

素子内側のマイクロストリップラインにより放射位相を制御する 直線偏波ラジアルライン MSA アレーの設計

木村 雄樹[†] 齊藤 作義[†] 木村 雄一[†] 猪瀬 譲^{††} 萩原 玄^{††}

[†] 埼玉大学大学院 理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{††} リンクサーキット (株) 〒351-0104 埼玉県和光市南 2-3-13 和光理研インキュベーションプラザ 401

E-mail: [†] ykimura@aplab.ees.saitama-u.ac.jp, ^{††} design@link-circuit.co.jp

あらまし 給電線路としてラジアル導波路を用い、放射素子としてマイクロストリップアンテナ(MSA)を用いる直線偏波用ラジアルラインマイクロストリップアレーアンテナ(RL-MSAA)の設計法について述べる。放射素子として L プロブにより給電される円形のリング形 MSA を用い、素子の内側に配置されたマイクロストリップラインの線路長を変化させることにより、放射素子の励振位相を約 180° 以上の範囲で制御可能となり、所望の励振位相分布を実現することが可能となる。本稿ではこの素子を 0.65 波長間隔で配列した 3 列配列一様励振 RL-MSAA を 12 GHz において設計し、その諸特性について述べる。

キーワード マイクロストリップアンテナ, 平面アレーアンテナ, ラジアル導波路, 直線偏波, 位相制御

Design of a linearly polarized radial line MSA array with a microstrip line inside the element for radiation phase control

Yuki Kimura[†], Sakuyoshi Saito[†], Yuichi Kimura[†], Yuzuru Inose^{††}, Gen Hagiwara^{††}

[†] Saitama University, 255 Shimo-ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

^{††} Link Circuit Inc., 401 Wako Riken Incubation Plaza, 2-3-13 Minami, Wako-shi, Saitama, 351-0104 Japan

E-mail: [†] ykimura@aplab.ees.saitama-u.ac.jp, ^{††} design@link-circuit.co.jp

Abstract This paper presents design of a linearly-polarized radial line microstrip array antenna (RL-MSAA). A circular microstrip antenna (C-MSA) fed by an L-probe with a microstrip line inside the C-MSA is used as a radiation element of the RL-MSAA. Radiation phase of the elements can be controlled in the range of over 180 degrees by tuning a length of the microstrip line; therefore, the desired phase distribution of the RL-MSAA can be designed. In this paper, an RL-MSAA with three concentric rows of the C-MSAs with the microstrip line arranged at a spacing of 0.65 wavelengths is designed for uniform aperture distribution and tested in 12 GHz.

Keyword Microstrip Antenna, Planar Array Antenna, Radial Waveguide, Linear Polarization, Phase Control

1. まえがき

小型、薄型、軽量等の特徴を有するマイクロストリップアンテナ (MSA: Microstrip Antenna) は通信や放送、レーダー等、幅広い用途で使用されている平面アンテナであり、現在も多面的な観点から研究が行われている^{[1],[2]}。マイクロストリップ線路に代表される開放型の給電系を用いた MSA アレーはエッチング等により給電線路と放射素子を一体として形成できるため安価に大量生産が可能であるが、素子数の多い場合は給電損失の増大による性能劣化が大きな問題となる。そこで、低損失な伝送線路であるラジアル導波路を給電系に用いたラジアルラインマイクロストリップアレーアンテナ (RL-MSAA: Radial Line Microstrip Array Antenna) は高効率な平面アンテナとして提案され、種々の研究がなされている^{[3]-[5]}。

図 1 に RL-MSAA の基本構成図を示す。RL-MSAA は終端が短絡されたラジアル導波路上に誘電体基板を配置し、放射素子となる MSA を配列した構造である。ラジアル導波路への給電は導波路の中央に配置された給電プローブにより行われ、放射素子である MSA は導波路内を伝搬する外向きの円筒波により、励振プローブを介して励振される。各素子の結合量はこの励振プローブの挿入長により制御され、所望の励振振幅分布が設計される。励振位相分布については、RL-MSAA を円偏波アンテナとして動作させる場合、配列される円偏波 MSA の素子配置を回転させることにより所望の位相分布の設計が可能である。しかしながら、RL-MSAA を直線偏波アンテナとして用いる場合、円偏波の場合のように素子を回転させることができないため、励振位相を制御するには放射素子の径方向の位

置を調整するしかない。このため、所望の位相の分布が得られないことがある。

そこで、直線偏波用 RL-MSAA の放射素子として、スタブを有する無給電素子を上部にスタックした円形 MSA を用い、そのスタブ長を変化させることにより励振位相を変化させる方法^[6]や無給電素子をスタックした円形 MSA の上下の素子半径を変化させて励振位相を制御する方法^{[7], [8]}が検討されているが、これらの方法では誘電体基板が二層必要となる。また、一層構造の誘電体基板を用いる方法として、円形 MSA の素子内部に L 字形の給電プローブ (L プローブ) を配置した素子を用い、その素子の半径を変化させることにより放射位相を制御する方法^{[9], [10]}や広帯域特性を示す U-slot 装荷 MSA^{[11], [12]}を用いて放射位相を制御する方法^{[13], [14]}が検討されているが、比較的厚さの大きい誘電体基板を用いる必要がある。この他、放射素子の励振位相を変化させる方法として、スタックされた MSA 素子と励振プローブの間にマイクロストリップ線路を挿入し、その線路長を変化させる方法も提案されているが多層構造となる^[15]。

以上のような背景から、本論文では厚さの大きい誘電体基板を用いることなく、かつ、放射位相を幅広く制御できる一層構造の放射素子として、素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA を用いる直線偏波 RL-MSAA の構成法について検討を加えた。すなわち、①円形 MSA の内側に装荷されたマイクロストリップラインの線路長を変化させることにより、リターンロス特性や利得の劣化を招くことなく励振位相を制御する手法を提案した^[16]。この素子は厚さの小さい一層の誘電体基板上に構成できるため、従来の複数層の誘電体基板を用いる方法や厚さの大きい誘電体基板を用いる方法と比較して有利となる。②上記の素子を用いて、素子間隔 $0.65\lambda_0$ とする 3 列配列の直線偏波 RL-MSAA を設計した。設計周波数は 12.0 GHz とし、各列の素子寸法及び励振プローブの長さは一様励振分布となるように決定された。設計された直線偏波 RL-MSAA を試作し、諸特性を実験により検討を加え、良好な特性が得られることを示した^[17]。

2. 素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA の基本設計

はじめに、アレーの構成要素となる MSA 素子の解析を行う。図 2 に本研究で提案される素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA 素子の構造図を示す。これは円形 MSA のパッチ導体の内側をくり抜いてリング形の素子形状とし、その内側に放射位相を調整するためのマイクロストリップラインを装荷した構造である。すなわち、本アンテナ素子は素子

中央の給電プローブから給電され、素子内側のマイクロストリップラインを介してリング形の円形 MSA が励振される。このため、マイクロストリップラインの線路長を変化させることにより、MSA 素子からの放射位相を制御することができる。また、マイクロストリップラインとリング形の円形 MSA 素子を直接接続すると整合を得ることが困難であるため、MSA 素子とマイクロストリップラインの間にギャップを形成し、L プローブ給電同様な励振プローブ構造としている。

無給電素子をスタックした円形 MSA を用いる方法^{[7], [8]}や U-slot 装荷 MSA を用いる方法^{[13], [14]}では素子半径を変化させて放射位相を制御するため、あらかじめ広帯域な特性が得られるように誘電体基板の厚さを大きくとる必要がある。また、これらの方法では素子半径によっては素子アンテナの利得が低下する問題もあった。これに対して、本アンテナ素子は素子内側に配置された円弧状のマイクロストリップラインの線路長によって容易に放射位相を制御することが可能であり、一層の厚さの小さい誘電体基板で構成できる点を特長としている。

そこで、素子内側に装荷されたマイクロストリップラインの線路長により放射位相を制御する MSA 素子の諸特性を明らかにするため、解析により検討を加えた。なお、設計周波数は 12.0 GHz とし、解析には電磁界シミュレータ IE3D を使用し、供試基板としてテフロンガラスファイバー基板 (比誘電率 2.6、 $\tan\delta = 1.8 \times 10^{-3}$ 、厚さ 0.6 mm) を用いた。また、地導体の大きさは無限大とした。

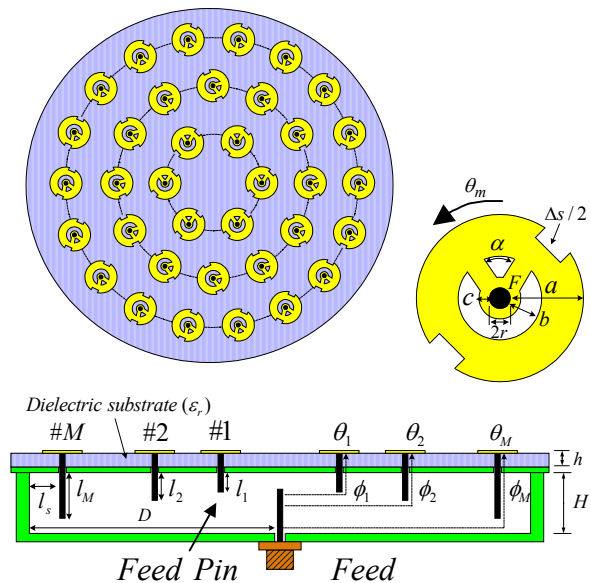
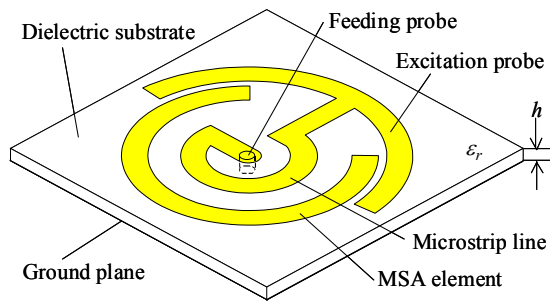
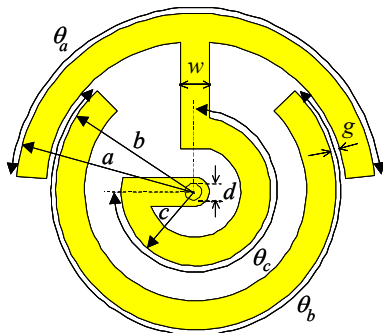


図 1 ラジアルライン MSA アレーの基本構成 (円偏波用)



(a) Perspective view



(b) Radiation element

$a = 5.0, b = 3.9, c = 2.0, d = 0.55, g = 0.3,$
 $w = 0.8, h = 0.6, \text{unit: [mm]}, \theta_a = 170, \theta_b = 272,$
 $\theta_c = 270, \text{unit: [deg.], } \epsilon_r = 2.6$

図2 素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA の基本構成 ($\theta_c = 270^\circ$ の例)

図3に素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA の反射特性のシミュレーション結果を示す。ここで、給電点の特性インピーダンスは 50Ω とし、円弧状のマイクロストリップラインの径角 θ_c を 0° 、 90° 、 180° 、 270° 、 315° とした。図2は $\theta_c = 270^\circ$ の例である。他のパラメータは設計周波数である 12.0 GHz で良好な反射特性が得られるように、図2に示される値に設定した。なお、励振プローブの径角 θ_a は各々 θ_c に対して微調整された値に設定した。図3に示されるように、円弧状のマイクロストリップラインの径角 θ_c を変化させても反射特性に顕著な変化はなく、いずれの場合も設計周波数の 12.0 GHz 近傍で良好な反射特性を示すことが確認された。

図4に素子内側のマイクロストリップラインの線路長を変化させた場合の供試円形 MSA の放射位相の変化を示す。ここで、周波数は 12.0 GHz とし、素子内側の円弧状のマイクロストリップラインの径角 θ_c を 0° から 315° の範囲で変化させた。なお、放射位相とは供試アンテナから放射される遠方放射界の主偏波成分

の位相変化を示したものである。図に示されるように、径角 θ_c を変化させると円弧状のマイクロストリップラインの線路長が変化するため、供試円形 MSA の放射位相はほぼ直線的に変化し、放射位相の制御幅は 180° 以上となることが確認された。さらに、供試アンテナ素子を 180° 回転すれば同一の偏波面で逆位相となることから、供試円形 MSA は放射位相は 360° 制御可能であることが明らかにされた。

また、図4に素子内側のマイクロストリップラインの線路長を変化させた場合の供試円形 MSA の利得のシミュレーション結果を示した。同様に、周波数は 12.0 GHz とし、素子内側の円弧状のマイクロストリップラインの径角 θ_c を 0° から 315° の範囲で変化させた。図に示されるように、供試円形 MSA の利得は $5.5 \sim 6.0 \text{ dBi}$ 程度の値を示し、円弧状のマイクロストリップラインの線路長を変化させてもほぼ一定の利得が得られることが確認された。

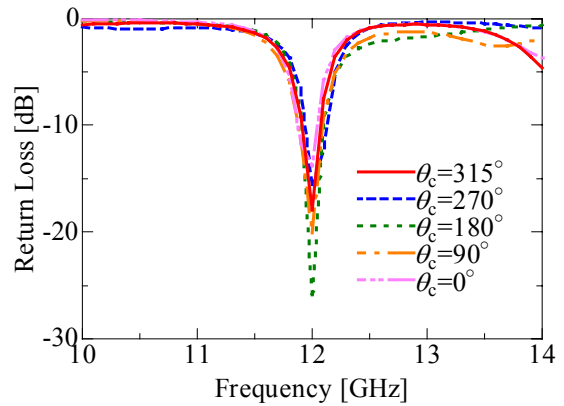


図3 素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA の反射特性

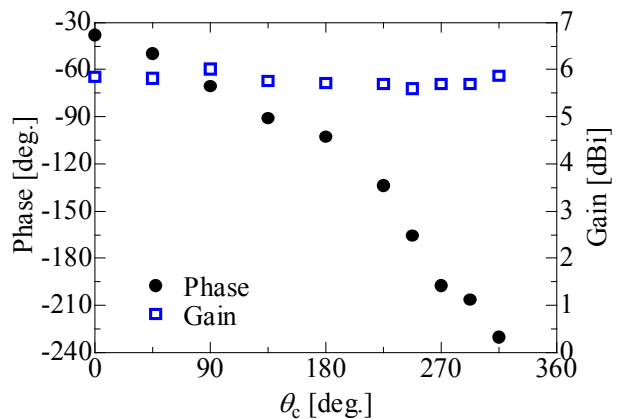
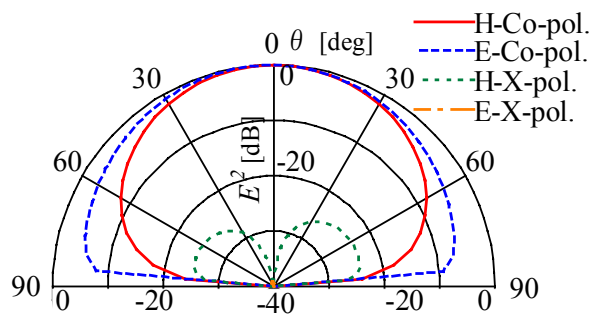
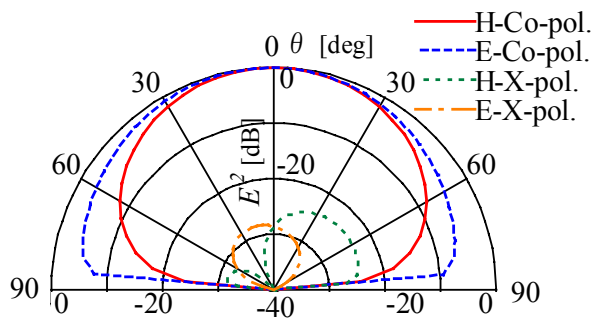


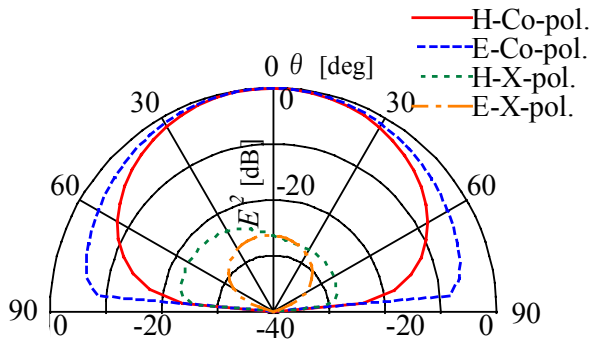
図4 素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA の放射位相と利得の変化 ($f = 12.0 \text{ GHz}$)



(a) $\theta_c = 0^\circ$



(b) $\theta_c = 180^\circ$



(c) $\theta_c = 315^\circ$

図5 素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形MSAの放射パターンの一例 ($f = 12.0 \text{ GHz}$)

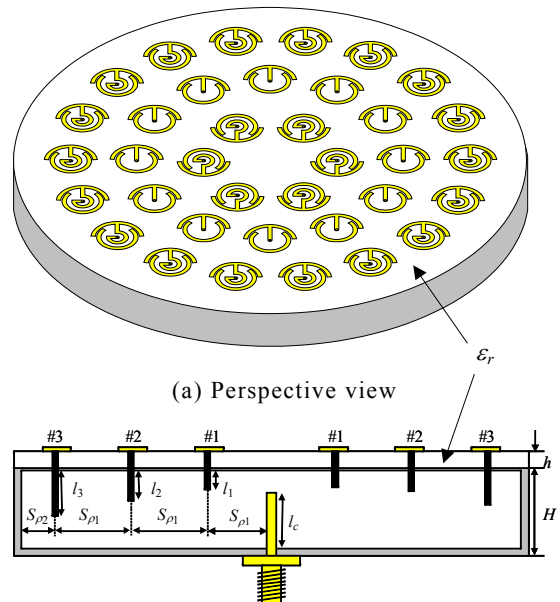
図5に設計周波数 $f = 12.0 \text{ GHz}$ において、素子内側のマイクロストリップラインの線路長を変化させた場合の供試円形MSAの放射パターンの解析結果を示す。ここでは一例として、円弧状のマイクロストリップラインの径角 θ_c を (a) $\theta_c = 0^\circ$ 、(b) $\theta_c = 180^\circ$ 、(c) $\theta_c = 315^\circ$ とし、E面とH面の主偏波及び交差偏波のパターンを図示した。いずれの場合についても、主偏波については良好な単向性のパターンが得られ、交差偏波は十分小さい値を示した。素子内部のマイクロストリップラインの線路長を変化させて放射位相を制御した場

合においても、供試円形MSAは主偏波の放射パターンの形状はほぼ同一となることが確認された。

以上の解析結果から、素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形MSAは、円弧状のマイクロストリップラインの径角 θ_c を変化させてその線路長を変化させることにより、放射位相を 180° 以上の範囲で制御可能であり、反射特性、利得、放射パターンは安定した特性を示すことが明らかにされた。

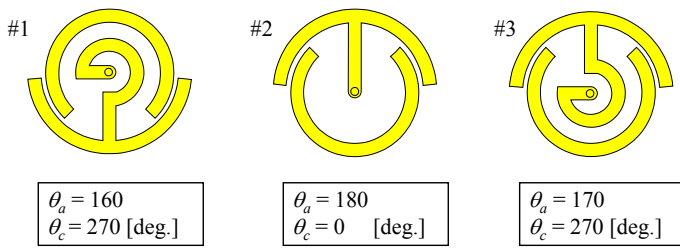
3. 素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形MSAを用いたRL-MSAAの試作特性

以上の結果を踏まえ、素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形MSAを用いて、一様励振となる3列配列直線偏波RL-MSAAを設計し、実験により設計法の妥当性を検証した。設計周波数は 12.0 GHz とし、各列の素子間隔は 0.65 波長、最外周列の素子位置とラジアル導波路の終端短絡面との距離は 0.25 波長とした。すべての放射素子を素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形MSAとした。同一列にある放射素子の寸法及び励振プローブ長は同一とし、電磁界シミュレータHFSSを用いて各素子の放射振幅と位相が一樣になるように各列の素子寸法と励振プローブ長を決定した。図6に設計されたRL-MSAAの構造及びパラメータを示す。また、図7に試作されたRL-MSAAの写真を示す。



$h = 0.6,$	$H = 7.5,$	$l_c = 5.5,$
$S_{p1} = 0.65\lambda_0,$	$S_{p2} = 0.25\lambda_0,$	$\lambda_0 = 25.0,$
$l_1 = 4.7,$	$l_2 = 5.7,$	$l_3 = 6.1,$
unit: [mm], $\epsilon_r = 2.6$		

(b) Cross-sectional view



(c) Dimensions of the radiation elements

図 6 素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA を素子とする 3 列配列直線偏波 RL-MSAA の構成

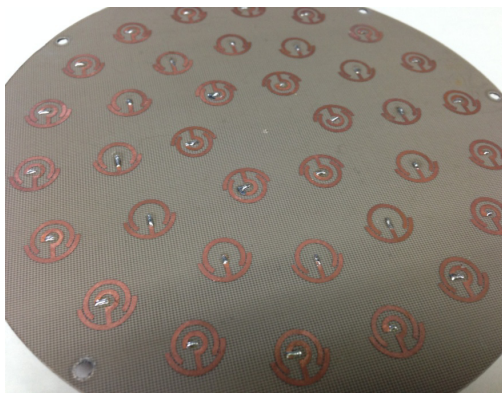
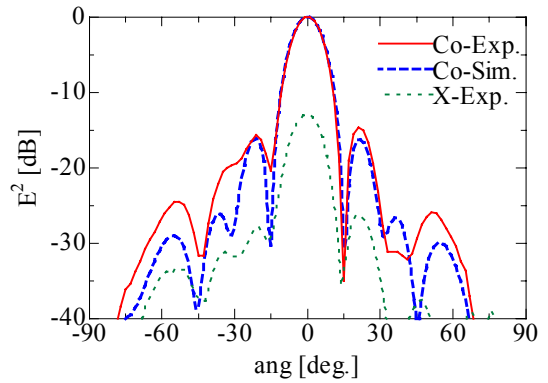
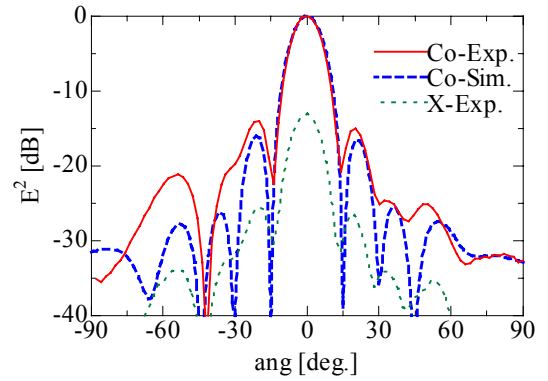


図 7 試作された RL-MSAA

図 8 に試作された RL-MSAA の設計周波数 12.0 GHz における放射パターンを示す。また、図 9 及び図 10 に試作された RL-MSAA の反射特性と利得特性を各々示す。放射パターンについて、サイドローブレベルは実測値と電磁界シミュレータ HFSS によって得られたシミュレーション結果に多少の差は見られるものの傾向はよく捉えており、主ビームは H 面、E 面共によく一致している。なお、ボアサイト方向の交差偏波レベルの実測値は -13 dB 程度であった。反射特性に関しては、実測値はシミュレーション結果の傾向をよく捉えており、設計周波数である 12.0 GHz 近傍で -15 dB 程度の良好な結果が得られた。設計周波数における利得の実測値は 22.0 dBi であり、アンテナ効率は 83% であった。以上のことから、供試 RL-MSAA は良好な特性が得られていることが確認された。



(a) H-pl.



(b) E-pl.

図 8 供試 RL-MSAA の放射パターンの一例 ($f = 12.0$ GHz)

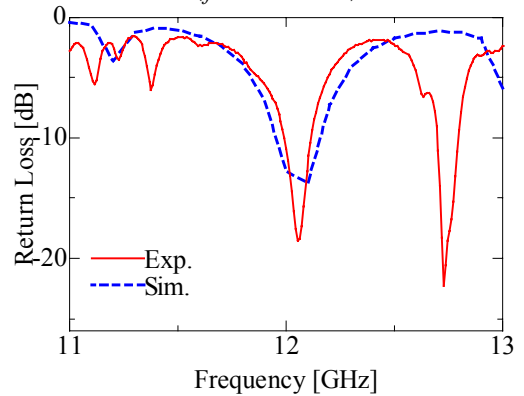


図 9 供試 RL-MSAA の反射特性

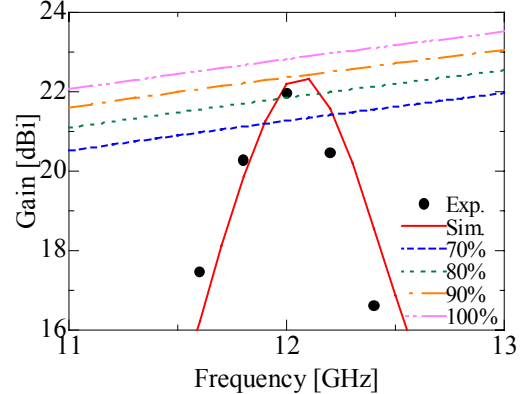


図 10 供試 RL-MSAA の利得特性

4. むすび

本論文では、素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA を放射素子とする直線偏波 RL-MSAA の設計法について検討した。素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA は一層の厚さの小さい誘電体基板上に構成可能であり、素子内側に装荷された円弧状のマイクロストリップラインの線路長を変化させることにより放射位相を 180° 以上の広い範囲で制御できること、及び、放射位相を変化させた場合も反射特性、利得、放射パターンは安定した特性を示すことをシミュレーションにより明らかにした。また、この素子内側にマイクロストリップラインを装荷した円形 MSA を用いて素子間隔を 0.65 波長とする 3 列配列直線偏波 RL-MSAA を試作し、良好な特性が得られることを実験により示した。以上のことから、この種のアンテナ系における設計基礎資料を得た。

文 献

- [1] 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫, 小形・平面アンテナ, 電子情報通信学会, 1996.
- [2] 羽石 操, “平面アンテナの特色及びその応用技術と展望,” 信学論(C), vol. J89-C, no. 5, pp. 198-209, May 2006.
- [3] 柴田 治, 斉藤作義, 羽石 操, “ラジアルラインマイクロストリップアレーアンテナの放射特性,” 信学論(B), vol. J76-B2, no. 1, pp. 20-27, Jan. 1993.
- [4] 渡辺一宏, 羽石 操, 木村雄一, 中野和男, “リングマイクロストリップアンテナを素子とするラジアルラインアレーアンテナ,” 信学論(B), vol. J86-B, no. 12, pp. 2580-2584, Dec. 2003.
- [5] S. Sanuki, S. Saito, Y. Kimura, and M. Haneishi, “Consideration of a radial line microstrip array antenna,” *Proc. 2004 Int. Symp. Antennas Propagat.*, vol. 2, pp. 1241-1244, Aug. 2004.
- [6] 菅原佑太, 小川大輔, 木村雄一, 羽石 操, 斉藤作義, “スタブ付き無給電素子をスタック構造とした円形マイクロストリップアンテナを素子とする直線偏波ラジアルラインアレーアンテナの放射特性,” 信学論(B), vol. J95-B, no. 9, pp. 1177-1180, Sep. 2012.
- [7] 木村雄樹, 斉藤作義, 木村雄一, “二層構造の放射素子の半径を変化させた直線偏波ラジアルライン MSA アレーアンテナの設計法,” 信学技報, vol. 112, no. 79, AP2012-27, pp. 19-24, Jun. 2012.
- [8] Y. Kimura, S. Saito, and Y. Kimura, “Radiation properties of a linearly polarized radial line MSA array with stacked circular patch elements,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E96-B, no. 10, pp. 2440-2447, Oct. 2013.
- [9] 木村・斉藤・木村, “Lプローブを装荷した円形 MSA を素子とする直線偏波ラジアルライン MSA アレーアンテナの構成法,” 信学ソ大(通信), B-1-110, Sep. 2012.
- [10] 木村・斉藤・木村, “Lプローブにより給電される円形 MSA を素子とする直線偏波ラジアルライン MSA アレーアンテナの設計法,” 信学技報, vol. 113, no. 34 AP2013-27, pp. 65-70, May 2013.
- [11] K. M. Luk, X. Guo, K. F. Lee, and Y. L. Chow, “L-Probe Proximity Fed U-slot Patch Antenna,” *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 19, pp. 1806-1807, Sep. 1998.
- [12] K.-F. Tong, K.-M. Luk, K.-F. Lee, and R.-Q. Lee, “A broadband U-slot rectangular patch antenna on a microwave substrate,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 48, no. 6, pp. 954-960, Jun. 2000.
- [13] 木村・斉藤・木村, “Uスロット装荷円形 MSA を用いた直線偏波ラジアルライン MSA アレーアンテナの設計法,” 信学技報, vol. 113, no. 300, AP2013-101, pp. 7-12, Nov. 2013.
- [14] Y. Kimura, S. Saito, and Y. Kimura, “Radiation properties of a linearly polarized radial line microstrip antenna array with U-slots,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E97-B, no. 10, pp. 2059-2065, Oct. 2014.
- [15] J. L. Masa-Campos and M. Sierra-Pérez, “Linearly Polarized radial line patch antenna with internal rectangular coupling patches,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 59, no. 8, pp. 3049-3050, Aug. 2011.
- [16] 木村・斉藤・木村, “マイクロストリップラインにより放射位相を制御する直線偏波ラジアルライン MSA アレーアンテナの構成法,” 信学ソ大(通信), B-1-94, Sep. 2013.
- [17] 木村・斉藤・木村, “マイクロストリップラインにより放射位相を制御する直線偏波ラジアルライン MSA アレーアンテナの試作特性,” 信学総大, B-1-85, Mar. 2014.