

## 2層パッチ素子を用いた液晶リフレクタレーの設計

竹村 大幹<sup>†a)</sup> 佐藤 弘康<sup>‡</sup> 村上 耀一<sup>‡</sup> 柴田 陽生<sup>‡</sup>

石鍋 隆宏<sup>‡</sup> 藤掛 英夫<sup>‡</sup> 陳 強<sup>‡</sup>

† 東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 〒980-08579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05-  
E-mail: a) takemura-h@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** リフレクタレーの誘電体基板材として液晶を利用し、液晶にバイアス電圧を印加して比誘電率を変化させ、散乱波のビーム方向を制御可能な液晶リフレクタレーが報告されている。しかしながら、バイアス電圧の印可による液晶の比誘電率の変化は2から3程度であるため十分な位相変化が得られない課題がある。そこで、本報告では限られた比誘電率の変化において、周期構造の単位セルに対する反射係数の位相変化を増加させることを目的として、2層パッチ素子を用いた液晶リフレクタレーを提案し、液晶リフレクタレーの散乱特性に対する基礎検討を行った結果を述べる。

**キーワード** リフレクタレー、2層構造、液晶、無限周期構造解析

## Design of Liquid Crystal Reflectarray Using Double-Layer Patch Elements

Hiroki Takemura<sup>†a)</sup> Hiroyasu SATO<sup>‡</sup> Youichi MURAKAMI<sup>‡</sup> Yousei SHIBATA<sup>‡</sup>

Takahiro ISHINABE<sup>‡</sup> Hideo FUJIKAKE<sup>‡</sup> Qiang CHEN<sup>‡</sup>

† Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-5 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Miyagi, 980-8579 Japan  
E-mail: a) takemura-h@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Recently, the liquid crystal reflectarray (LC-RA) using liquid crystal as a dielectric substrate of a reflectarray is expected for beam steerable antennas. Dielectric constant of the liquid crystal changes by applying a bias voltage, and the scattering beam direction can be controlled. However, change of dielectric constant of the liquid crystal is limited in a range from 2 to 3, and it is not enough to change the phase of reflection coefficient up to  $2\pi$  in the unit-cell analysis of periodic structure. In this paper, the liquid crystal reflectarray using double-layer patch elements is proposed to increase the phase-range of reflection coefficient and fundamental study of LC-RA is performed.

**Keywords** Reflectarray, Double layer structure, Liquid Crystal, Infinite periodic structure analysis

### 1. まえがき

近年、通信環境の変化に応じて電波の放射する方向を電氣的に制御可能なアンテナが求められている。具体的には第5世代高速通信(5G)等の例が挙げられる。これまでの基地局アンテナでは、800 MHz帯の比較的伝搬損失の小さい電波を広角に放射させているが、28 GHz帯を利用する5G通信では伝搬損失が大きい鋭いビームの高利得アンテナを利用し、通信端末の移動に合わせてビーム方向を制御する必要がある。

指向性のビーム方向を連続的に制御するためには、アレーの各素子に移相器を設けるフェーズドア

レーアンテナ[1][2]が必要となるが、低コストの移相器ではSPDTスイッチを用いた数ビットの位相器が利用されており、離散的な位相変化のため離散的なビーム制御となる。一方、PINダイオードを用いた1ビットリフレクタレーでは[3][4]、ビーム方向は連続的に変化できるが、1ビットの反射位相変化であるため位相補償が不完全となり開口効率が低下する欠点がある。

連続的な位相変化を得る方法のひとつとして、リフレクタレーの誘電体基板材に液晶を利用する液晶リフレクタレーの研究が報告されている[5]。液晶分子はラグビーボールの形状をしており、印加

電圧に応じて分子の分極が変化し、比誘電率に異方向性が現れる特徴を持っている。比誘電率を制御してリフレクタレーアンテナ各素子における反射係数の位相を変化させて散乱波のビーム方向を連続的に制御することが可能である。

リフレクタレーで散乱される電磁波の位相が所望の方向で同相となるように位相を補償する場合、反射係数の位相変化量が  $360^\circ$  以上あることが必要である。しかしながら、液晶への印加電圧による比誘電率の変化は 2 から 3 程度であり、大きな位相変化を得ることは困難である。周期構造の単位セルに対する反射係数の位相変化量を大きくする方法として、パッチアンテナアレーを 2 層化する方法が報告されている [6][7]。本報告では、2 層パッチ構造を用いた液晶リフレクタレーの設計を行い、限られた比誘電率変化に対して反射係数の位相変化幅を大きくするための方法について検討した結果を述べる。

## 2. 2 層パッチ素子液晶リフレクタレーの構造

2 層パッチ素子液晶リフレクタレーの無限周期構造の単位セルの解析モデルを図 1 に示す。設計周波数を 12 GHz とする。単位セルの  $xy$  方向のピッチはいずれも  $p$  の正方形周期構造とした。ここで  $p$  は 12 GHz における自由空間波長 25 mm の半波長 12.5 mm よりわずかに長い 14 mm とする。また単位セルの下層の正方形パッチの一边の長さは  $l_2$  とし、上層の正方形パッチの一边の長さは係数  $a$  を用いて  $l_1 = a \cdot l_2$  とした。誘電体の厚みは  $h_1, h_2$ 、比誘電率を  $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$  とした。

リフレクタレーの単位セルの散乱位相の解析には無限周期構造解析が用いられる。本報告では無限周期構造解析には有限要素法 (HFSS) を用いた。無限周期構造解析の特徴の 1 つとして、各アレー素子の素子間結合が含まれることが挙げられる。この特徴はリフレクタレーのような素子間結合が顕著な場合に有効な手法である。境界条件を適切に設定することで素子間結合を含んだ形で単位セルの散乱特性を解析することを可能とする。

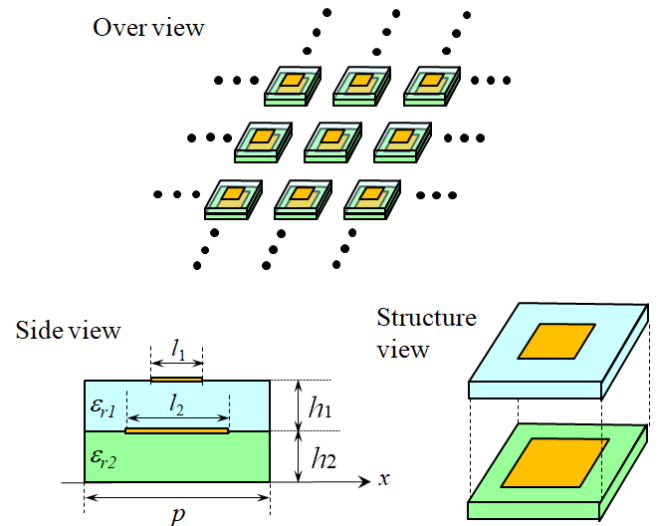


図 1 2 層パッチ素子液晶リフレクタレーの構造

## 3. 解析的検討

$l_2$  を変化させた時の反射係数の位相変化について、1 層構造と 2 層構造の無限周期構造解析を行った結果を図 2 に示す。  $a=0.7$ 、基板の厚み  $h_1=h_2=3$  mm、比誘電率  $\epsilon_{r1}(=\epsilon_{r2})=1, 2.9$  の 2 通りで行った。図 2 より 2 つの比誘電率でそれぞれ 2 層化によって反射係数の位相変化幅の増加が確認された。また、基板の比誘電率の増加に伴い波長の短縮が起きるため、構造変化に対する反射係数の位相変化率が大きくなるのが分かる。

次に  $l_2=6$  mm で固定し、基板の比誘電率を変化させた時の反射係数の位相変化を 1 層構造と 2 層構造で無限周期構造解析を行った結果を図 3 に示す。  $a=0.7$ 、基板の厚み基板の厚み  $h_1=h_2=3$  mm とした。図 3 より比誘電率 2.6 から 3.2 の変化で反射係数の位相変化量は  $120^\circ$  程度で構造変化に比べて変化幅が小さくなった。

比誘電率の変化による反射係数の位相変化幅が、構造変化によるそれと比べて小さくなる理由は、実効波長による規格化によって説明がつく。図 1 に示したモデルにおいて、上層の実効誘電率は基板 1 と空気の比誘電率の平均、下層の実効比誘電率は基板 1 と基板 2 の比誘電率の平均で近似をすることが可能であるため以下の式で表される。

$$\epsilon_{g1} = \frac{\epsilon_{r1} + 1}{2} \quad (1)$$

$$\epsilon_{g2} = \frac{\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}}{2} \quad (2)$$

従って上層と下層それぞれの実行波長  $\lambda_{g1}$  と  $\lambda_{g2}$  は以下の式で表される。

$$\lambda_{g1} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{g1}}} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_{r1} + 1}} \lambda_0 \quad (3)$$

$$\lambda_{g2} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{g2}}} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}}} \lambda_0 \quad (4)$$

$\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 2.6$  の実効波長  $\lambda_{g2}$  は式(4)より,  $\lambda_{g2} = 15.5$  mm,  $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 3.2$  の実効波長  $\lambda_{g2}$  は式(4)より,  $\lambda_{g2} = 14$  mm と計算される. 図 2 より  $l_2 = 6$  mm 付近で構造変化 1.5 mm の反射係数の位相変化幅は  $127^\circ$  であり, 比誘電率変化による  $120^\circ$  の位相変化幅とほぼ一致する. 以上より液晶リフレクタレーの設計法として, まず無限周期構造解析より反射係数の位相変化の構造特性を求める. 解析によって得た位相のカーブが最も急峻となる素子長と, その素子長での位相変化量から必要な実効波長の変化幅が求まり, そこから必要な比誘電率の変化を計算によって求めることが可能である.

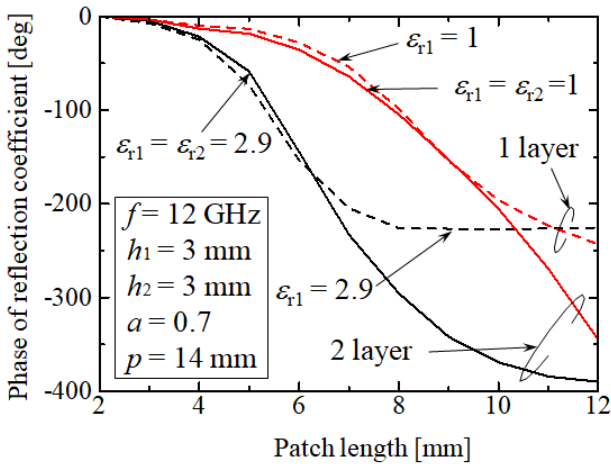


図 2 反射係数の位相変化の構造特性

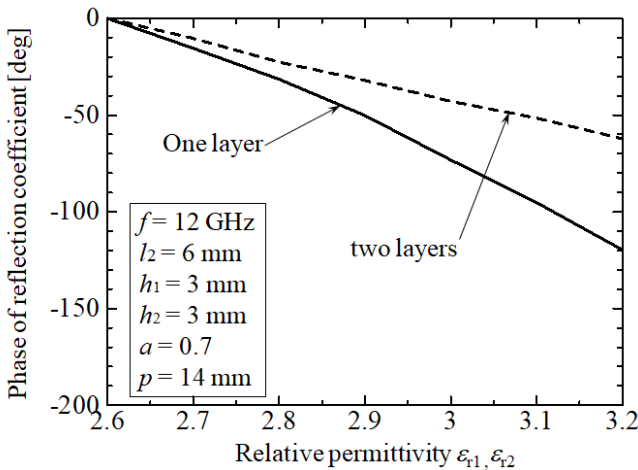


図 3 反射係数の位相変化の比誘電率特性

#### 4. まとめ

2 層パッチ素子を用いた液晶リフレクタレーに関して無限周期構造解析を用いて単位セルの反射係数の位相変化の解析を行った. ビーム方向の指向性を電子的に制御可能な液晶リフレクタレーを 2 層化することで反射係数の位相変化幅が改善されることを示した.

#### 文 献

- [1] M. Smith and Y. Guo, "A comparison of methods for randomizing phase quantization errors in phased arrays", IEEE Trans. Antenna Propagation, Vol.31, No.6, pp.821828, Nov. 1983
- [2] W. Jiang, Y. Guo, T. Liu, W. Shen, and W. Cao, "Comparison of random phasing methods for reducing beam pointing errors in phased array", IEEE Trans. Antenna Propagation, Vol.51, No.4, pp.782787, April 2003
- [3] E. Carrasc, M. Barba, and José A. Encinar, "X-Band Reflectarray Antenna With Switching-Beam Using PIN Diodes and Gathered Elements", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol.60, N.12, Dec 2012
- [4] H. Zhang, X. Chen, Z. Wang, Y. Ge, and J. Pu, "A 1-Bit Electronically Reconfigurable Reflectarray Antenna in X Band", Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2918231
- [5] S. Bildik, S. Dieter, W. Menzel et al., "Reconfigurable Folded Reflectarray Antenna Based Upon Liquid Crystal Technology", IEEE Transaction on Antenna and Propagation, Vol.63, No.1, Jan 201
- [6] Jose A Encinar, "Design Of Two-layer Printed Reflectarrays Using Patches Of Variable Size", IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol.49, No.10, Oct 2009
- [7] 塚田隆平, 佐藤弘康, 陳強, "放射散乱共用リフレクタレーアンテナの設計の基礎検討", 伝送工学研究会資料, Vol. 2016, No. 581-2, Jun 2016.