

導体反射板付ダイポールメタサーフェスを用いた計算イメージングの 素子配置に関する検討

河田なな穂^{†,††} 陳 強^{††}

[†] アンテナ技研株式会社 〒337-0011 埼玉県さいたま市見沼区宮ヶ谷塔 4-72

^{††} 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@antenna-giken.co.jp, ^{††}qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

あらまし 導体反射板付ダイポールメタサーフェスを用いた計算マイクロ波イメージング (Computational Microwave Imaging, CMI) について、空間的に直交した近傍界電界パターンを得られるダイポール素子配置について検討した。CMI では、情報を多重化するためにイメージング対象シーンを空間的に直交した電界パターンで照射する必要がある。空間ダイバーシティの活用が重要である。導体反射板と開放/短絡スイッチ付き無給電ダイポールアレーからなる導体反射板付ダイポールメタサーフェスは、ダイポール素子の配置パターンを変化させることでイメージ空間における電界を変化させる。本報告では、素子の配置パターンをバイナリデータの配列とみなしてダイポールアレーを設計する手法を提案する。本手法で得られたダイポールアレーが生成する電界の相関は互いに低く、空間ダイバーシティを活用可能であることを確認した。また、周波数を変化させたときの電界の相関が低く、周波数ダイバーシティをあわせて活用可能であることを確認した。

キーワード 計算マイクロ波イメージング, 空間ダイバーシティ, 周波数ダイバーシティ

A Study on Element Distribution of Conducting-Reflector-Backed Dipole Metasurface for Computational Microwave Imagings

Nanaho KAWATA^{†,††} and Qiang CHEN^{††}

[†] Antenna Giken Co., Ltd. 4-72 Miyagayato, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama, 337-0011 Japan

^{††} Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579
Japan

E-mail: [†]kawata@antenna-giken.co.jp, ^{††}qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

Abstract In this paper, the distribution of elements of a conducting-reflector-backed dipole metasurface to generate spatially orthogonal electric field for computational microwave imaging (Computational Microwave Imaging, CMI) is studied. In the CMI, it is necessary to illuminate the target by spatially orthogonal patterns to multiplex the information. A key study in this framework is therefore to enhance the spatial diversity of the electric field in the imaging area. A conducting-reflector-backed dipole metasurface consists of a conducting reflector and palastic dipoles. Various electric field patterns can be generated by controlling the excitation of each dipole element. This report proposes a design method for distribution of elements by using binary matrices and evaluating their similarities. The correlations between the electric field patterns and the correlations between frequencies with the designed dipole arrays are sufficiently low. This indicates the proposed design method can leverage both spatial and frequency diversity.

Key words Computational Microwave Imaging, spatial diversity, frequency diversity

1. はじめに

電磁波イメージングは、光学的に不透明な材質を透過でき高分解能が得られることから、幅広い分野で関心を集めている [1].

特に、マイクロ波やミリ波の周波数帯域での電磁波イメージングは、セキュリティスクリーニング [2][3] や医療診断 [4][5], 非破壊検査 [6][7] などの分野で活用されている。従来、これらの技術は合成開口レーダやフェーズドアレーレーダといった機

械的/電子的スキャンを用いることが多く [2][6], ハードウェアが複雑になる可能性がある. さらに, 高い分解能を得るためには多数の測定点でスキャンを行う必要があり, データ取得時間が長くなる懸念がある.

計算マイクロ波イメージング (Computational Microwave Imaging, CMI) は, 画像再構成の負担をハードウェアからソフトウェアに移行し, 従来技術の課題を克服可能な技術として注目されている [8]. CMI は, 放射場の事前知識を利用して, 対象シーンの反射率等の推定値を再構成する逆問題として表される [9]. 鮮明な画像再構成のためには情報を多重化する必要があるため, 空間的に直交した放射場を生成できるアンテナの設計は CMI において重要な研究である. 空間的に直交した放射場を得る方法として, キャビティ構造 [10][11][12][13] やスロットを素子とするメタサーフェス [14][15][16], 変形パッチを用いた平面アレー [17][18] などにより周波数ダイバーシティを活用する研究が盛んである. また, キャビティ構造やメタサーフェス素子の工夫による偏波ダイバーシティの活用も研究されている [19][20][21].

筆者らは, 導体反射板付ダイポールメタサーフェス (Conducting-Reflector-Backed Dipole Metasurface, CRBDM) を用いた新しいイメージング手法を提案する. 導体反射板と開放/短絡スイッチ付き無給電ダイポールアレーからなる CRBDM は簡素な構造を持ち, ダイポール素子の配置によって生成する電界を多様に変化させることができるため, 従来技術の課題であった複雑なハードウェアとデータ取得時間の長時間化の克服が期待できる. 本報告では, 情報の多重化に必要な空間的に直交した電界を生成するための, ダイポール素子配置の設計手法について報告する. また, 提案手法により設計したダイポールアレーから生成される電界分布と, 異なるアレー間の電界相関を評価した結果について述べる.

2. CRBDM によるイメージング

図 1 に, 筆者らが提案する CRBDM を用いたイメージング手法の概要を示す. CRBDM をイメージング対象シーンの背面に設置し, 短絡するダイポール素子の配置パターンを変化させながら対象物と CRBDM からの反射電界を測定する. 対象物の形状は, 逆行列問題を解いて得られる等価電流分布から推定される. 短絡するダイポール素子の配置パターンを変化させることで, 多様な電界で対象シーンを照射することが可能になる. 送信アンテナおよび受信アンテナ, CRBDM, 仮想波源からなる CRBDM システムの逆行列問題は, 各素子の電圧および電流と素子間の相互インピーダンス行列を用いて式 (1) で表される.

$$Z_{N \times N} I_{N \times 1} = V_{N \times 1} \quad (1)$$

ここで, N はシステム内の素子の総数, $Z_{N \times N}$ は各素子間の相互インピーダンス行列, $I_{N \times 1}$ と $V_{N \times 1}$ はそれぞれすべての素子の電流と電圧からなる電流ベクトルと電圧ベクトルである.

3. ダイポール素子配置の検討

空間的に直交した電界パターンを生成するためのダイポール

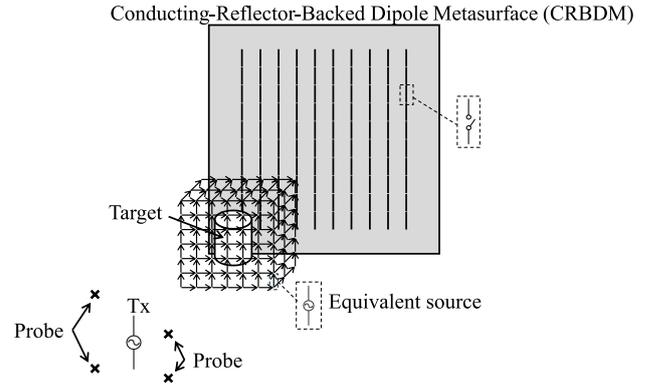


図 1 CRBDM によるイメージング手法の概要
Fig. 1 Overview of imaging method using CRBDM.

素子配置を検討した. 終端負荷を短絡するダイポール素子の配置パターンを変化させたとき, 各パターンから得られる電界分布の相関を低減するためには, 類似した素子配置パターンを避ける必要がある. そこで本検討では, ダイポール素子配置をバイナリ行列とみなし, バイナリ行列の類似度を低減させる手法でダイポールアレーの設計を行った. $n \times n$ 素子の平面ダイポールアレーについて, 終端負荷を短絡するダイポール素子を 1, 開放するダイポール素子を 0 としたとき, ダイポール素子配置はすべての要素が 1 と 0 からなる n 行 n 列のバイナリ行列とみなすことができる. 例として, 8×8 素子のダイポール素子配置とバイナリ行列の対応を図 2 に示す. このとき, 複数のバイナリ行列に対して, 互いに類似度が低くなるように要素を配置した. 類似度の評価には, バイナリデータの類似指標として知られるジャカード指数 [22] と, パターンマッチング評価に用いられる正規化相互相関 [23] を用いた. 両者を併用することで, 要素配置が局所的・全体的に類似することを避けることができる. 2 個のバイナリ行列を X, Y とし, 各行列の要素を $x_{i,j} \in X$, $y_{i,j} \in Y$ としたとき, ジャカード指数と正規化相互相関はそれぞれ下記の式 (2)(3) で表される.

$$J(X, Y) = \frac{\{(i, j) \mid x_{i,j} = 1\} \cap \{(i, j) \mid y_{i,j} = 1\}}{\{(i, j) \mid x_{i,j} = 1\} \cup \{(i, j) \mid y_{i,j} = 1\}} \quad (2)$$

$$\rho_{NCC}(X, Y) = \frac{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x})(y_{i,j} - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

\bar{x} , \bar{y} はバイナリ行列 X, Y の要素の平均で,

$$\bar{x} = \bar{y} = \frac{m}{n^2} \quad (4)$$

$$m = |\{(i, j) \mid x_{i,j} = 1\}| = |\{(i, j) \mid y_{i,j} = 1\}| \quad (5)$$

である. また, $0 \leq J(X, Y) \leq 1$, $-1 \leq \rho_{NCC}(X, Y) \leq 1$ である. 本検討では $n=20$ かつ $m=160$, つまり 20×20 素子の平面アレーのうち 160 素子を短絡する条件の下, 各アレーが互いに $J(A, B) < 0.3$, $|\rho_{NCC}(X, Y)| < 0.4$ を満たすように設計した. 最終的に設計した 10 種類のアレーを図 3 に示す. 図 3 では開放するダイポール素子は表示していない.

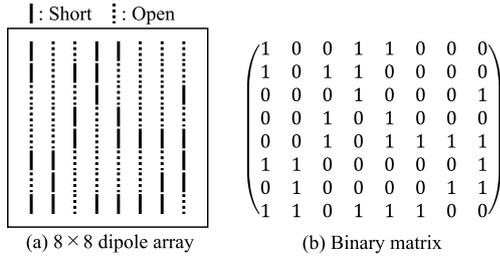


図2 8×8 素子ダイポールアレーと対応するバイナリ行列
Fig. 2 8×8 dipole array and corresponding binary matrix.

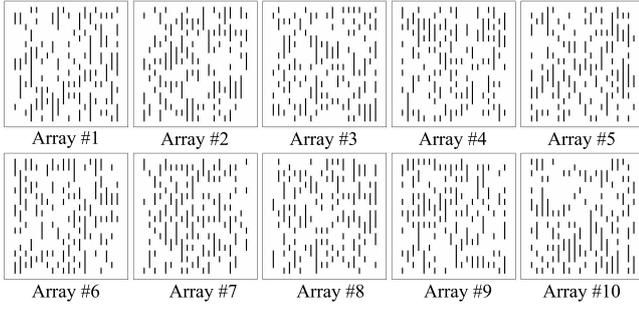


図3 設計した 20×20 素子ダイポールアレー
Fig. 3 Designed 20×20 dipole arrays.

4. 電界シミュレーションおよび相関検討

4.1 アレー間の電界相関

作成した 10 種類のアレーを用いて、モーメント法による電界のシミュレーションを行った。図 4 に 24 GHz、導体反射板からの距離 $z_{obs} = 12\lambda_0$ における垂直偏波の電界分布を示す。ここで λ_0 は 24 GHz における波長である。送信アンテナは導体反射板から $50\lambda_0$ に配置した。バイナリ行列を用いた設計手法により、短絡するダイポール素子配置の類似度が低減され、結果として電界分布の相関が低くなっていることがわかる。

定量的評価のため、各ダイポールアレーによる電界分布のすべての組み合わせに対してピアソン相関係数を算出し、電界相関を評価した。ピアソン相関係数は式 (6) で与えられる。

$$\rho(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x})(y_{i,j} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{i,j} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

ここで、 $-1 \leq \rho(X, Y) \leq 1$ である。図 4 に、各ダイポールアレーの電界分布の組み合わせに対する相関係数行列 (correlation coefficient matrix, CCM) を示す。CCM は電界の空間的直交性を評価するためのよく知られた手法である [24]。相関係数は各組み合わせに対して十分に低く、異なるダイポールアレーに対する相関係数は 0.4 以下である。ダイポール素子配置をバイナリ行列とみなして類似度を低減することで、電界の相関を低減できることが確認できた。

4.2 周波数間の電界相関

次に、周波数を変化させたときの電界分布とその相関を確認

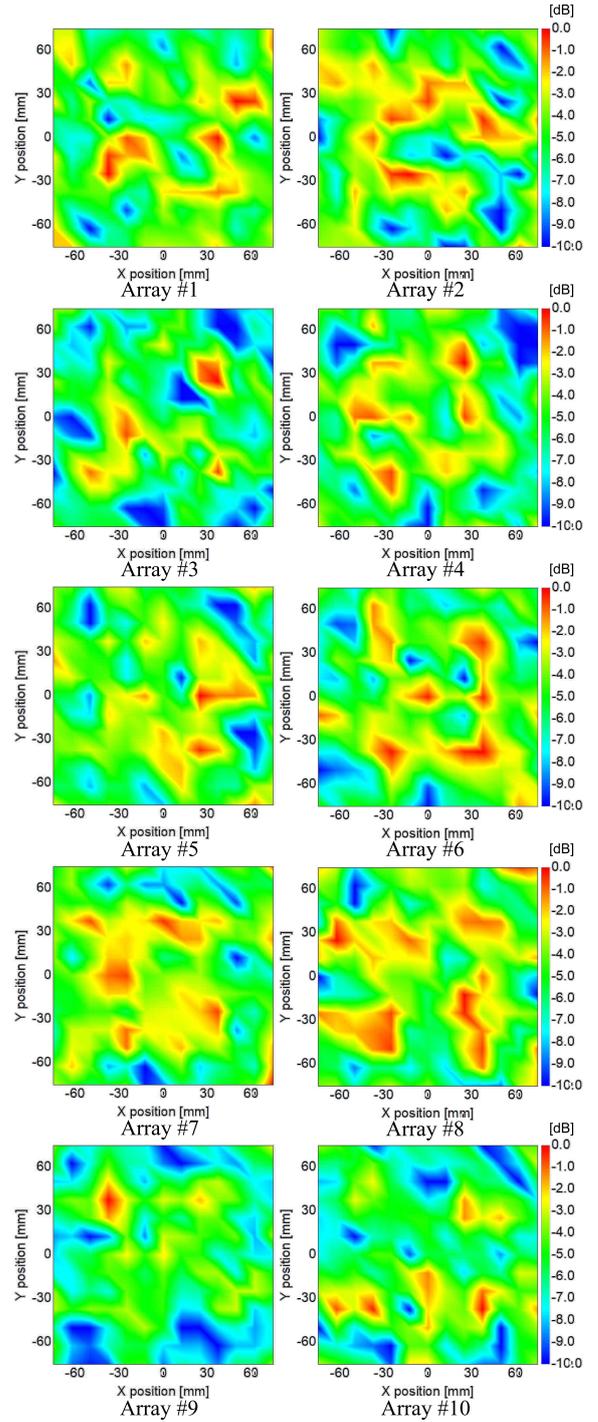


図4 各ダイポールアレーの電界分布シミュレーション結果 (垂直偏波, 24 GHz)
Fig. 4 Simulation result of e-field distribution of each dipole array (24 GHz).

した。周波数範囲は 18~32 GHz とし、1 GHz 刻みでモーメント法によるシミュレーションを行った。図 6 に、代表的な周波数における垂直偏波の電界分布を示す。18, 20 GHz および 30, 32 GHz ではやや電界分布が類似しているが、22~28 GHz では電界分布が大きく異なっており、相関が低くなっていることが確認できた。

周波数間相関についてもアレー間相関と同様に CCM を算出した。図 7 にアレー #1 に対する周波数の CCM を示す。近接す

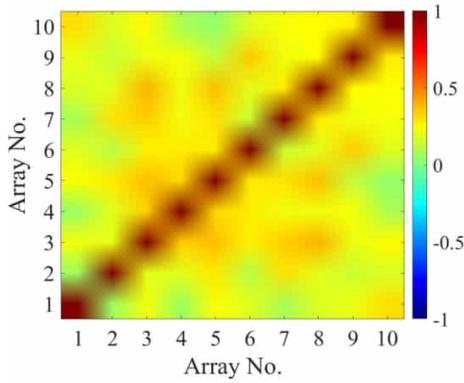


図5 アレー間の CCM (24 GHz)
Fig. 5 CCM between arrays (24 GHz).

る周波数ではやや相関が高くなっているが、互いに離れた周波数間の相関は十分に低くなっている。他のアレーについても同様の傾向がみられた。この結果から、周波数帯域を広く変化させることで周波数ダイバーシティを活用できることを確認した。

5. まとめ

本報告では、CRBDMによるイメージングのためのダイポール素子配置について検討した結果を述べた。バイナリ行列およびその類似度評価を利用して素子配置を設計することで、アレー間の相関が低く空間的に直交した電界を生成可能であることを確認した。また、周波数帯域を広く変化させることで、周波数間で電界の直交性が得られることをあわせて確認した。空間的に直交した電界を生成することは、情報の多重化が必要なCMIの分野で重要になる。相関の低いアレーを用いた空間ダイバーシティと周波数変化による周波数ダイバーシティを組み合わせることで、CMIに必要な多数の直交した電界が得られることを確認した。

文 献

- [1] S. S. Ahmed, A. Schiessl, F. Gumbmann, M. Tiebout, S. Methfessel, and L.-P. Schmidt, "Advanced Microwave Imaging," *IEEE Microwave Mag.*, vol. 13, no. 6, pp. 26–43, 2012.
- [2] D. M. Sheen, D. L. McMakin, and T. E. Hall, "Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 49, no. 9, pp. 1581–1592, Mar. 2001.
- [3] J. N. Gollub, "Large metasurface aperture for millimeter wave computational imaging at the human-scale," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2017.
- [4] N. K. Nikolova, "Microwave imaging for breast cancer," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 12, no. 7, pp. 78–94, Dec. 2011.
- [5] M. T. Bevacqua, S. Di Meo, L. Crocco, T. Isernia, and M. Pasian, "Millimeter-waves breast cancer imaging via inverse scattering techniques," *IEEE J. Electromagn., RF Microw. Med. Biol.*, vol. 5, no. 3, pp. 246–253, Sep. 2021.
- [6] Z. Qiu, M. Jiao, T. Jiang, and L. Zhou, "Dam structure deformation monitoring by GB-InSAR approach," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123287–123296, 2020.
- [7] A. Baumann-Ouyang, J. A. Butt, M. Varga, and A. Wieser, "MIMO-SAR interferometric measurements for wind turbine tower deformation monitoring," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1518, Feb. 2023.
- [8] M. F. Imani et al., "Review of Metasurface Antennas for Computational Microwave Imaging," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1860–1875, Mar. 2020.

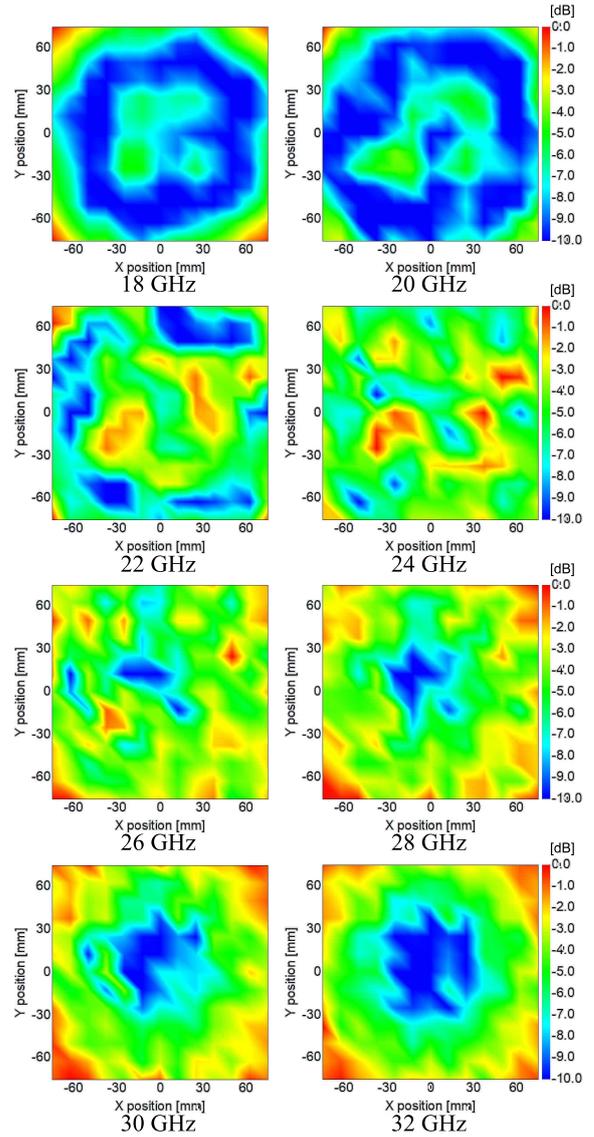


図6 周波数ごとの電界分布シミュレーション結果 (垂直偏波, アレー #1)

Fig. 6 Simulation result of e-field distribution of frequencies (Array #1).

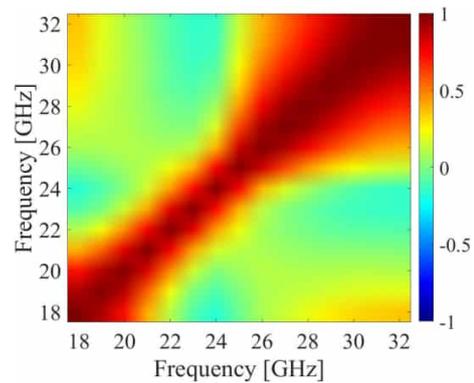


図7 周波数間の CCM (アレー #1)
Fig. 7 CCM between frequencies (Array #1).

- [9] A. Li, M. Zhao, D. P. Lynch, S. Zhu, M. A. B. Abbasi, and O. Yurduseven, "Frequency-diverse reflection metasurface antenna design for computational microwave imaging," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 5, pp. 1240–1248, Oct. 2024.

- [10] T. Sleasman, M. F. Imani, J. N. Gollub, and D. R. Smith, "Microwave Imaging Using a Disordered Cavity with a Dynamically Tunable Impedance Surface," *Phys. Rev. Appl.*, Nov. 2016
- [11] T. Zvolensky, V. R. Gowda, J. Gollub, D. L. Marks, and D. R. Smith, "W-band sparse imaging system using frequency diverse cavity-fed metasurface antennas," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 73659–73668, 2018.
- [12] M. Zhao et al., "W-band frequency-polarization-port-diverse cavity imager with bunching random beams," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 54, no. 35, p. 355106, Sep. 2021.
- [13] The Viet Hoang et al., "Spatial diversity improvement in frequency-diverse computational imaging with a multi-port antenna," *Results Phys.*, vol. 22, p. 103906, 2021.
- [14] O. Yurduseven, J. N. Gollub, K. P. Trofatter, D. L. Marks, A. Rose, and D. R. Smith, "Software calibration of a frequency-diverse, multistatic, computational imaging system," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2488–2497, 2016.
- [15] O. Yurduseven et al., "Computational microwave imaging using 3D printed conductive polymer frequency - diverse metasurface antennas," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 11, no. 14, pp. 1962–1969, Nov. 2017.
- [16] Y. Wei, X. Chen, B. Liu, Y. Huang, C. Duan, and Q. Zhang, "2-D single-port phase coding meta-antenna leveraging frequency diversity for microwave imaging," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 3421–3425, Nov. 2024.
- [17] T. Wang, J. Han, X. Ma, H. Liu, and L. Li, "Frequency-diverse MIMO metasurface antenna for computational imaging with aperture rotation technique," *Front. Mater.*, vol. 9, Jan. 2023.
- [18] A. Li, M. Zhao, D. P. Lynch, S. Zhu, M. A. B. Abbasi, and O. Yurduseven, "Frequency-diverse reflection metasurface antenna design for computational microwave imaging," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 5, pp. 1240–1248, Oct. 2024.
- [19] M. Zhao et al., "Dual-polarized frequency-diverse metaimager for computational polarimetric imaging," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 7, pp. 5479–5488, Jul. 2024.
- [20] A. Li, M. Zhao, M. Ali Babar Abbasi, and O. Yurduseven, "Dual-polarized reflectarray-based metasurface aperture for computational polarimetric imaging at microwave frequencies," 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), IEEE, Apr. 2024, pp. 1–7.
- [21] M. Zhao et al., "Microwave computational imaging-based near-field measurement method," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 3392–3396, Nov. 2024.
- [22] P. Jaccard, "Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et du Jura," *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, vol. 37, no. 140, pp. 241–272, 1901.
- [23] B. Pan, H. Xie, and Z. Wang, "Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching," *Appl. Opt.*, vol. 49, no. 28, pp. 5501–5509, Oct. 2010.
- [24] A. Li, M. Zhao, M. A. B. Abbasi, and O. Yurduseven, "A measurement mode selection method for computational microwave imaging," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 3382–3386, Nov. 2024.