

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	逆相給電平行平板導波路上円偏波クロススロット正方配列アレーアンテナの設計
Title	Design of a Circularly-polarized Crossed-slot Square-Arrangement Array Antennas on Alternating-phase Feed Parallel-plate Waveguide
著者	石川裕太, 戸村崇, 広川二郎
Authors	Yuta Ishikawa, Takashi Tomura, Jiro Hirokawa
出典	電子情報通信学会技術研究報告, vol. 121, no. 330, pp. 80-85
Citation	IEICE Technical Report, vol. 121, no. 330, pp. 80-85
発行日 / Pub. date	2022, 1
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は電子情報通信学会に帰属します。 Copyright(c) 2022 IEICE

逆相給電平行平板導波路上円偏波 クロススロット正方配列アレーアンテナの設計

石川 裕太 戸村 崇 広川 二郎

東京工業大学 工学院 電気電子系

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S3-20

E-mail: {ishikawa.y, tomura, jiro}@antenna.ee.titech.ac.jp

あらまし 隣接する方形導波管を逆相給電すると、共有する側壁を除いて平行平板導波路構造としても電磁界分布は保たれる。スロットを半管内波長間隔で互い違いにオフセットさせると不要な二次ローブが発生するので、オフセットせずに金属ポストで励振する構造を提案する。クロススロット層を付加し円偏波とする。給電部、放射部のそれぞれで素子等価回路が並列コンダクタンスのみで表わされる構造を導入する。定在波励振アレーにおける入力コンダクタンスは、素子の並列コンダクタンスの和で表されるので設計を簡易化できる。設計した結果、4x4素子スロットアレーアンテナにおいて、設計周波数の5.8 GHzで軸比が0.3 dB、実現利得が19.7 dBicでアンテナ効率が94.1%である結果が得られた。

キーワード スロットアレーアンテナ, 逆相給電, 平行平板導波路, 円偏波, クロススロット, 金属ポスト

Design of a Circularly-polarized Crossed-slot Square-Arrangement Array Antennas on Alternating-phase Feed Parallel-plate Waveguide

Yuta ISHIKAWA Takashi TOMURA and Jiro HIROKAWA

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology

2-12-1-S3-20, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

E-mail: {ishikawa.y, tomura, jiro}@antenna.ee.titech.ac.jp

Abstract When adjacent rectangular waveguides are alternating-phase fed, the field distribution is maintained even though the structure becomes a parallel-plate waveguide by removing the shared side walls. If the slots are offset from each other at intervals of a half guided wavelength, undesired second-order lobes are radiated, so we propose a structure in which no offset slots are excited by metal posts. A crossed-slot layer is added for circularly-polarization. We introduce a structure in which the equivalent circuit for the element is represented only by a parallel conductance both for the feeding and radiating parts. The input conductance of an array excited by a standing wave is expressed as the sum of the parallel conductances of the elements, which simplifies the design. As a result of the design, the axial ratio is 0.3 dB, the realized gain is 19.7 dBic, and the antenna efficiency is 94.1 % in the 4x4-slot array at the design frequency of 5.8 GHz.

Keywords slot array antenna, alternating-phase feed, parallel-plate waveguide, circularly-polarization, crossed-slot, metal post

1. はじめに

近年、宇宙での太陽光発電に向けて宇宙太陽光発電システムの研究が進んでいる[1]. 宇宙太陽光発電システムの中でも送電アンテナは重要な構成要素である[2]. 太陽光発電伝送用アンテナは約2 km四方の大きな構造が検討されており、大規模なアレーを構成する

[3]-[5]. そのため、サブアレーの数が非常に多く、サブアレーは簡易な構造が望ましい。

そこで、逆相給電導波管スロットアレーアンテナは、側壁の電氣的接触が不要なので側壁を取り除け、簡易な平行平板導波路構造とできる[6]-[8]. 逆相給電導波管スロットアレーアンテナにおいて、放射スロットを

同相で励振させるために、様々な構造が提案されている[9]-[14]. しかし、スロットを半管内波長間隔で互いにオフセットさせると、斜め方向の素子間隔が自由空間波長より大きくなり不要な2次ローブが発生するので、それを抑圧するためスロットのオフセットをなくし、平行平板導波路内に金属ポストをスロット近傍に設け励振する.

本報告で検討するアンテナは太陽光発電電力伝送用アンテナであるため狭帯域でよい. そのため連続波伝送を用いること、そして小素子数のアレーに適用するため定在波励振とする. また、設計を簡単にするために等価回路が並列コンダクタンスのみで表わされる構造とする[15]. そして、宇宙空間での送電を想定するため、軸比の小さい円偏波を放射するクロススロット層を付加した構造を設計した.

2. アンテナ構造

提案するアンテナ構造を図1に示す. サブアレーとしての4×4素子スロットアレーアンテナであり、給電部、結合部、放射部の三層構造となっている.

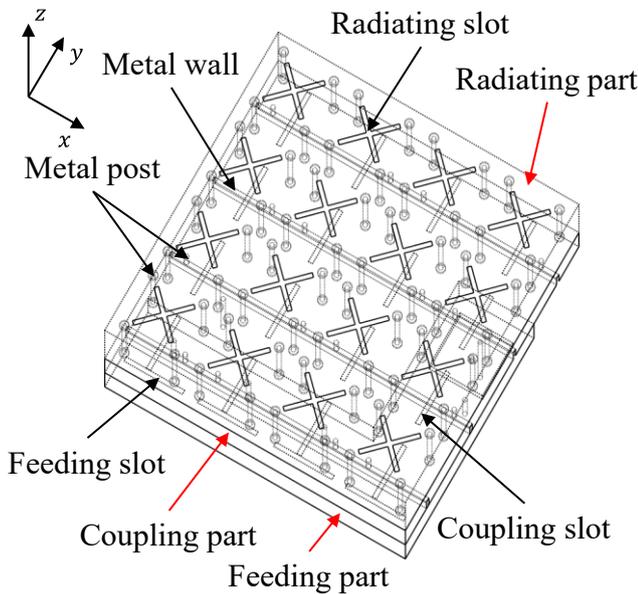


図 1. アンテナ構造

2.1. 給電部

給電部を図2に示す. 給電部の導波管には同軸線路から同軸導波管変換器を介して給電する. そして、上部の結合部に逆相給電するため、半管内波長間隔に給電スロットを配置し、スロットにはオフセットをつけ、等価サセプタンスをなくす金属ポストを配置した構造となっている. また、同軸導波管変換器の付近に反射抑圧の金属ポストを配置している.

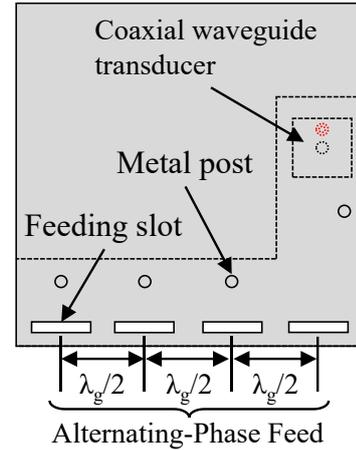


図 2. 給電部の構造

2.2. 結合部

結合部を図3に示す. 結合部では、スロットのオフセットをなくして不要な2次ローブを抑圧し、逆相給電により側壁を除去した平行平板導波路となっている. そして、スロットの近傍に金属ポストを配置した摂動により励振する. また、等価サセプタンスをなくす金属壁を底面に追加した. この金属壁の厚さは金属ポストの直径と同じである. 金属ポストは宇宙空間での熱放射にも寄与する.

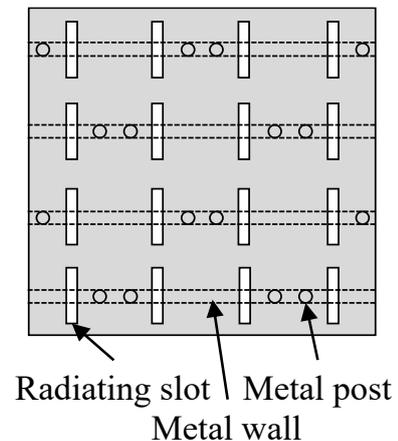


図 3. 結合部の構造

2.3. 放射部

放射部を図4に示す. 放射部では、結合スロットの上部にクロススロットを配置する. 結合スロットとクロススロットが結合し円偏波を放射する. クロススロットは長さの異なる2つのスロットを直角に配置し、共振長である約半波長の前後で等振幅・位相差90°となるスロット長として円偏波を放射する. また、放射スロット板を金属ポストで支え、結合部と同様、宇宙空間での熱放射にも寄与する. 放射部での金属ポストは製作上の観点からダンベル型としている. 放射部は周囲のサブアレーと一体構成を想定しているため、設計では放射部の側壁は導入しない.

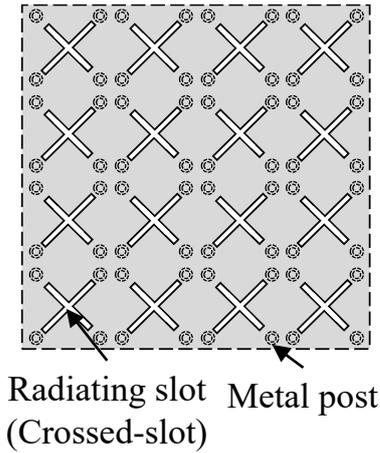


図 4. 放射部の構造

3. アンテナ設計

3.1. 放射部と結合部を含めた単一素子設計

最初に、放射部と結合部を含めた単一素子を設計する。ここでは、その単一素子の構造のパラメータを決定する。解析モデルを図 5 に示す。図 5 に結合導波管の高さ、放射部の高さ、放射部の金属ポストの形状と位置も示す。放射空間と放射部の側面は周期境界を用いている。アンテナの設計周波数は 5.8 GHz である。

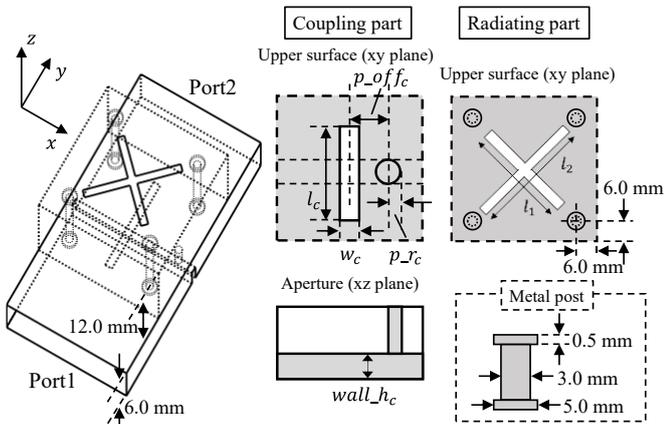


図 5. 放射部と結合部を含めた単一素子設計の解析モデル

3.1.1. クロススロットの設計

まず、クロススロットによって放射される円偏波の軸比は基本的にクロススロットの下部の構造に依存しない。図 5 の解析モデルで結合部のパラメータを固定し、放射部で長さの違うスロットを直角に配置し、クロススロットとして解析する。具体的には、クロススロット長 l_1 と l_2 を変化させて最も軸比が小さくなるスロット長を決定する。設計結果を図 6 に示す。図 6 より、 l_1 が 24.7 mm、 l_2 が 27.3 mm の時に最も小さい軸比が得られ、これらのスロット長に決定した。また、左旋円偏波とした。

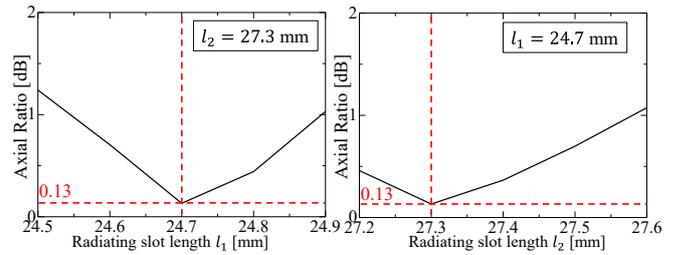


図 6. クロススロットの設計結果

3.1.2. 単一素子での整合

次に、単一素子で整合を取る。単一素子の構造と等価回路を図 7 に示す。

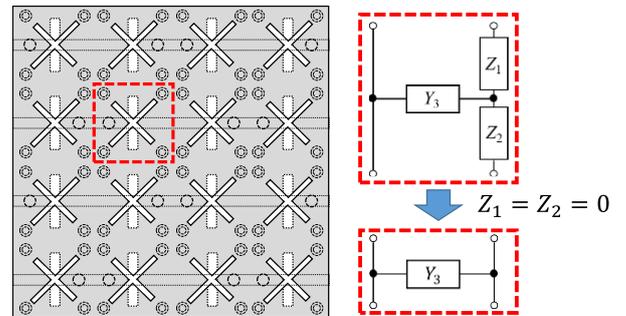


図 7. 単一素子の構造と等価回路

図 7 の赤枠で囲った単一素子は T 型回路となる。T 型回路において直列インピーダンスである Z_1 と Z_2 を 0 にすると、並列アドミタンス Y_3 のみで表せ、半波長間隔の素子の合計アドミタンスは各素子のアドミタンスの和で表せる。図 7 の一次元アレーでは等振幅励振 4 素子であるため、各素子の規格化アドミタンス Y_3 を 1/4 (0.25) にすれば、入力アドミタンスと整合がとれる。よって、設計目標を、 $Z_1 = Z_2 = 0$ 、 $Y_3 = 1/4$ (0.25) とする。そして、図 5 の解析モデルとパラメータで単一素子を解析し、S パラメータからアドミタンス (インピーダンス) を計算し、目標値になるように設計する。

設計結果のパラメータを表 1、等価回路の値と軸比を表 2 に示す。表 2 より等価回路の値が目標値に近い値で設計でき、軸比も小さい値で設計できた。

表 1. 放射部と結合部を含めた単一素子のパラメータ [mm]

l_1	24.7
l_2	27.3
l_c	26.3
w_c	2.0
p_{rc}	1.0
p_{offc}	14.8
$wall_{hc}$	2.3

表 2. 放射部+結合部の等価回路の値と軸比

	Target values	Design values
Re(Z_1)	0	0
Im(Z_1)	0	-0.04
Re(Z_2)	0	0
Im(Z_2)	0	-0.02
Re(Y_3)	0.25	0.24
Im(Y_3)	0	0.01
AR [dB]	0	0.14

3.2. 給電部を含めた一次元アレーの設計

放射部と結合部のパラメータを決定した後、給電部を含めた一次元アレーの形で設計する。解析モデルを図8に示す。図8に給電導波管の高さも示す。放射空間と放射部の側面は周期境界を用いている。

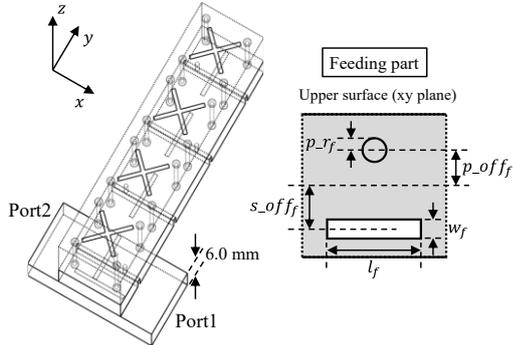


図8. 給電部を含めた一次元アレーの設計の解析モデル

3.2.1. 給電部の設計

まず、給電部のパラメータ決定する。給電部の構造と単一素子の等価回路を図9に示す。

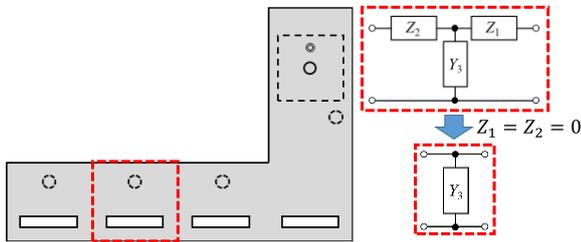


図9. 給電部の構造と単一素子の等価回路

ここでの設計は3.1.2節で記述した設計と同様である。図9のように給電部の単一素子の等価回路に関してもT型回路であり、等振幅励振4素子であるため、設計目標を $Z_1 = Z_2 = 0, Y_3 = 1/4 (0.25)$ とする。また、放射部と結合部は3.1節で設計済みのパラメータである。

設計結果のパラメータを表3、等価回路の値と軸比を表4に示す。表4より等価回路の値が目標値に近い値で設計できた。

表3. 給電部のパラメータ [mm]

l_f	27.8
w_f	2.0
s_{offf}	8.0
p_{rf}	1.0
p_{offf}	11.4

表4. 給電部の等価回路の値と軸比

	Target values	Design values
Re(Z_1)	0	0.07
Im(Z_1)	0	0.01
Re(Z_2)	0	-0.07
Im(Z_2)	0	0.03
Re(Y_3)	0.25	0.25
Im(Y_3)	0	0
AR [dB]	0	0.61

3.2.2. 軸比の調整

3.2.1節で給電部を設計した結果、軸比が若干大きくなった。そのため、放射スロットのクロススロット長を再調整して軸比を改善する。軸比が大きくなった理由は一次元アレーの結合部の両端には短絡壁が存在するためと考えられる。調整結果を図10に示す。図10より、 l_1 は変えずに、 l_2 を27.2 mmにして軸比を改善した。

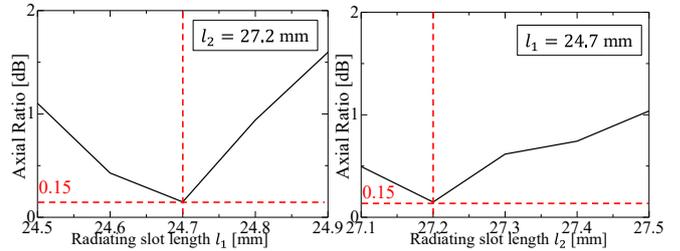


図10. クロススロット長の再調整結果

3.2.3. 結合部の調整

一次元アレーでの等振幅・同位相励振を確認する。図11に3.2.2節まで設計が終わっている時点での一次元アレーの開口分布を示す。これは、左遷偏波成分の開口分布である。図11より等振幅・同位相励振になっていない。理由は、3.2.2節の理由と同様と考えられる。

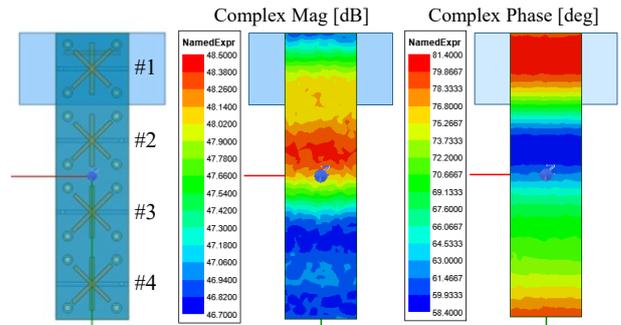


図11. 3.2.2節時点での開口分布

そこで、図11での一次元アレーの両端の単一素子である#1と#4において、結合部のパラメータの l_c と p_{offc} を調整して改善を試みた。調整した結果を図12に示す。この時、#1の l_c を26.4 mm、 p_{offc} を15.5 mm、#4の l_c を26.9 mmに調整した。図12より同振幅・同位相励振になっている。

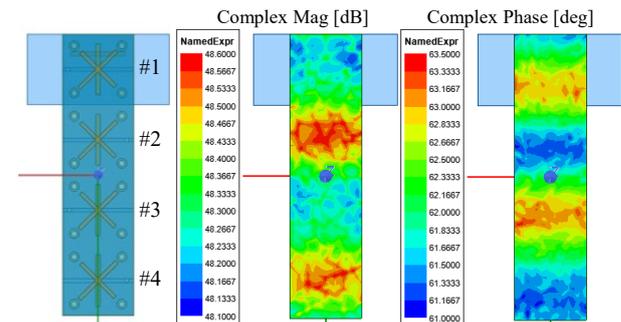


図12. 調整後の開口分布

3.2.4. 結合部の再設計

放射部と結合部を調整したので最後に給電部の再設計をする。設計結果のパラメータを表 5、等価回路の値と軸比を表 6 に示す。表 5 より等価回路の値が目標値に近い値で設計できた。また、軸比も良好な値を得た。

表 5. 給電部の再設計後のパラメータ [mm]

l_f	26.7
w_f	2.0
s_{off_f}	8.0
p_{rf}	1.0
p_{off_f}	11.8

表 6. 給電部の再設計後の等価回路の値と軸比

	Target values	Design values
$\text{Re}(Z_1)$	0	0.05
$\text{Im}(Z_1)$	0	-0.01
$\text{Re}(Z_2)$	0	-0.05
$\text{Im}(Z_2)$	0	0.03
$\text{Re}(Y_3)$	0.25	0.25
$\text{Im}(Y_3)$	0	0
AR [dB]	0	0.26

3.3. 同軸導波管変換器の設計

次に、同軸導波管変換器を設計する。アンテナの導波管の厚さが薄い構造のため、図 13 のようなマイクロストリップアンテナ構造とした。

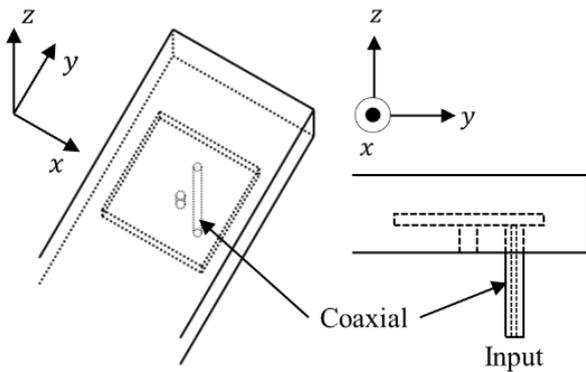


図 13. 同軸導波管変換器

設計した結果のパラメータを図 14、その時の同軸導波管変換器単体での反射特性を図 15 に示す。図 15 より良好な反射特性を得られ、図 14 のパラメータで設計できた。

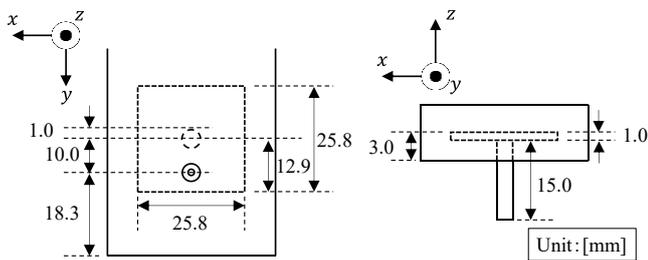


図 14. 設計結果の同軸導波管変換器のパラメータ

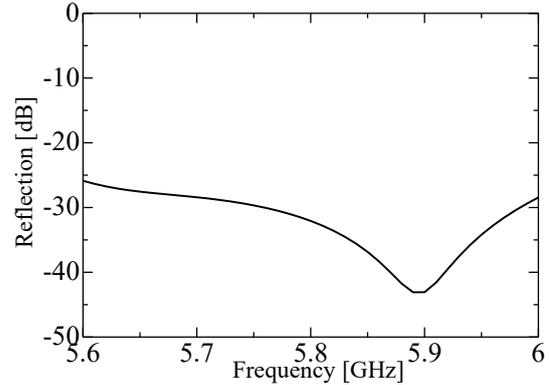


図 15. 同軸導波管変換器単体の反射特性

3.4. 給電部の構造とパラメータの調整

最後に、給電部の構造とパラメータを調整する。給電部の調整の詳細図を図 16 に示す。図 16 において、赤枠で囲った #1 の単一素子の部分は、給電導波管において L 字に曲がっているため、設計通りの構造は適用できない。そのため、この部分の金属ポストは配置していない。しかし、#1 の給電スロットの長さや位置が他のスロットと同様であると、結合部に等振幅で逆相給電できない。そのため、#1 の給電スロットのスロット長とオフセット量を調整する。

調整する前は隣のスロットである #2 との振幅差はほとんど無かったが、二つ隣の同相であるはずのスロット #3 との位相差が約 17.5° あった。#1 のスロット長 l_f を 29.3 mm、スロットのオフセット量 s_{off_f} を 4.5 mm に調整した結果、隣のスロットである #2 との振幅差が約 0.07 dB、二つ隣のスロットである #3 との位相差が約 0.1° になった。

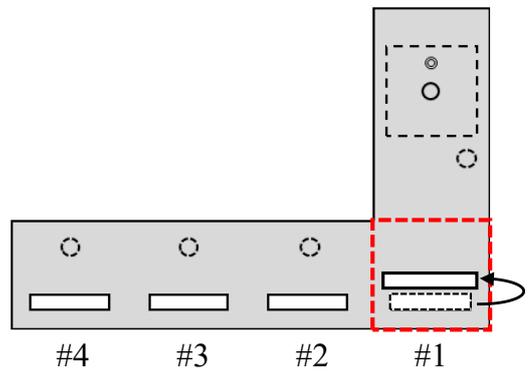


図 16. 給電部の調整の詳細図

4. 設計結果

本報告で検討するアンテナはサブアレーアンテナであり、複数個並べることを想定して設計したため、解析領域が周期境界である結果を示す。加えて、アンテナ単体を測定することを想定して解析領域が放射境界である結果も示す。

設計周波数での左旋円偏波成分の指向性を図 17 に、反射と指向性利得の周波数特性を図 18 に、軸比の周

波数特性を図 19 に示す．設計周波数は 5.8 GHz とし，アンテナの大きさは 146.2 mm×146.2 mm×24.4 mm，板厚は 0.1 mm である．図 17 より，放射スロットでオフセットをなくして正方配列とし，斜め方向($\phi=45^\circ$) の 2 次ローブを抑え，xz 面と yz 面についても良好な指向性が得られた．また，図 18 と図 19 より，解析領域が周期境界のとき，設計周波数で反射が -39.5 dB，軸比が 0.3 dB，実現利得が 19.7 dBic でアンテナ効率が 94.2 % である結果が得られた．計算で仮定した金属はアルミニウムであり，導電率は 3.8×10^7 S/m としている．また，解析領域が放射境界のとき，設計周波数で反射が -26.7 dB，軸比が 2.6 dB，実現利得が 19.1 dBic でアンテナ効率が 81.6 % である結果が得られた．

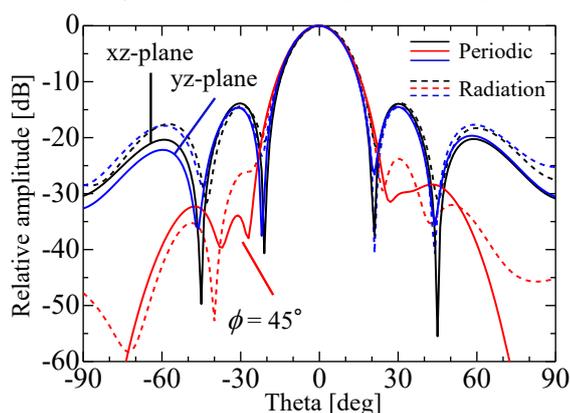


図 17. 左旋偏波成分の指向性

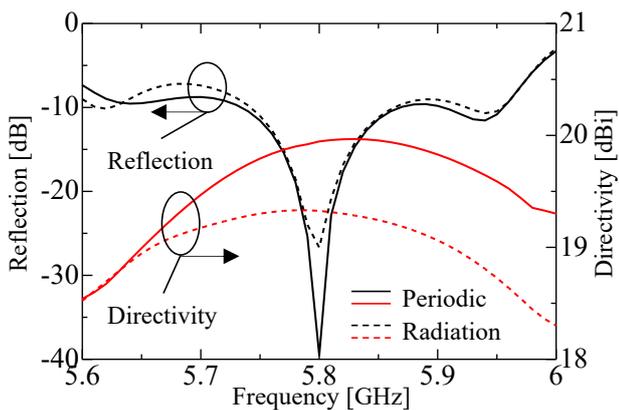


図 18. 反射と指向性利得の周波数特性

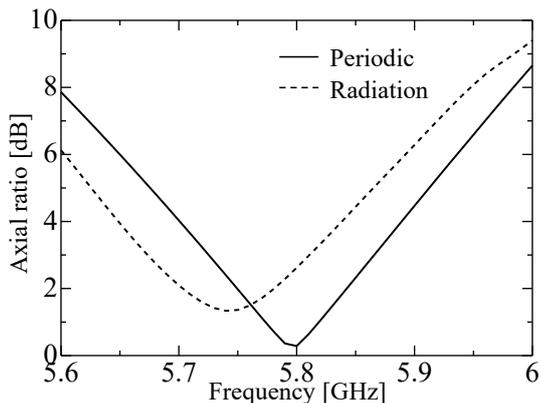


図 19. 軸比の周波数特性

5. まとめ

逆相給電平行平板導波路において，非オフセットスロットの近くに金属ポストを配置した構造にクロススロット層を付加した円偏波アンテナを設計した．また，給電部，結合部，放射部の全てで等価回路が並列コンダクタンスのみで表わされる構造となるように設計し，良好なアンテナ特性を得た．

文 献

- [1] 篠原真毅, 橋本弘藏, “マイクロ波による無線電力伝送,” J. Vac. Soc. Jpn., Vol.51, No.8, pp. 513-518, 2008.
- [2] 高野忠, “太陽発電衛星における送電アンテナ(スペルステナ)の位置づけと開発戦略,” 信学技報, WPT2015-84, 2016-3.
- [3] 篠原真毅, “宇宙太陽発電所 SPS からの無線電力伝送技術,” 電気学会誌, Vol.129, No.7, pp. 426-429, 2009.
- [4] 篠原真毅, “宇宙太陽光発電システムの開発動向,” 電気学会誌, Vol.137, No.12, pp. 841-844, 2017.
- [5] 佐々木謙治, 伊地智幸一, 町田宏隆, 鹿志村修, “宇宙太陽発電所システムの実現に向けて,” 宇宙太陽発電シンポジウム, Vol.6, pp. 22-25, 2021.
- [6] L. Kurtz and J. Yee, “Second-Order Beams of Two-Dimensional Slot Arrays,” IRE Trans. Antennas Propag., vol. 5, no. 4, pp. 356-362, Oct. 1957.
- [7] 後藤尚久, “一層構造の導波管を用いた高能率平面アンテナ,” 信学技報, AP88-39, 1988.
- [8] 後藤尚久, “導波管給電プリントアンテナ,” 信学技報, AP89-3, 1989.
- [9] K. C. Kelly, “Tab Coupled Slots for Waveguide Fed Slot Array Antennas,” US Patent., 5,289,200, Feb. 1994.
- [10] Y. Kimura, M. Takahashi, J. Hirokawa, M. Ando, and M. Haneishi, “An Alternating-Phase Fed Single-Layer Slotted Waveguide Array in 76 GHz Band and Its Sidelobe Suppression,” IEICE Trans. Electron., vol.88, no.10, pp.1952-1960, Oct. 2005.
- [11] S. Park, Y. Tsunemitsu, J. Hirokawa, and M. Ando, “Center Feed Single Layer Slotted Waveguide Array,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.54, no. 5, pp. 1474-1480, May. 2006.
- [12] K. C. Kelly, “Array Antenna with Slot Radiators Offset by Inclination to Eliminate Grating Lobes,” US Patent., 4,985,708, Jan. 1991.
- [13] K. C. Kelly, “Slot Radiator Assembly with Vane Tuning,” US Patent., 5,010,351, Apr. 1991.
- [14] 千賀敦夫, 木村雄一, “蛇行放射導波管と二層構造の直並列給電回路を用いた逆相給電導波管スロットアレーのミリ波試作特性,” 信学技報, AP2010-196, pp. 135-139, 2011-3.
- [15] 石川裕太, 戸村崇, 広川二郎, “逆相給電平行平板導波路スロットアレーアンテナの設計,” 信学総大, B-1-89, 2021-3.