

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760327

研究課題名（和文） 多層構造完全並列導波管給電によるスロットアレーの偏波共用化の実現

研究課題名（英文） Realization of a Dual-Polarized Slot Array Fed by Multi-Layer Corporate Feed Waveguides

研究代表者

Zhang Miao (Zhang Miao)

東京工業大学・大学院理工学研究科・産学官連携研究員

研究者番号：90535866

研究成果の概要（和文）：60 GHz 帯で四層導波管並列給電構造を有する 16x16 素子偏波共用スロットアンテナを設計し、両入力ポート間のアイソレーションは周波数 59 ~ 64 GHz において 60 dB 以上を実現でき；垂直と水平直線偏波放射時に周波数 60.3 ~ 63 GHz において 80% 以上の高いアンテナ効率を実現した。高いアイソレーション特性と偏波識別度及び高い開口効率を実現する偏波共用型導波管スロットアンテナの設計手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：A Dual-Polarized 16x16-element Slot Array with Four-Layered Corporate Waveguide Feed is designed in the 60 GHz-Band. A very high isolation of more than 60 dB between two input ports is simulated over the range of 59 ~ 64 GHz, and a very high antenna efficiency of more than 80% is estimated over the range of 60.3 ~ 63 GHz for both horizontal and perpendicular linear polarizations. The design method to achieve high isolation, high XPD (Cross Polarization Discrimination) in dual-polarized waveguide slot antenna is established.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ

1. 研究開始当初の背景

航空機や人工衛星に搭載する合成開口レーダー-SAR(Synthetic Aperture Radar)と移動通信の偏波ダイバーシティなどのアプリケーションでは、同一アンテナで偏波面がお互いに 90 度異なる電波を放射できる偏波共用の実現が重要課題である。

一般的に、パッチアンテナによる偏波共用の実証では、開口の有効利用の観点より積層構造による実現が主流となっている。ただし給電回路や放射素子との結合部も開放的な構造を採用するため、同時に良好な反射抑圧特性と高いアイソレーション・交差偏波識別

度を実現することが困難である。特に高周波領域では放射損失と材料損失よりパッチアンテナの効率が著しく低下するため、ミリ波帯での応用が困難となる。

一方、従来の一層構造導波管スロットアレーアンテナによる偏波共用の実証では、両偏波の放射素子を共用しておらず、給電回路と放射素子を同一平面に配置させている。各偏波を放射する一次元アレーをインターリーブ的に配置させているため配置方向の素子間隔が増大する問題点と、各偏波のアレーが直列給電されるため長線路効果で狭帯域になる問題点があり、放射素子の共用と広帯域

化が課題である。

導波管スロットアンテナの製作に新たな金属薄板の拡散接合技術を導入することで、低コストかつ高精度に多層構造アンテナの実現も容易となった。図1に開発した二層構造完全並列給電型薄板積層導波管スロットアレーアンテナを示す。完全トーナメント給電回路を放射素子の下層に配置したため、広帯域なアンテナ放射特性と反射抑圧特性を実現した。60 GHz帯で利得32 dBiアンテナの損失は0.3 dB以下となり、アンテナ効率80%以上となる比帯域8%が得られた。

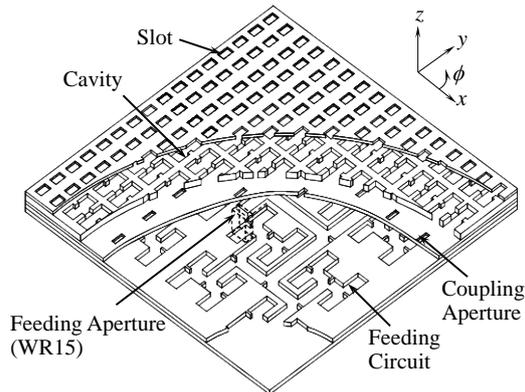


図1 16x16素子二層構造完全並列給電直線偏波導波管スロットアレーアンテナ

本研究は上記実証例の利点を保つ形で図1に示す低姿勢な二層構造完全並列給電導波管スロットアンテナの高効率・広帯域の利点を生かし、下部に多層(1~2層)導波管並列給電回路を追加し、給電素子となるクロススロットを介して共用する両偏波の放射素子を励振する。ミリ波帯で広帯域に良好な反射抑圧、アイソレーションと交差偏波識別度を実現する。例えば四層構造で40 dBiのアンテナを実現した場合でも全体厚みが1λ程度に留まり、レンズアンテナや反射鏡アンテナに比べて十分に薄い構造である。

2. 研究の目的

本研究はミリ波帯(30~300 GHz)で図1に示す完全並列給電導波管スロットアンテナの高効率・広帯域の利点を保ちつつ、多層構造導波管給電によるスロットアレーの偏波共用化の実現を目指す。具体的に30~40 dBiの高利得範囲で、入力ポート間のアイソレーション40 dB以上、交差偏波識別度30 dB以上の動作特性を狙う。特徴として①共用する両偏波の放射素子をクロススロットで独立に励振できれば、2入力ポート間の高いアイソレーションと高い偏波識別度が実現可能であり、②更に偏波面が互いに90度異なる直線偏波を独立に実現できれば2入力ポートの電力と位相を適切に調整することで

任意偏波面の直線偏波や円・楕円偏波の容易な実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) 給電回路と励振構造の検討:

実現可能性について、図1の下層の給電導波管の各終端部に相当する図2に示すクロススロットの励振構造を検討した。ポート1と2の導波管より入射した際にそれぞれxとy偏波を独立に励振できる。縦と横スロットを組み合わせて、片方の方形導波管から入射した電波の偏波は、もう1つの方形導波管の広壁と平行となりカットオフとなるため、高いアイソレーションが得られる。図3に検討モデルの反射と透過係数の周波数特性を示す。透過量が中心周波数付近で-30 dB以下となる高いアイソレーションを得た。VSWRが1.2以下となるポート1と2の反射帯域はそれぞれ5.2%と5.5%である。また、シミュレーションにて2ポート同時励振時に斜め方向の直線偏波任意偏波面(自動車レーダの45度偏波など)の直線偏波と円(左・右旋)・楕円偏波(任意の軸比)の実現可能性を確認した。

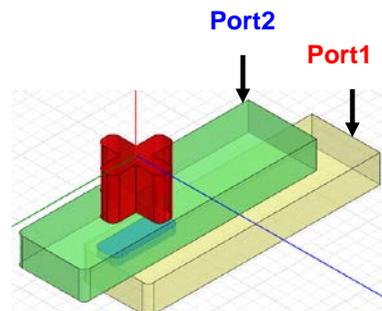


図2 クロススロットの独立励振構造

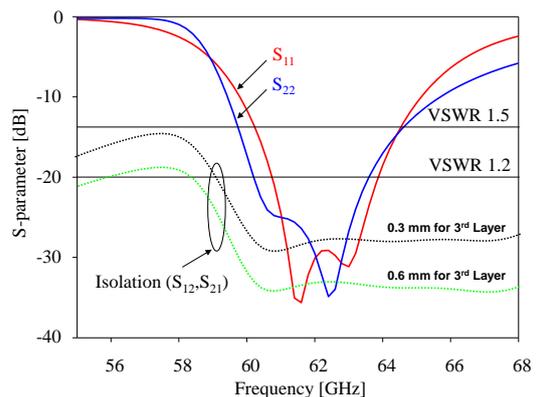


図3 反射と透過係数の周波数特性

直線偏波動作時に、図4に示すH面導波管による同相給電回路を用いて、給電素子となる直線スロットを給電する。それに対し偏波共用動作時には、一般の発想では図2と全く同じ回路を90度回転させて積層した構造ではアイソレーションが取れない問題がある。

そこで、提案構造としてアイソレーション向上のために、図4に示す二層導波管給電による十字スロットの独立励振構造を拡張して同じく縦スロットと横スロットの組み合わせを考案した。ただし、図4と同様なH面回路で横スロットを励振する際に前後の横スロットが逆相になる問題点を回避するために、図5にレイヤ2で示すもう一層の逆相分配回路を追加することで結果的に同相励振が実現される。キーポイントとして、追加給電層を適切な位置に配置することで縦スロット厚が大きくなるにつれ、反射特性を帯域保持すると共に、マジックTの動作原理と同様に高次モードも十分に減衰してアイソレーションの向上に貢献できる。

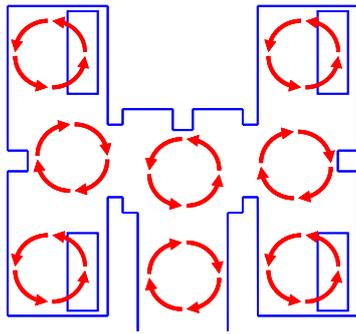


図4 完全並列給電回路と磁界分布(一層)

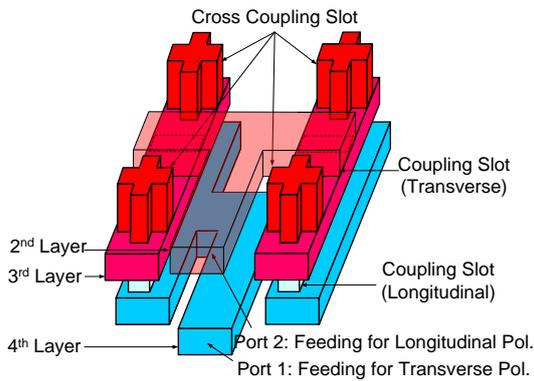


図5 偏波共用完全並列給電回路(三層)

(2) 放射部構造の検討

図6(a)に完全並列給電アンテナの基礎放射素子の構造を示す。偏波共用時に水平と垂直偏波動作共に上部の放射スロットを共用し、両偏波を下部の給電素子となるクロススロットで独立的に励振する。図6(a)の構造を90度回転させて重ねた構造は図6(b)となる。放射スロットも励振スロットと同様に十字型となる。主な構造変形点として、導波管キャビティを正方形し、水平と垂直の二偏波で共用させ；両偏波の励振と放射にはクロススロットを導入した。垂直・水平方向の電界成分を独立的に励振できれば高い交差偏波識別度も容易に実現できる。

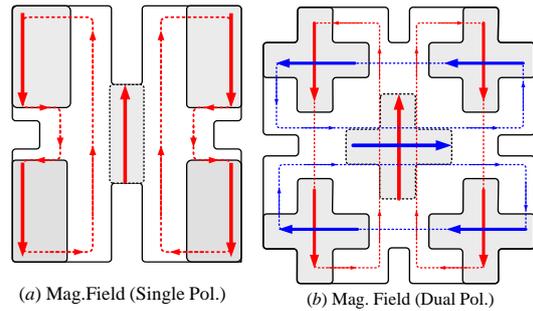


図6 単一偏波と偏波共用動作の放射部構造

(3) アンテナの初期設計

まず、有限要素法ベースの電磁界シミュレータ HFSS を用いて基本構造素子となる 2×2 素子サブアレーの実現を試みた。設計周波数は 61.5 GHz で、放射素子間隔は 4.2 mm となり、外部に周期境界壁を設置した。次に、 16×16 素子並列給電四層構造導波管アンテナの設計を行なった。図7にアンテナの全体構造を示す。開口面積は 67.2 mm 四方で、全体厚さは 6.3 mm の薄型に実現できた。HFSS による全構造解析の結果として、反射特性について図8に示す通りに、VSWR が 1.5 以下の比帯域は垂直と水平直線偏波放射時にそれぞれ 5% と 8.1% であり；両入力ポート間のアイソレーションは周波数全域 $58 \sim 66 \text{ GHz}$ において 55 dB 以上に実現できた。各直線偏波放射時の指向性利得と利得特性を図9にまとめた。最大アンテナ利得と効率は垂直と水平直線偏波放射時にそれぞれ 61.5 GHz で利得 32.5 dBi 、効率 75% と 62.8 GHz で利得 32.5 dBi 、効率 72% であり；利得 1 dB 低下時の比帯域は同様に各偏波放射時それぞれ 7.15% と 8.78% であった。従って、 60 GHz 帯で高利得・広帯域の並列給電多層構造導波管スロットアンテナを設計したと共に、高いアイソレーションと偏波識別度を有する良好な偏波共用アンテナの設計にも成功した。ただし、設計したアンテナを金属銅薄板の拡散接合技術による試作を行ったが、アンテナは四層構造を有するため拡散接合の過程で薄い金属薄板の位置ズレと接合の不十分さで設計通りの良好なアンテナ特性が得られなかった。

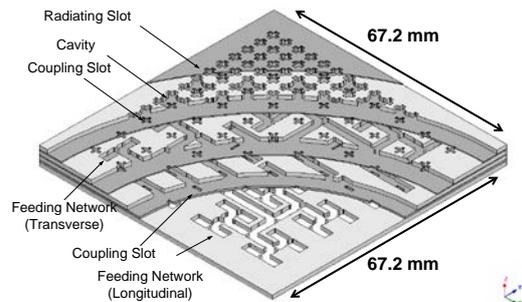


図7 初期設計した 16×16 素子アンテナ

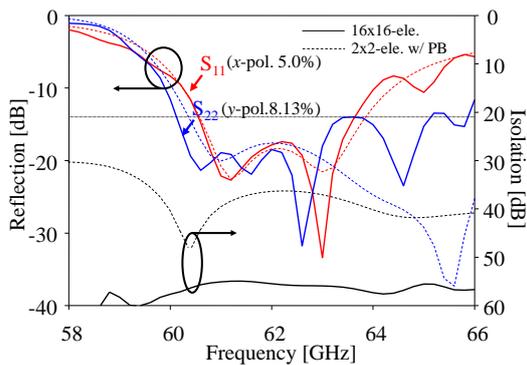


図 8 初期設計したアンテナ反射とアイソレーション

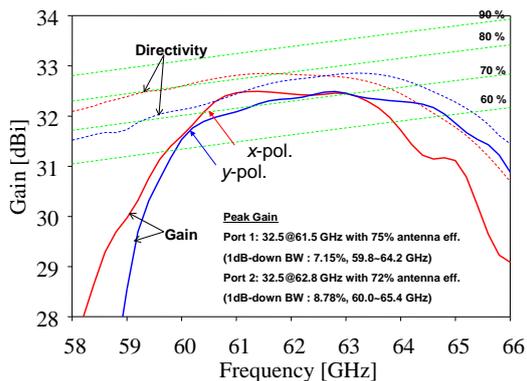


図 9 初期設計したアンテナ利得特性

(4) アンテナ放射効率の向上

初期設計したアンテナについて、課題点として開口効率¹⁾は 80%に到達できず、図 10 にアンテナの放射指向性を示す通り、主偏波面と 45/135 度斜めカット面では高いサイドローブが出現することが確認された。

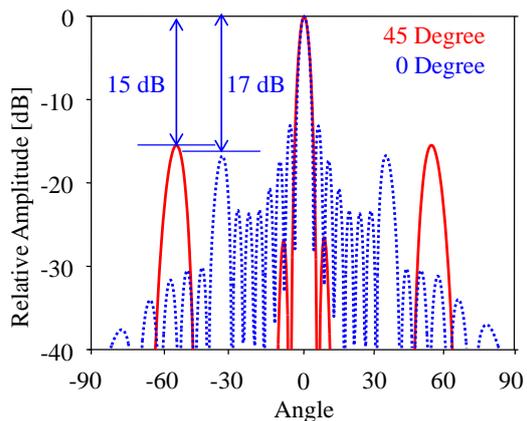


図 10 初期設計したアンテナの放射指向性

開口効率の向上として、まずアレーアンテナの素子間隔に注目し、従来の 4.2mm (0.86λ) から 3.4mm (0.7λ) に徐々に減少させ 2x2 阻止サブアレーを最適化した。図 11 に素子間隔によるアンテナグレーティングローブレベルの変化を示す。主偏波と交差偏

波のグレーティングレベルに注目して、素子間隔の減少に従い、主偏波のレベルがほぼ変わらないことに対して、交差偏波レベルが大幅な低減が得られた。

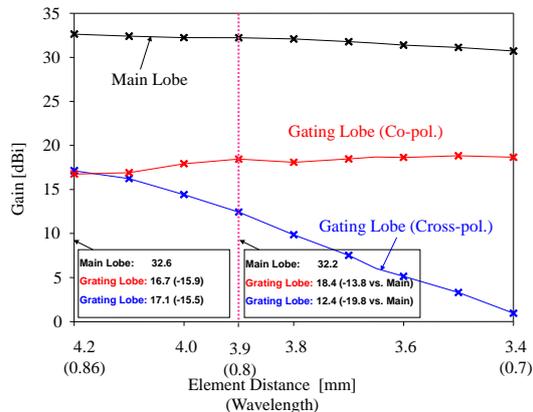


図 11 素子間隔によるアンテナグレーティングローブレベルの変化

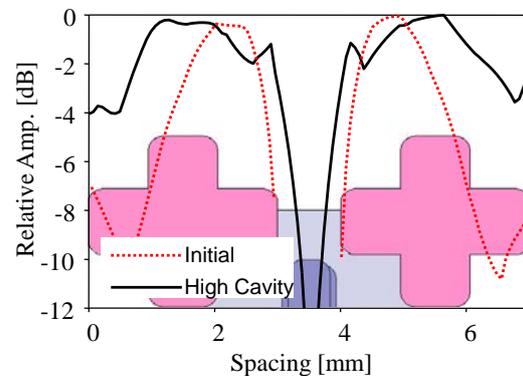


図 12 改善前後の放射スロット上の電界分布

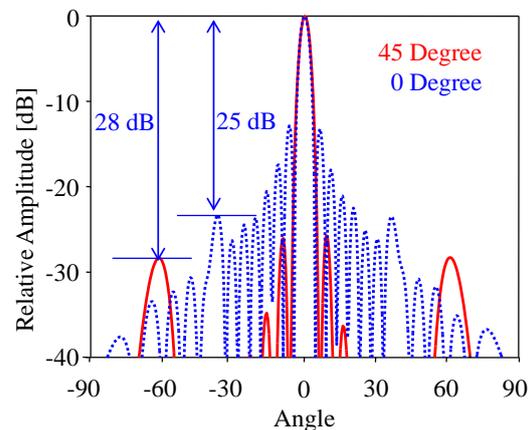


図 13 改善したアンテナの放射指向性

続いて、放射素子となるクロススロットの電界分布に注目したところ、図 12 に示すように垂直と水平偏波成分が基本モード以外の高次モード成分も励振されたため、励振素子よりも電界が強いという非対称な分布となっていた。こちらが主偏波のグレーティン

レベルが悪化する要因である。その影響を低減するためにキャビティを高くすると共にスロット長を短くした結果、電界励振分布が改善された。結果として、放射素子間隔を4.2mm から 3.9mm に、キャビティ高を1.2mm から 2.1mm に、スロット長 3.1mm から 2.7mm に変更した。図 13 に改善後のアンテナ放射指向性を示す。主偏波面と 45/135 度斜めカット面共にグレーティングローレベルが減少したことが分かる。

(5) アンテナの再設計

以上の構造改善を踏まえて、16x16 素子並列給電五層構造導波管偏波共用スロットアンテナを再設計した。図 14 に再設計したアンテナの全構造モデルを示す。開口面積は 67.2 mm 四方より 62.4 mm 四方に変更され、全体厚さは 7.2 mm の薄型に実現できた。

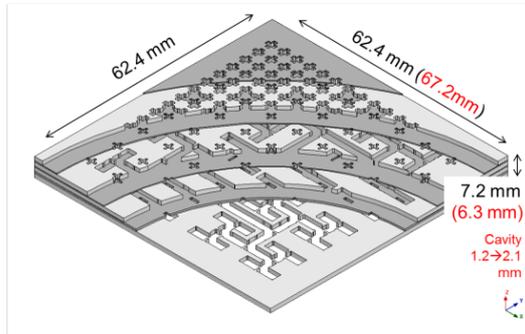


図 14 再設計された 16x16 素子アンテナ

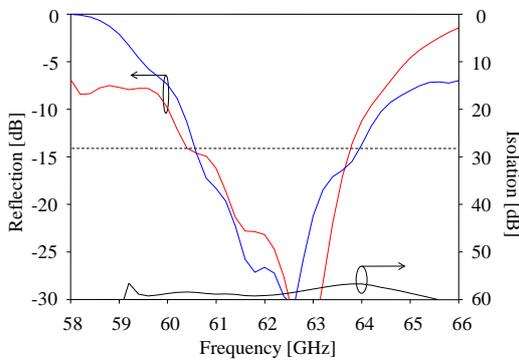


図 14 再設計したアンテナの反射とアイソレーション

HFSS による全構造解析を行った結果として、図 15 にアンテナの反射とアイソレーション特性を示す。VSWR が 1.5 以下となる比帯域は垂直と水平直線偏波放射時共に 4.2% であり；両入力ポート間のアイソレーションは周波数 59 ~ 64 GHz において 60 dB 以上を実現できた。図 16 に再設計したアンテナの利得特性を示す。最大アンテナ利得と効率は垂直と水平直線偏波放射時に同じ 62.5 GHz でそれぞれ利得 32.36 dBi、効率 82% と利得 32.40 dBi、効率 83% であり；周波数 60.3 ~ 63 GHz において各偏波放射時の 80% 以上の高

いアンテナ効率を実現した。利得 1 dB 低下時の比帯域は同様に各偏波放射時それぞれ 6.5% と 7.7% であった。交差偏波識別度が 30 dB 以上を得た。

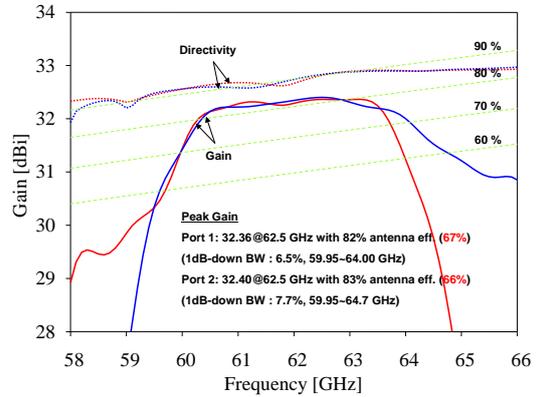


図 16 再設計したアンテナの利得特性

4. 研究成果

本研究は 60 GHz 帯で実現した二層構造並列給電型薄板積層導波管スロットアンテナの高効率・広帯域の利点を生かし、下部に二層導波管並列給電回路を追加し、給電素子と放射素子共にクロススロットを導入して、高いアイソレーションと偏波識別度を有する直線偏波共用アンテナを実現した。16x16 素子並列給電四層構造導波管アンテナの設計を行なった。開口面積は 62.4 mm 四方で、全体厚さは 7.2 mm の薄型に実現できた。HFSS による全構造解析の結果として、両入力ポート間のアイソレーションは周波数 59 ~ 64 GHz において 60 dB 以上を実現でき；周波数 60.3 ~ 63 GHz において各偏波放射時の 80% 以上の高い開口効率を実現した。多層構造導波管並列給電による偏波共用スロットアンテナの動作原理を十分に把握した上で、高いアイソレーション特性と偏波識別度及び高い開口効率を実現する設計手法を確立した。また、シミュレーションにて 2 ポート同時励振時に斜め方向の直線偏波任意偏波面（自動車レーダの 45 度偏波など）の直線偏波と円（左・右旋）・楕円偏波（任意の軸比）の実現可能性を確認した。更なる高利得アンテナの実現について、32x32 素子と 64x64 素子円偏波と直線偏波アンテナの設計も試みた。

新しく設計したアンテナの試作について、加工業者とよく相談した結果、全てのレイヤに対して厚さ 0.3mm 銅薄板均一を使用してエッチング加工を行うことをやめて、導波管（1.2mm 厚）とキャビティ層（2.1mm 厚）をそのまま放電加工したあと拡散接合を行うプロセスに変更する。業者のトラブルで接合まで加工できなかったが、現在は最終加工と測定の準備を進めている。

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 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Dongjin Kim, Miao Zhang, Jiro Hirokawa, and Makoto Ando, "Dual-polarized Corporate-feed Plate-laminated Waveguide Slot Array Antenna for 60 GHz-band," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Paper ID: 1B3-4, Oct. 29 - Nov. 28, 2012, Nagoya, Japan.
- ② Dongjin Kim, Miao Zhang, Jiro Hirokawa, Makoto Ando, "Design of Dual-Polarization Waveguide Slot Array Antenna Using Diffusion Bonding of Laminated Thin Plates for the 60 GHz-Band," IEEE AP-S International Symposium (USNC/URSI National Radio Science Meeting), Session: 463.10, July 8-14, 2012, Chicago, IL, USA.
- ③ Dongjin Kim, Miao Zhang, Jiro Hirokawa, Makoto Ando, "Design of Dual-polarization Corporate-feed Waveguide Slot Array Antenna using Diffusion Bonding of Laminated Thin Plate for 60 GHz-band," 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-1-71, 2012年3月20~23日, 岡山大学.
- ④ Dongjin Kim, Miao Zhang, Jiro Hirokawa, and Makoto Ando, "Feeding Structure to Widen Bandwidth for Dual-polarization Corporate-feed Waveguide Slot Array Antenna," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Paper ID: FrP1-26, Oct. 26-28, 2011, Jeju, Korea.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

<http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

Z h a n g M i a o (Zhang Miao)
東京工業大学・大学院理工学研究科・産学
官連携研究員
研究者番号：90535866