

# 有孔誘電体スパーサーを用いた誘電体スラブ装荷漏れ波アンテナ

加地 拓弥<sup>†</sup> 佐藤 弘康<sup>†</sup> 陳 強<sup>†</sup> 長江 眞平<sup>‡</sup> 熊谷 翔<sup>‡</sup> 加賀谷 修<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

<sup>‡</sup> AGC 株式会社

E-mail: <sup>†</sup> takuya.kaji.t2@dc.tohoku.ac.jp, hiroyasu.sato.b1@tohoku.ac.jp, qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

**あらまし** 本報告では、有孔誘電体スパーサーを用いた誘電体スラブ装荷漏れ波アンテナを提案し、検討を行った結果について述べる。提案するアンテナは有孔誘電体スパーサーを半分のみ充填し、非充填領域で準カットオフ領域を形成する非対称構造により、広角方向にも指向可能な単方向チルトビームの生成を図る。また、有孔誘電体スパーサーの孔径変化により、均一なアンテナ高さのまま異なるチルト角のビーム生成が可能となる。

**キーワード** 漏れ波アンテナ, 有孔誘電体, ガラス

## A Leaky Wave Antenna with Dielectric Slab on Perforated Dielectric Spacer

Takuya KAJI<sup>†</sup> Hiroyasu SATO<sup>†</sup> Qiang CHEN<sup>†</sup>

Simpei NAGAE<sup>‡</sup> Akira KUMAGAI<sup>‡</sup> and Osamu KAGAYA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579  
Japan

<sup>‡</sup> AGC Inc.

E-mail: <sup>†</sup> takuya.kaji.t2@dc.tohoku.ac.jp, hiroyasu.sato.b1@tohoku.ac.jp, qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

**Abstract** In this report, we propose and investigate a leaky wave antenna with dielectric slab on perforated dielectric spacer. The proposed antenna is an asymmetric structure that is only half-filled with perforated dielectric spacers and forms a quasi-cutoff region in the unfilled region. In this way, we aim to generate a unidirectional tilted beam that can also be directed in wide-angle directions. In addition, by changing the hole diameter of the perforated dielectric spacer, it is possible to generate beams with different tilt angles while maintaining a uniform antenna height.

**Keywords** Leaky wave antenna (LWA), Perforated dielectric, Glass

### 1. まえがき

次世代移動体通信では、ミリ波帯やテラヘルツ帯などの高周波帯が利用される。これらの高周波帯は直進性が高く、伝搬損失が大きいので、1つの基地局でカバーできる範囲が限定される。そのため、基地局を高密度に配置し、所望の方向に鋭いビームを発生させるビームフォーミング技術が必要である[1], [2]。ビームフォーミングを実現する技術としては、フェーズドアレイアンテナが一般的であるが、多数のアンテナ素子に給電するための給電回路における伝送路損失は無視できず、また各素子の位相を制御するためのデジタル移相器は高価である[3], [4]。また、遮蔽物の多い都市部での基地局は建物の屋上や壁面に設置されるが、設置場所や景観の制約等により、アンテナを増設することが容易ではない。これらの理由から、設置自由度が高く、ビーム方向の異なる複数のアンテナを持つビームスイッチングアンテナが期待されている[5]-[8]。

高利得なビームを得るための方法として、誘電体スラブ装荷漏れ波アンテナ(Leaky wave antenna with dielectric slab, LWADS)の研究が行われている[9]-[12]。LWADSは、構造が簡単でかつ単一給電素子で高利得ビームが得られるという利点がある。また、LWADSは誘電体層の厚さを変えることで、円錐状のコニカルビームを得ることができる。このコニカルビームを単一の放射方向を持つチルトビームに変換できれば、ビーム方向の異なるビームスイッチング用のマルチアンテナとして有効である。

このコニカルビームを高利得なチルトビームに変換する方法がいくつか提案されているが[13]-[15]、60°以上の広角ビームはない。これは広角化の際不要な正面放射が発生してしまう問題に起因するが、文献[16]では、誘電体スパーサーの比誘電率を1.33より大きくすることで、これを抑制できることが示されている。さらに、一般に誘電体スパーサーの厚みを変えること

で異なるチルト角が得られるため、複数の LWADS を組み合わせたビームスイッチングアンテナを構成する場合に厚みが不均一となる問題が生じる．一方で、波長より十分小さい直径を持つ多数の空気孔を用いた有孔誘電体を用いて実効比誘電率を制御する手法が存在する[17]-[21]．

これに対し、本研究では図1に示すように誘電体の一部を切り捨てた非対称構造であり、誘電体に周期的な空気孔を設けた有孔誘電体をスペーサーとして用いた LWADS を提案する．提案構造では均一な厚みで様々なチルトビーム方向の制御ができ、実験的に性能を評価することで提案構造の有効性を明らかにする．

## 2. 有孔誘電体を用いた LWADS

本研究では、アンテナの H 面 ( $xz$  面)内における  $\theta_p = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$  の 3 つのチルトビームを均一の厚みで孔径が異なる有孔誘電体を用いてそれぞれ実現することを目指す．まず、誘電体スペーサーに厚みおよび比誘電率が  $(h_1, \epsilon_{r1})$  である誘電体材料で満たされ、誘電体スラブに  $(h_2, \epsilon_{r2})$  の誘電体を用いた LWADS を考える．このとき、一般に所望方向  $\theta_p$  において利得が最大となる最適な条件は以下の(1)式、(2)式で表される[9]-[12]．

$$h_1 = \frac{m\lambda_0}{2} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta_p}} \quad (1)$$

$$h_2 = \frac{(2n-1)\lambda_0}{4} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2} - \sin^2 \theta_p}} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_0$  は真空中の波長、 $m, n$  は正の整数である． $\theta_p = 0^\circ$  では正面方向へのペンシルビームが得られる．一方、 $\theta_p > 0^\circ$  では漏れ波の位相定数が増大し、コニカルビームが得られる．

本研究では  $z$  方向に貫通した空気孔を持つ有孔誘電体をスペーサー部に採用し、 $xy$  面における漏れ波の伝搬定数を制御する．有孔誘電体は単位セル中央に円柱状の空気孔を持ち、この単位セルを  $xy$  方向に配列した構造である．単位セルの周期  $p$ 、空気孔半径  $r$ 、比誘電率  $\epsilon_{r1}'$  の誘電体材料で構成された有孔誘電体で実効比誘電率を制御する場合、 $xy$  方向における実効比誘電率  $\epsilon_{\text{reff}}$  は誘電体領域と空気領域の体積分率より近似でき、(4)式で計算される[19]．

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{reff}} &= \frac{\pi r^2 h_1 + (p^2 h_1 - \pi r^2 h_1) \epsilon_{r1}'}{p^2 h_1} \\ &= \epsilon_{r1}' + (1 - \epsilon_{r1}') \frac{\pi r^2}{p^2} \end{aligned} \quad (4)$$

本研究では、有孔誘電体材料として高密度ポリエチレン (High density polyethylene, HDPE) を用いた． $\epsilon_{r1}' = 2.34$  とし、単位セルの周期を  $p = 10 \text{ mm} (= \lambda_0/3)$  とした

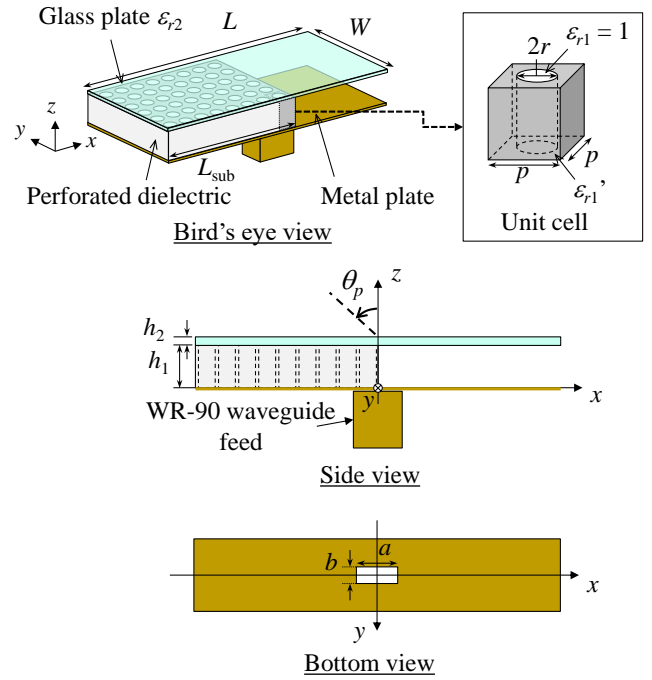


図1：有孔誘電体を用いた LWADS の構造．

表1：有孔誘電体スペーサーの諸元．

$\theta_p$	$\epsilon_{r1}$	$r$
$20^\circ$	1.56	4.31 mm
$40^\circ$	1.85	3.40 mm
$60^\circ$	2.19	1.89 mm

とき、 $\epsilon_{\text{reff}}$  がとり得る範囲は  $1.29 \leq \epsilon_{\text{reff}} \leq 2.34$  となる．この範囲を考慮し有孔誘電体スペーサーの厚みを 12.5 mm と設定したとき、各所望方向  $\theta_p$  に対する空気孔径  $r$  は表1のようになる．誘電体スラブには窓ガラスとして広く用いられるソーダライムガラスを選択し、比誘電率を  $\epsilon_{r2} = 6.8$  とした．(2)式を満たす誘電体スラブの厚さ  $h_2$  は、 $\theta_p = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$  のときそれぞれ  $h_2 = 2.90 \text{ mm}, 2.97 \text{ mm}, 3.05 \text{ mm}$  であり、それらの近似値として、また利用できるガラス板の厚みから  $h_2 = 3 \text{ mm}$  を選択した．

提案する有孔誘電体を用いた LWADS の構造は図1に示した通りである．本研究では所望方向逆側のスペーサーを切り捨て、漏れ波の伝搬をスペーサー充填領域側に制限する．これにより、非充填領域では(1)式の条件を満たす  $\theta_p$  は存在せず（準カットオフ領域と呼称する）となり、スペーサー充填領域側のみに漏れ波を励起させ、チルトビームを実現する．さらに、幅  $W$  を狭めることで漏れ波の伝搬を幅方向にも制限し、H面での利得向上を図っている．

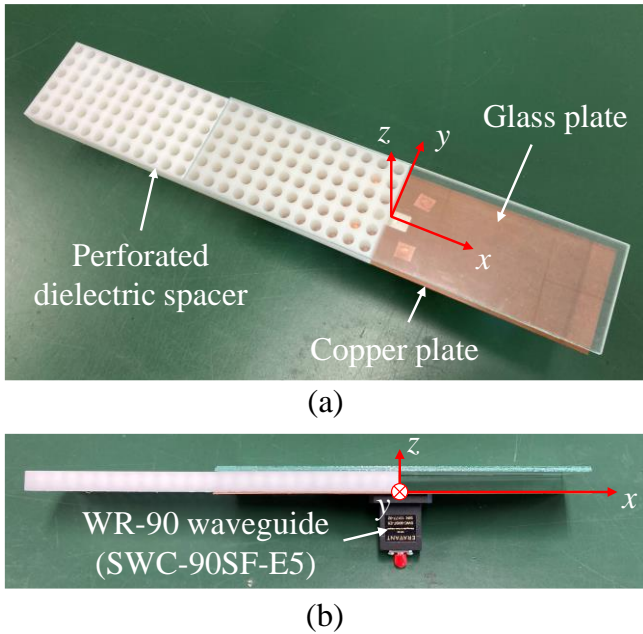


図 2 : 試作アンテナの写真. (a) 鳥瞰図. (b) 側面図.

表 2 : 試作アンテナの構造諸元.

Parameter	Value	Parameter	Value
$L$	240 mm	$a$	22.9 mm
$L_{sub}$	240 mm	$b$	10.2 mm
$W$	60 mm	$p$	10 mm
$h_1$	12.5 mm	$r$	Variable
$h_2$	3.3 mm		

### 3. 実験結果

試作したアンテナの写真を図 2 に示す. LWADS の構造パラメータは表 2 に示す. 誘電体スラブには厚さ  $h_2 = 3.3$  mm のソーダガラス板を使用した. 有孔誘電体スペーサーには厚さ  $h_1 = 12.5$  mm の HDPE を使用し, 設計の都合上長さを  $L_{sub} = 240$  mm と冗長としてある. グランド板には銅板を用い, 銅板の中央には  $y$  偏波の標準 WR-90 導波管 (SWC-90SF-E5) を接続した.

放射パターンは電波暗室において測定された. 図 3 は, 3 種類の LWADS の H 面におけるアンテナ利得パターンを有孔誘電体スペーサー層が半分だけ充填されている場合において, 穴の半径  $r$  を変化させて測定した結果を示している.  $r = 4.3$  mm, 3.4 mm, 1.9 mm の場合, それぞれ  $\theta = 21^\circ, 40^\circ, 52^\circ$  のチルトビーム角が得られていることが分かる. これら全ての場合において, チルトビームは所望の  $\phi = \pi$  側のみに発生し, 14 dBi 以上のアンテナ利得が得られた.  $r = 1.9$  mm の場合, 正面方向の放射が低減されていることがわかり, ビームは若干歪んでしまうが, 所望方向付近で利得は 14 dBi を維持している. この歪みは  $-240$  mm  $\leq x \leq -120$  mm

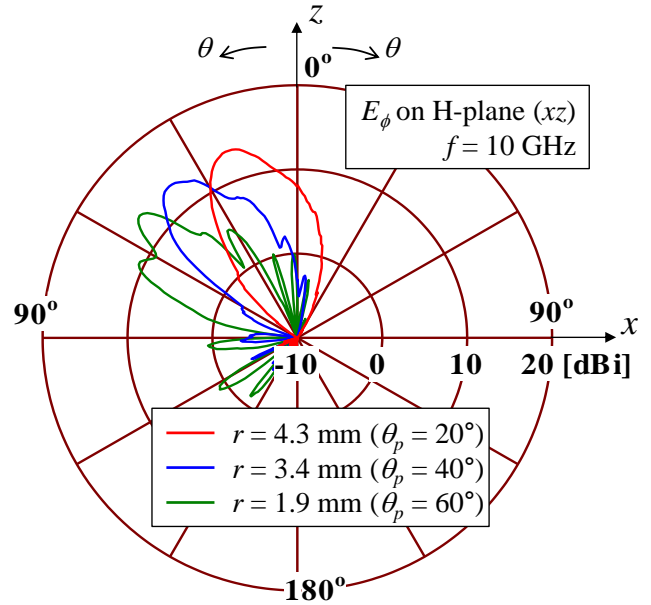


図 3 : アンテナ利得パターン測定結果.

のスペーサー部の冗長な部分による影響と考えられ,  $x = -240$  mm までガラス板および金属板を延長することで軽減されると考えられる. また, 一般にビームを広角化するほど利得が小さくなるが, 利得の減少は  $r = 4.3$  mm と比較しても 0.6 dB 程度と大きくないことが分かる. これは  $\theta_p$  の増大により減衰定数  $\alpha$  が減少し, 励振範囲が増加したため, 広角方向における利得低下が抑えられたためと考えられる.

### 4. まとめ

本報告では, 有孔誘電体スペーサーを用いた LWADS を提案し, 広角チルトビームの実証を行った. この LWADS は, 誘電体スペーサーを半分充填し, 非充填スペーサーで準カットオフ領域を作った非対称構造である. 同一の厚みで有孔誘電体の孔径を 4.3 mm, 3.4 mm, 1.9 mm と変化させることで,  $\theta = 21^\circ, 40^\circ, 52^\circ$  方向に 14 dBi 以上のアンテナ利得を持つ高利得ビームを実験的に得られた. また, 有孔誘電体を半分充填し誘電体スペーサー層に適切な比誘電率を与えることで, ビームの広角化の際に現れる不要な正面放射を低減し, 高利得の広角方向ビームが生成できることを実証した.

### 文 献

- [1] T. S. Rappaport et al., "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," in IEEE Access, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [2] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta and P. Popovski, "Five disruptive technology

- directions for 5G," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, February 2014.
- [3] E. Levine, G. Malamud, S. Shtrikman and D. Treves, "A study of microstrip array antennas with the feed network," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 4, pp. 426-434, April 1989.
- [4] M. Khalily, R. Tafazolli, T. A. Rahman and M. R. Kamarudin, "Design of Phased Arrays of Series-Fed Patch Antennas With Reduced Number of the Controllers for 28-GHz mm-Wave Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1305-1308, 2016.
- [5] A. J. Pascual et al., "An Antenna Array for Photonic Beam Switching in mm-Wave Wireless Communications," 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-4, 2021.
- [6] C. Di Paola, S. Zhang, K. Zhao, Z. Ying, T. Bolin and G. F. Pedersen, "Wideband Beam-Switchable 28 GHz Quasi-Yagi Array for Mobile Devices," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 11, pp. 6870-6882, Nov. 2019.
- [7] H. Tanabe, K. Sakakibara and N. Kikuma, "Multibeam-switching millimeter-wave antenna using beam-tilting design in perpendicular plane to feeding line of microstrip comb-line antenna," 2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), pp. 139-142, 2017.
- [8] S. Liu and Q. Chen, "Dual-Beam Gain-Reconfigurable Antennas Using A Shared Reflectarray Aperture," 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-3, 2019.
- [9] D. Jackson and N. Alexopoulos, "Gain enhancement methods for printed circuit antennas," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 33, no. 9, pp. 976-987, September 1985.
- [10] D. R. Jackson and A. A. Oliner, "A Leaky-Wave Analysis of the High-Gain Printed Antenna Configuration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 7, pp. 905-910, 1988.
- [11] H. Yang and N. Alexopoulos, "Gain enhancement methods for printed circuit antennas through multiple superstrates," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 35, no. 7, pp. 860-863, July 1987.
- [12] D. R. Jackson et al., "The Fundamental Physics of Directive Beaming at Microwave and Optical Frequencies and the Role of Leaky Waves," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 10, pp. 1780-1805, Oct. 2011.
- [13] E. Schmidhammer, J. Detlefsen and H. Ostner, "Influence of a 45° corner-reflector on the radiation pattern of a planar leaky-wave antenna," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1996 Digest*, vol.3, pp. 2016-2019, 1996.
- [14] F. Scatone, M. Ettorre, B. Eddo, R. Sauleau and N. J. G. Fonseca, "Truncated Leaky-Wave Antenna With Coscant-Squared Radiation Pattern," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 841-844, May 2018.
- [15] L. Leger, T. Monediere, E. Arnaud and B. Jecko, "Multisources and beam steered EBG antennas," 11th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics [ANTEM 2005], pp. 1-4, 2005.
- [16] Tianxia Zhao, D. R. Jackson, J. T. Williams, H. . -Y. D. Yang and A. A. Oliner, "2-D periodic leaky-wave antennas-part I: metal patch design," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, pp. 3505-3514, Nov. 2005.
- [17] T. Morita and S.B. Cohn, "Microwave lens matching by simulated quarter-wave transformers," *IRE Trans. AP*, vol.AP-4, no.1, pp.33-39, Jan. 1956.
- [18] P.S. Kildal, K. Jakobsen, and K.S. Rao, "Meniscuslens-corrected corrugated horn: A compact feed for a Cassegrain antenna," *IEE Proc.* vol.131, pt. H, no.6, pp.390-394, Dec. 1984.
- [19] T. Hayat, M. U. Afzal, A. Lalbakhsh and K. P. Esselle, "Additively Manufactured Perforated Superstrate to Improve Directive Radiation Characteristics of Electromagnetic Source," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 153445-153452, 2019.
- [20] W. Shao and Q. Chen, "2-D Beam-Steerable Generalized Mikaelian Lens With Unique Flat-Shape Characteristic," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 2033-2037, Oct. 2021.