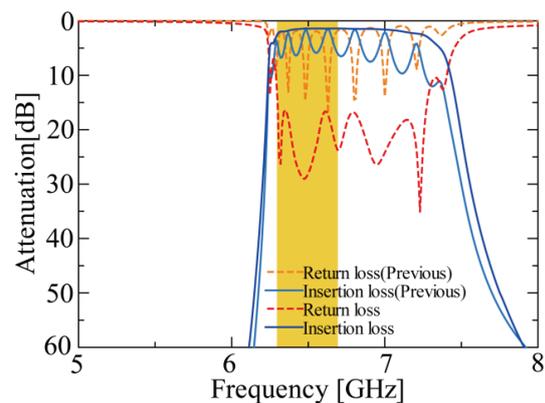


図 12 スタブ装荷した場合の伝送特性

<http://www1.doshisha.ac.jp/~hdeguchi/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：西村 茂幸

ローマ字氏名：(NISHIMURA Shigeyuki)

研究協力者氏名：仲嶋 淳吾

ローマ字氏名：(NAKAJIMA Jungo)

研究協力者氏名：鶴山 和哉

ローマ字氏名：(UYAMA Kazuya)

研究協力者氏名：仲野 良祐

ローマ字氏名：(NAKANO Ryosuke)

研究協力者氏名：三城 彰和

ローマ字氏名：(MISHIRO Akikazu)