

ミリ波イメージング用有孔誘電体反射型 リコンフィギャラブルレンズアンテナの設計

川田 紘斗[†] 工藤 陸[‡] 佐藤 弘康[‡] 陳 強[‡]

[†] 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

E-mail: [†] kawata.hiroto.q5@dc.tohoku.ac.jp [‡] {sahiro, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 既に提案した有孔誘電体反射型レンズを2枚利用し、それぞれをモーターで回転させることで再構成可能な構成に拡張したレンズアンテナを提案している。はじめにそれぞれのレンズの回転量を制御することで所望の視野においてくまなくビーム走査できることを確認している。さらに、イメージングの光学系を設計し、送受APFAを用いたレンズシステムを用いて導体球の位置推定を行った結果を述べる。

キーワード リフレクトレンズ, 有孔誘電体, ミリ波, イメージング

Design of a Perforated Dielectric Reflective Reconfigurable Lens Antenna for Millimeter-Wave Imaging

Hiroto KAWATA[†] Riku KUDO[‡] and Hiroyasu SATO[‡] Qiang CHEN[‡]

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980
8579 Japan

E-mail: [†] kawata.hiroto.q5@dc.tohoku.ac.jp [‡] {sahiro, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract We propose a lens antenna extended to a reconfigurable configuration by employing two previously proposed perforated dielectric reflective lenses, each rotated by a motor. First, it is confirmed that by controlling the rotation of each lens, beam scanning can be performed thoroughly within the desired field of view. Furthermore, an optical system for imaging is designed, and the results of estimating the position of a conducting sphere using a lens system with transmitting and receiving APFA are presented.

Keywords Reflective lens, Perforated dielectric, Millimeter wave, Imaging

1. まえがき

現代の無線通信システムにおいて、第5世代移動通信システム(5G)の普及が進んでいる。5Gは高速大容量、多数同時接続、低遅延という特徴を有し、あらゆるモノ・人を繋ぐIoT時代の社会基盤となることが期待されており、周波数帯域確保のためミリ波帯やテラヘルツ帯の利用が期待されている。しかしながらこのような高周波数帯では電波の反射や回折による伝搬損失が大きく障害物等の影響を受けやすいという懸念がある。そのため、動的に電波の反射方向を変化できるIRS(Intelligent Reflecting Surface)の研究が盛んに行われている。

ミリ波を対象としたIRSの応用例として、上述の通信応用の他に、金属探知機で検知できない液体や粉末などを検知できるミリ波イメージングが挙げられる[1]。物体からの散乱波を観測するアクティブイメージングをリアルタイムに行う場合、画素を構成するため

に多数のセンサーアレーが必要である。

本研究では、有孔誘電体を用いた集光反射型レンズアンテナ[2,3]を機械的に回転させることでリコンフィギャラブルにビーム走査し、物体のアクティブイメージングを行うことを目的とする。レンズの回転によりビーム方向を変化できるので像面のセンサーアレーは1つで十分であり、センサーアレーを用いるアクティブイメージング装置よりも低コストである。

2. 再構成可能な集光反射型レンズアンテナの試作と性能評価実験

2.1. レンズアンテナの構成・試作

図1に試作したレンズアンテナの構成を示す。一次放射器前方に2枚のレンズを配置し、それぞれを回転させる。この際の最終的なビーム方向の単位ベクトルを \hat{n}_t 、その仰角と方位角を θ_t, ϕ_t とすると、2枚のそれぞれのレンズの所望角度である $\theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2$ を用いて

次式のように表すことができることが知られている。

$$\hat{r}_t = \sin \theta_t \cos \phi_t \hat{x} + \sin \theta_t \sin \phi_t \hat{y} + \cos \theta_t \hat{z} \quad (1)$$

$$\theta_t = \sin^{-1} \{ \sqrt{\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2 + 2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \} \quad (2)$$

$$\phi_t = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_1 \sin \phi_1 + \sin \theta_2 \sin \phi_2}{\sin \theta_1 \cos \phi_1 + \sin \theta_2 \cos \phi_2} \right) \quad (3)$$

$\theta_e = \theta_1 = \theta_2 = 15 \text{ deg}$, $\phi_2 = M\phi_1$ (M : 定数) の条件のもと, $\phi_1 = 0 \sim 360 \text{ deg}$ の範囲でレンズを回転させる. この際のビーム方向の直交座標における単位ベクトルの x 成分 $(\hat{r}_t)_x$, y 成分 $(\hat{r}_t)_y$ の軌跡を, 特定の M ごとに示したものが図 2 である. $M=1$ の場合は 2 枚のレンズは逆回転に回ることになり, ビームは水平走査となる. M の値が大きいくほど密なビーム走査が可能となり, イメージングにおける空間分解能が向上する.

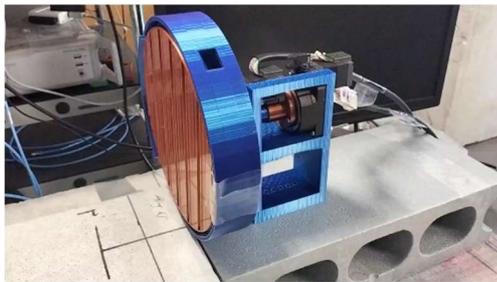
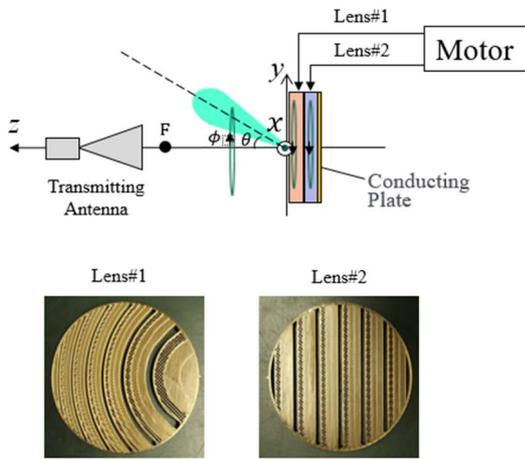


図 1 試作したレンズアンテナの構成

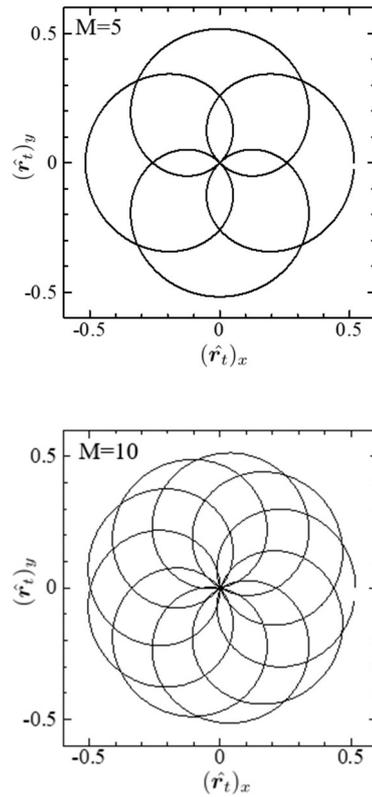
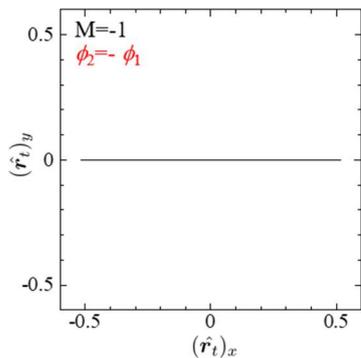


図 2 ビーム軌跡の例

2.2. レンズアンテナの性能評価

実験系を図 3 に示す. 焦点距離 $F=200\text{mm}$ からずれた $z_{im}=210\text{mm}$ に送信アンテナとして広帯域かつ高利得な対せき型フェルミアンテナ(Antipodal Fermi Antenna, APFA)[4]を配置し, 集光位置を調べるため導波管開口アンテナ(Open-ended Waveguide Antenna, OWG)を xz スキャナで掃引してネットワークアナライザ MS46322B を用いて電界分布を測定した. 図 4 に, 試作した集光反射型レンズアンテナで $(x, z) = (250, 470)\text{mm}$ に集光したときの電界分布を示す. OWG を $x = [200, 700]\text{mm}$, $y = 0 \text{ mm}$, $z = [200, 500]\text{mm}$ の範囲において 10mm 間隔で走査し, 各点で S_{21} を測定した. なお, 各レンズは角度 $\phi_1 = \phi_2 = 0 \text{ deg}$ で固定しており, このときビーム方向は $\theta_t = 31 \text{ deg}$, $\phi_t = 0 \text{ deg}$ である. 偏波は z 方向である. この結果から, 試作したレンズは所望の方向 $\theta_t = 31 \text{ deg}$, $\phi_t = 0 \text{ deg}$ に電波を反射していることが確認できた. さらに $(x, z) = (250, 470)\text{mm}$ に集光していることが分かった.

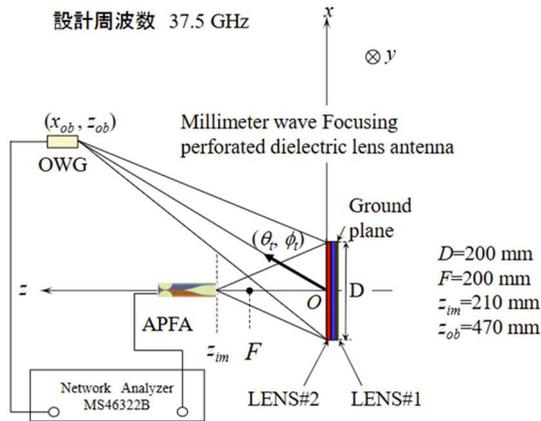


図3 レンズアンテナ性能評価の実験系

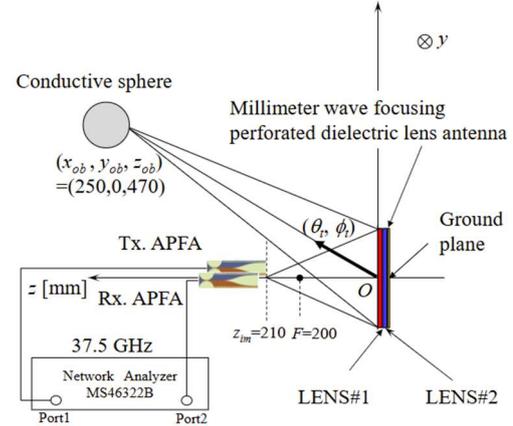


図5 イメージング実験系

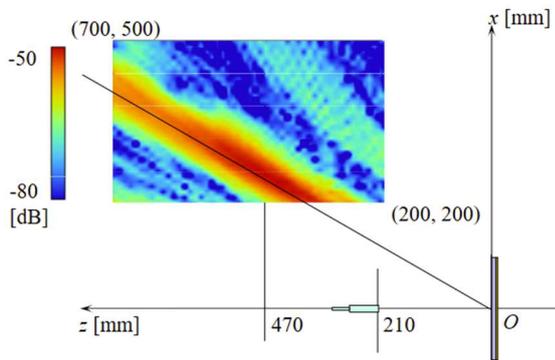


図4 レンズアンテナの集光電界分布

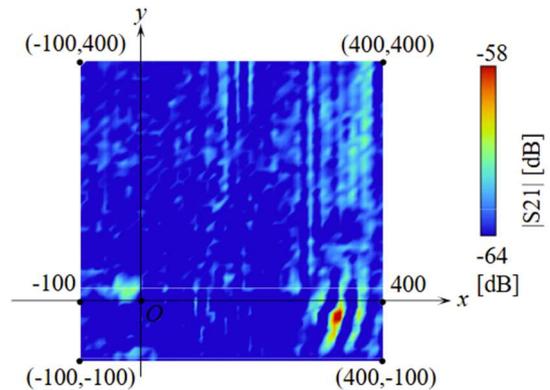


図6 Subtraction法による散乱波 E_{scat} 測定

3. ミリ波イメージング

3.1. Subtraction 法

まず初めに、物体からの散乱波の測定方法である Subtraction 法について説明する。物体からの散乱波 E_{scat} を観測するためには、素子間相互結合や周囲環境からの散乱を含んだ全電界 E_{total} から入射界 E_{inc} を差し引いて求められる。Subtraction 法の妥当性を検証するために、図5の実験系においてレンズを固定して直径 44 mm の導体球の掃引実験を行った。各レンズの角度は $\phi_1 = \phi_2 = 0$ deg であり、ビーム方向は $\theta_t = 31$ deg, $\phi_t = 0$ deg である。また、導体球の走査範囲は $x_{ob} = [-100, 400]$ mm, $y_{ob} = [-100, 400]$ mm, $z_{ob} = 470$ mm とした。散乱界 E_{scat} の測定結果を図6に示す。位置 $(x, y, z) = (330, -20, 470)$ mm に導体球からの強い散乱波が確認できており、物体の検知に関して Subtraction 法の妥当性を確認できたとともに、導体球の位置推定の見通しを得た。

3.2. ビーム走査によるイメージング

次に、図5の実験系において導体球を固定し、今度はレンズ回転によるビーム走査によってイメージング実験を行った結果を図7に示す。レンズの回転条件は $\phi_2 = 10 \phi_1$ ($M = 10$), $\phi_1 = 0 \sim 360$ deg とし、速度は 1 deg/s とした。図7左にビーム軌跡と導体球の位置を示しており、図7右は $S21$ が -33 dB 以上となった場所を抽出している。この結果より、ビーム走査と Subtraction 法により物体の位置推定ができることが明らかとなった。より高分解能のイメージングを実現するには M を増加してビーム走査をさらに密にし、連続的に散乱界強度を表示する必要があるが、物体の有無の検知のためには精細な画像は不要であり、必要な分解能を得るための設計が必要であると考えられる。

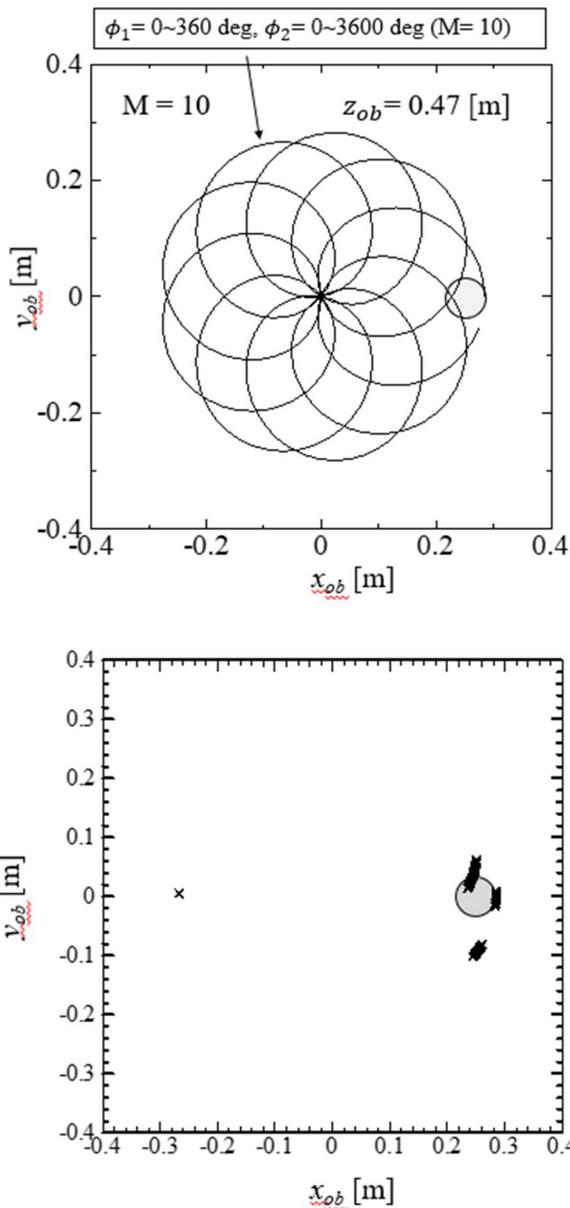


図 7. ビーム走査によるイメージング実験結果

4. まとめ

本論文では、ミリ波用の再構成可能な集光反射型レンズアンテナを設計・試作し、各々のレンズの回転量を制御することで所望の視野内でくまなくビーム走査できることを確認した。また、送信アンテナをレンズアンテナの焦点位置からずらして配置することで、特定の位置に集光することを確認した。さらに、試作したレンズアンテナおよび送受 APFA を用いてアクティブイメージングシステムを設計し、導体球の位置推定を行いその有効性を明らかにした。

文 献

- [1] Wenyi Shao, Xiaotong Li, Hiroyasu Sato, and Qiang Chen, "Compound Mikaelian Lens with Non-surface

Subwavelength Focusing for High-resolution Millimeter Wave Imaging," *IEEE Trans. Antennas Propag.*

- [2] W. Shao and Q. Chen, "A Novel Planar Perforated Hyperbolic Secant Lens Antenna for Milli-Wave Applications," 2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Taipei, Taiwan, 2021, pp.1-2, doi: 10.23919/ISAP47258.2021.9614523.
- [3] 工藤陸, "有孔誘電体を用いた反射型リコンフィギュアブルレンズアンテナの研究", 修士論文, Mar.2025.
- [4] Hiroyasu SATO, Yukiko TAKAGI, Kunio SAWAYA, High Gain Antipodal Fermi Antenna with Low Cross Polarization, *IEICE Transactions on Communications*, 2011, Volume E94.B, Issue 8, Pages 2292-2297
- [5] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 新井直人, 我妻寿彦, 水野皓司, "コルゲート構造付ミリ波フェルミアンテナの設計," *電子情報通信学会論文誌(B)*, Vol. J86-B, No. 9, pp.1851-1859, (2003-9).