

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13754

研究課題名（和文）放射量周波数選択化による導波管スロットアレーアンテナの低干渉化の研究

研究課題名（英文）Research on low interference waveguide slot array antennas by frequency selective characteristics of radiation power

研究代表者

戸村 崇 (Takashi, Tomura)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：10803992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では放射量周波数選択特性を有する高効率・高利得なミリ波帯導波管スロットアレーアンテナの実現を目指し、アンテナ設計法の確立、構造の簡素化を研究した。設計法として最適化不要な一意的設計法を検討した。反射特性は所望の特性を実現したが、利得の周波数特性は解析値より低下していることが判明した。2種の空洞共振器を用いる測定法を構築し、導電率を評価した結果、側壁面の導電率が大幅に低下していることが判明した。製造誤差に強い構造として、金属ブロックを誘電体基板で置き換える構造を検討した。幅広スロット層やスリット層を2層設けることで、金属ブロックと同様の特性が得られることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波は有限な資源であり、効率良く使用することが求められる。通常、アンテナは使用する周波数帯の両側に不必要な電波を放射するため、隣接するシステム間に隙間を設けて周波数を設定する。この隙間は互いの不要な電波が混信し使用するのが不可能である。本研究課題の研究成果を用いることで、システムをより密に配置することが可能になり、電波の有効利用が可能になる。本設計手法は最適化が不要な一意的設計法であり、効率的なアンテナ設計が可能になる。また設計したアンテナのコンポーネントごとの特性を知ることができ、ボトルネックとなっているコンポーネントを抽出することも可能である。

研究成果の概要（英文）：Antenna design methodology and structure simplification were studied to realize high efficiency and high gain millimeter-wave band waveguide slot array antenna with frequency selective characteristics of radiation power. A unique design methodology which does not require a numerical optimization is studied. Reflection characteristics agree but gain does not agree well because conductivity may degrade greatly. Conductivity measurement methodology is established and measurement results showed that the narrow wall of the waveguide has much lower conductivity than wide wall one. For simple structure with high robustness on fabrication tolerance is studied and metal blocks are replaced by dielectric substrates. Addition of wide slot layer or double slit layers enables comparable characteristics with all metal antennas.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：アンテナ ミリ波 導波管 周波数選択 低干渉

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、数 Gbps から数十 Gbps の高速無線通信のために広い帯域幅を使用できるミリ波帯が注目されている。60 GHz 帯では 57 - 66 GHz の帯域幅 9 GHz・14.6% [1], 80 GHz 帯では 71 - 76 GHz と 81 - 86 GHz の 19.1% [2], 120 GHz 帯では 116.5 - 133.5 GHz の帯域幅 17 GHz・13.6% [3], 330GHz 帯では 295 - 365GHz の帯域幅 70GHz・21.2%[4]を使用するシステムが検討されている。一対一および一対多の固定無線通信の用途では広帯域な高利得アンテナが必要となる。ホーンアンテナや反射鏡アンテナなどの開口面アンテナが使われるが、三次元構造であるためアンテナ体積が大きい。無線回路とアンテナを一体化するには平面型アンテナが望ましい。基板上に構成するパッチアレーは平面構造で軽量であるが、ミリ波帯では給電回路の誘電体損失が大きく、高利得アンテナを高効率で実現できない。平面型中空導波管スロットアレーはミリ波帯でも低損失であり、高効率で高利得を平面型で実現できる。しかしコストと重量が課題である。

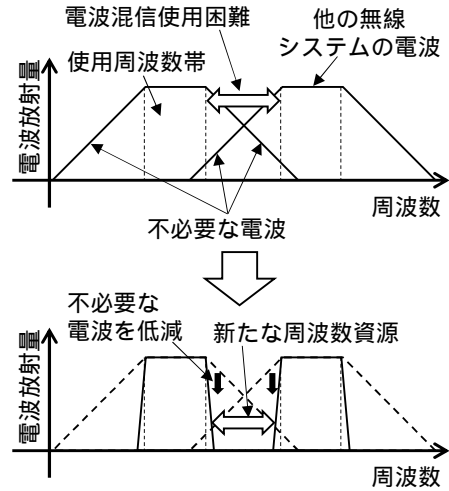


図1 不要放射低減のメリット

本研究では、ミリ波帯高利得アンテナの不必要な電波の放射を低減する方法を検討する。これにより隣接する無線システムとの間での、電波の混信がなくなり、新たな周波数資源を生み出すことが可能となる。具体的にはアンテナ設計法を確立し、試作測定評価により本研究の有効性を実証する。設計法として最適化不要な一意的設計法と構成要素を増やさない簡易構成設計法を確立する。本研究の完遂により周波数利用効率向上し、新たな無線システムへの周波数割り当てが可能となり、ミリ波帯のさらなる発展に寄与する。

2. 研究の目的

本研究の目的は放射量周波数選択特性を有する高効率・高利得な平面アンテナをミリ波帯で実現することである。これにより不必要な電波の放射を低減し、新たな周波数資源を生み出し、周波数利用効率のさらなる向上が可能となる。

3. 研究の方法

著者らは薄板積層拡散接合による平面型中空導波管スロットアレーを提案してきている。下層に並列給電回路、上層に放射部を有する構造である。これまでに 60GHz, 80GHz, 120GHz, 350GHz 帯で直線偏波, 45 度直線偏波, 円偏波, 偏波共用アンテナを提案し、高効率、高利得そして広帯域な特性を実現した。

近年、フィルタと同等な反射特性を持つフィルタリングアンテナが盛んに研究されている。共振器とアンテナと組合せ、フィルタ設計法に基づき一意的にアンテナ構造を決定できる。本研究ではこの設計法を 2x2 素子導波管スロットアレーに適用し、その有効性を検証する。

4. 研究成果

設計するアンテナの構造を図 3 に示す。給電導波管, 3つのキャビティ, 4つのスロットから構成される。終端短絡導波管の広壁にスロット#1 が配置され、上層のキャビティ#1 を励振する。キャビティ#1 上には 4つのスロット#2 が配置され、その上層のキャビティ#2, スロット#3, キャビティ#3, スロット#4 を等振幅, 等位相で励振する。

アンテナ構造の等価回路を図 4 に示す。キャビティを直列共振回路, スロット#1~#3 を理想変成器, スロット#4 を放射抵抗で表している。この回路は共振周波数 f_0 , 外部 Q 値 Q_{ext} , 結合係数 k_{ij} , 放射 Q 値 Q_{rad} によって表される。この回路は三段共振器直結型フィルタの等価回路と等価であり, 所望の伝達特性から回路パラメータを決定できる。

伝達関数を Chebyshev (等リプル) 特性とし, 通過域の反射量を -20dB としたときの回路パラメータを図 2 に示す。通過域の帯域幅が広がるほど, 求められる Q 値は低く, 結合係数は高くなる。なお, 回路の対称性及びキャビティ#1 からキャビティ#2 の分配数より $k_{12} = k_{23}/2$ である。

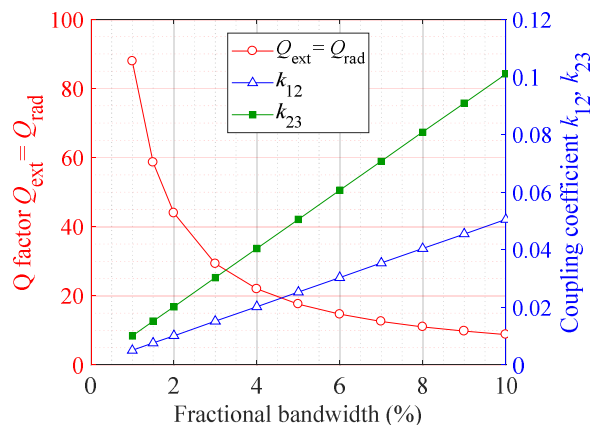


図2 回路パラメータ

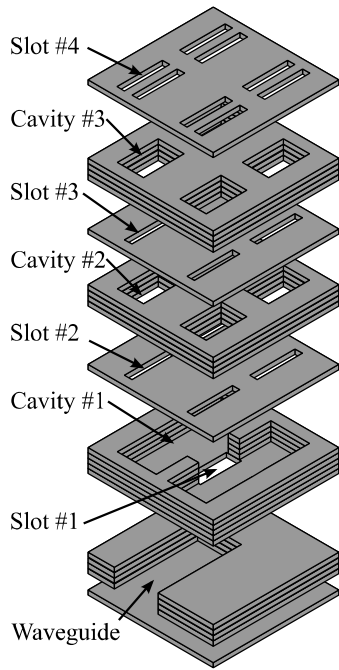


図3 アンテナの構造

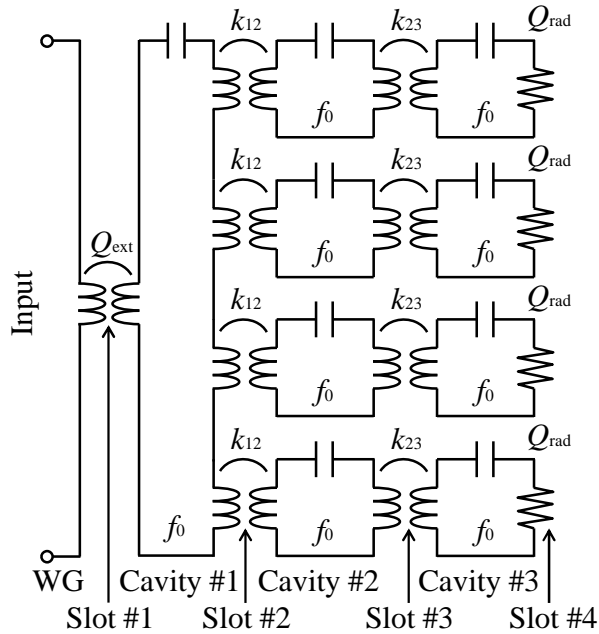


図4 アンテナの等価回路

設計周波数 f_0 を 78.5GHz とし，回路パラメータと各コンポーネントの物理形状の関係を算出する．

アンテナ放射 Q 値計算用の解析モデルを図 5 に示す．導波管，スロット#3，#4，キャビティ#3 から構成される．スロット#4 上には周期境界条件を仮定した放射領域が設けられている．反射の周波数特性から放射 Q 値を求める．キャビティ#3 の幅を変化させ，放射 Q 値を調整する．また，キャビティの共振周波数は設計周波数に一致させる必要がある．ここではキャビティ#3 の長さで共振周波数を調整する．

放射 Q 値のキャビティ#3 幅による変化を図 6 に示す．また同図にキャビティ#3 の共振周波数が設計周波数となるキャビティ#3 の長さを示す．キャビティ#3 幅つまりスロット#4 の幅が広くなるにつれ放射 Q 値が低下する．

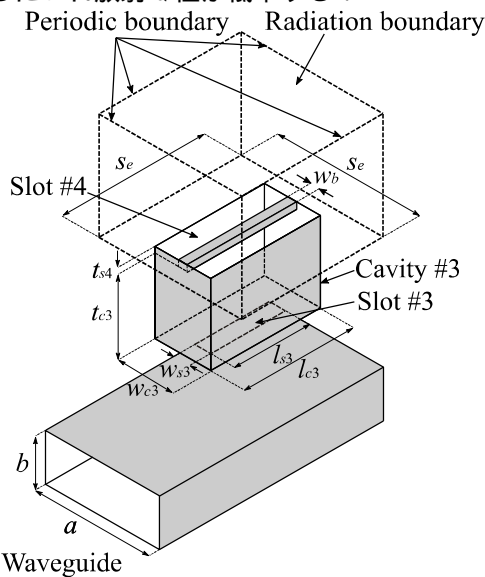


図5 放射 Q 値計算解析モデル(パラメータ(単位: mm) $a = 2.50$, $b = 0.80$, $l_{s3} = 1.40$, $w_{s3} = 0.20$, $t_{c3} = 0.60$, $t_{s4} = 0.20$, $w_b = 0.20$, $s_e = 3.21$)

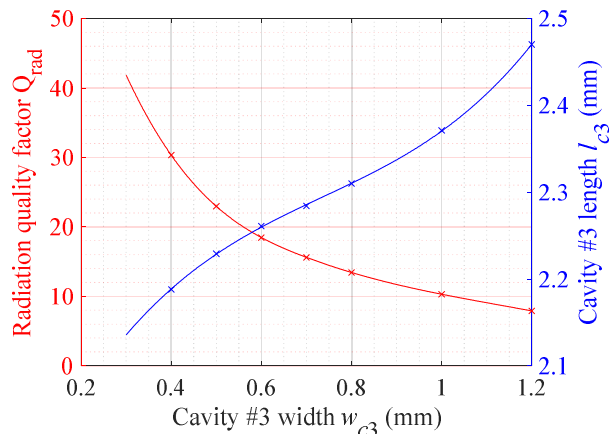


図6 放射 Q 値

キャビティ#3 とスロット#4 を固有値解析し，放射モードの電磁界分布を求める．解析モデルを図 7 に示す．なお，放射空間側壁には周期境界条件を仮定した．得られた固有モードの電磁界分布を図 8 及び図 9 に示す．スロット開口面を開放した TE₁₀₁ モードであることが分かる．

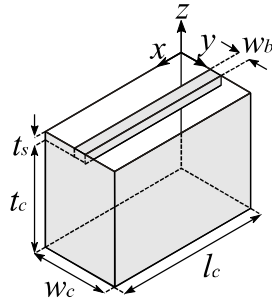


図7 固有値解析モデル

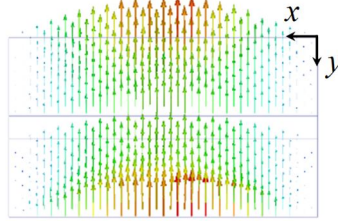


図8 xy面電界分布

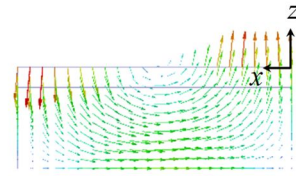


図9 zx面磁界分布

回路パラメータの実行可能領域を図10に示す。広帯域化を実現するうえで、低いQ値と高い結合係数が必要になる。放射Q値や結合係数は広い範囲で実現できるが、外部Q値の最小値に制限があり、比帯域5%で本アンテナ構造の広帯域化の限界地であることが分かる。今後、広帯域を目指すうえで外部Q値に対応する給電導波管からキャビティ#1に給電する箇所を再設計する必要がある。

得られた回路パラメータと物理構造の関係から図3のアンテナを構成し解析する。ここでは比帯域5%とし、アンテナのパラメータを決定した。反射の周波数特性を図11に示す。等価回路の特性とずれはあるが、所望の周波数帯域で通過特性が得られている。図11の反射特性に示した通り、等価回路から得られる反射特性と実際に設計したアンテナの特性には差異がある。原因として以下が考えられる。

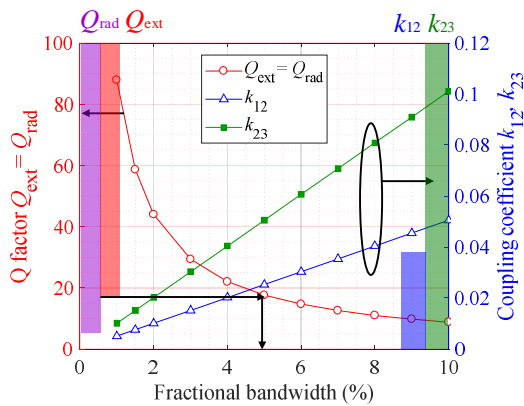


図10 実行可能領域

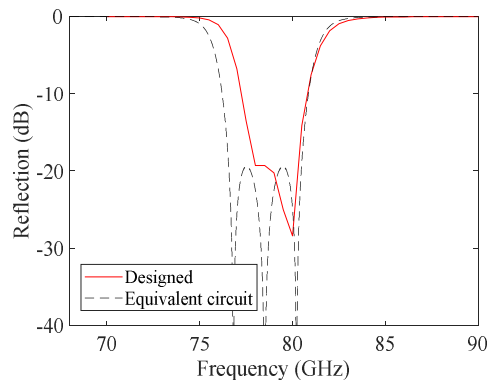


図11 反射の周波数特性

1. 飛び越し結合

現在の設計法では隣接コンポーネント間の結合のみ考慮している。つまり図12の等価回路における k_{12} や k_{23} のみ考慮している。しかし、実際には1つのコンポーネントを飛び越した結合も存在している。例えば図4における k_{12} である。現在の等価回路にはこの現象が考慮されていない。したがってこの影響を含んだ等価回路を検討する必要がある。

2. 隣接スロットの摂動の影響

回路パラメータを抽出する際には、隣接スロットを完全導体で覆ったモデル(図13上)で解析している。しかし、実際には隣接スロットが設けられ(図13下)、そのスロットから電磁界が漏れる。この摂動の影響により、回路パラメータに誤差が含まれてしまう。さらなる設計精度の向上にはこの摂動の影響を含んだ回路パラメータ抽出法を検討する必要がある。

試作した4x4素子アレーアンテナを図14に示す。先に設計した2x2素子サブアレーに並列給電回路を組み合わせた。アンテナは0.2mm厚のアルミ合金を用い拡散接合により試作した。各コンポーネントのパターンは接合前にエッチングで作成した。試作したアンテナの放射スロット長をデジタル顕微鏡で測定した。全てのスロット長の平均値は2.34mmと設計値の2.31mmと30 μ mの誤差があった。

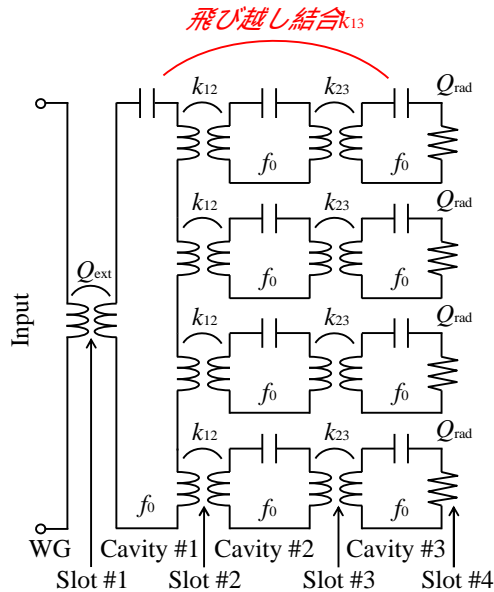


図 12 等価回路

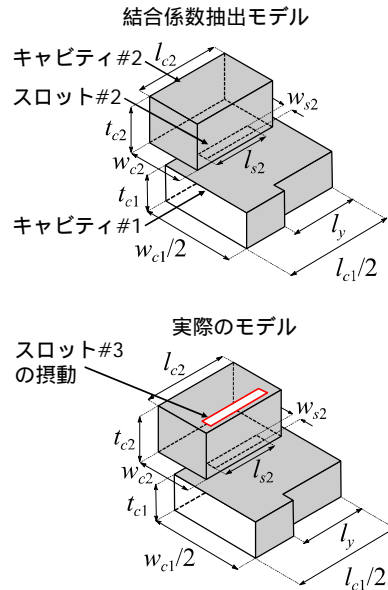


図 13 回路パラメータ抽出モデル

反射と利得の周波数特性および放射パターンを測定した。反射波 3.8%の通過帯域を確認したが、2GHz の周波数ズレを観測した。この原因としては製作誤差による寸法の変化と考えられる。利得の周波数特性は通過域で設計値より 1dB 程度低下していることが分かった。この原因として導電率の低下が懸念され、その評価が必要である。不要帯域においては十分放射量が抑えられており、設計法の有効性を確認した。E 面と H 面の放射パターンを図 15 に示す。設計値と測定値は良く一致しており、放射パターンは製作誤差の影響を受けにくいことが分かる。

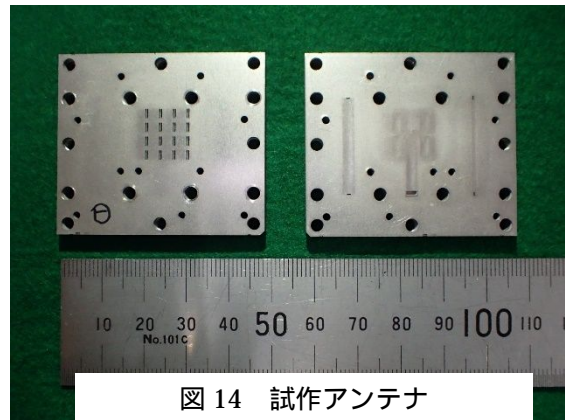
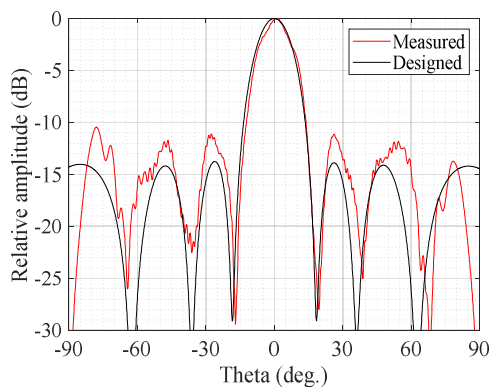
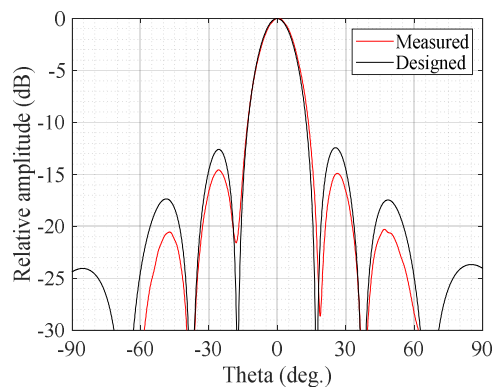


図 14 試作アンテナ



(a) E 面



(b) H 面

図 15 放射パターン

- [1] R. Fisher, Proc. Int. Signals, Syst. Electron. Symp., pp.103–105, July 2007.
- [2] M. Dyadyuk, J. D. Bunton, J. P. Athikulangara, R. Kendall, O. Sevimli, L. Stokes, D. A. Abbott, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 55, no. 12, pp. 2813–2821, Dec. 2007.
- [3] A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, R. Yamaguchi, F. Nakajima, T. Furuta, H. Ito, H. Sugahara, Y. Sato, and T. Nagatsuma, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.57, no.5, pp.1102–1110, May 2009.
- [4] A. Martínez, I. Maestrojuan, D. Valcazar and J. Teniente, 2016 46th European Microwave Conference (EuMC), London, pp. 37-40, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 IRIE Hisanori, TOMURA Takashi, HIROKAWA Jiro	4. 巻 E102.B
2. 論文標題 Perpendicular-Corporate Feed in a Four-Layer Circularly-Polarized Parallel-Plate Slot Array	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 137 ~ 146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2018EBP3058	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 Arakawa Haruka, Irie Hisanori, Tomura Takashi, Hirokawa Jiro	4. 巻 67
2. 論文標題 Suppression of E-Plane Sidelobes Using a Double Slit Layer in a Corporate-Feed Waveguide Slot Array Antenna Consisting of 2×2 -Element Radiating Units	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 3743 ~ 3751
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2019.2902677	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 入江寿憲, 戸村崇, 広川二郎
2. 発表標題 垂直方向並列給電4層平行平板45度偏波スロットアレーアンテナの設計
3. 学会等名 信学技報, AP2018-145, pp.1-4
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 戸村崇, 広川二郎
2. 発表標題 フィルタ設計理論による2×2素子導波管スロットアレーの給電構造広帯域設計
3. 学会等名 信学ソ大, B-1-80
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 戸村崇, 広川二郎
2. 発表標題 フィルタ設計理論による2×2素子導波管スロットアレーの設計
3. 学会等名 信学技報, AP2018-16, pp.17-21
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tomura and J. Hirokawa
2. 発表標題 Design of feed structure for 2×2-element waveguide slot arrays by filter design theory
3. 学会等名 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. (AP-S), TU-UB.3P.4 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tomura and J. Hirokawa
2. 発表標題 Design of feed and radiation elements for 2×2-element waveguide slot arrays by filter design theory
3. 学会等名 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP), WeP-12 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Ji, T. Tomura, and J. Hirokawa
2. 発表標題 Analysis of 2×2 radiating slots with parallel-plate perpendicular-corporate feed based on method of moments
3. 学会等名 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸村崇, 広川二郎
2. 発表標題 導電率測定によるミリ波帯積層薄板導波管スロットアレーの利得評価
3. 学会等名 信学ソ大, B-1-48
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸村崇, 広川二郎
2. 発表標題 二種マルチモード直方体共振器による積層薄板導波管のミリ波帯異方性導電率測定
3. 学会等名 信学技報, MW2019-20
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 広川二郎, 荒川遥香, 戸村崇
2. 発表標題 2×2素子を放射単位とする並列給電導波管スロットアレーアンテナのサイドローブ抑圧
3. 学会等名 信学技報, AP2019-5
4. 発表年 2019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