一般社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
A・P2025-205,WPT2025-52(2026-01)

[依頼講演] 2.45 GHz 帯集光型 1 ビットリフレクトアレーを用いた無線電力伝送

末木 聖大†　近藤 肇†　紫藤 琢磨†　清水 俊吾†　町田 明†　佐藤 弘康††　陳 強††

†中央電子株式会社　〒192-8532 東京都八王子市元本郷町 1-9-9
††東北大学大学院工学研究科　〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05
E-mail: †{sueki, kondo, shido, shimizu, aki}@cec.co.jp, ††{hiroyasu.sato.b1, qiang.chen.a5}@tohoku.ac.jp

あらまし　空間伝送型無線電力伝送（WPT，Wireless Power Transfer）技術は，IoT デバイスやドローンへの給電，災害地送電など幅広い応用が期待され注目を集めている．筆者らは，電力効率を補いつつ低コストにビームフォーミングを行う目的で，集光型リフレクトアレーを用いた WPT システムを検討している．本稿では，2.45 GHz 帯 1 ビットリフレクトアレーを開発し，集光制御による受電電力の向上，受電電力の距離依存性，および角度依存性について評価した結果を述べる．

キーワード　無線電力伝送(WPT)，リフレクトアレー，集光，ビームフォーミング

2.45 GHz Wireless Power Transfer Using Near-field Focusing 1-Bit Reflectarray Antenna

Shota SUEKI†　Hajime KONDO†　Takuma SHIDO†　Shungo SHIMIZU†　Akira MACHIDA†
Hiroyasu SATO††　and　Qiang CHEN††

†CHUO ELECTRONICS CO., LTD. 1-9-9 Motohongo-cho, Hachioji-shi, Tokyo, 192-8532 Japan
††Graduate School of Engineering, Tohoku Univ. 6-6-05 Aramakiazaaoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan
E-mail: †{sueki, kondo, shido, shimizu, aki}@cec.co.jp, ††{hiroyasu.sato.b1, qiang.chen.a5}@tohoku.ac.jp

Abstract　Wireless Power Transfer (WPT) technology is attracting attention due to its potential applications, including powering IoT devices, drones, and delivering energy to disaster-stricken areas. In this study, we investigate a WPT system employing a near-field focusing reflectarray to achieve cost-effective beamforming and enhance power transfer efficiency. We report on the development of a 2.45 GHz band 1-bit reflectarray and present evaluation results demonstrating the improvement in received power achieved through focusing control. Furthermore, we assess the dependencies of received power on transmission distance and angle.

Keywords　Wireless Power Transfer (WPT), Reflectarray, Near-field Focusing, Beamforming

1. まえがき

マイクロ波を用いることで空気中を介して電力を伝送する空間伝送型無線電力伝送（WPT，Wireless Power Transfer）は，増大する IoT デバイスの電源ケーブル敷設にかかる設置コストや電池交換・バッテリ充電の保守コスト削減，またロボットやドローンといった移動体への送電，山奥や災害地のような遠隔地への送電など，幅広く応用が期待されている．WPT において効率的な電力伝送を実現するためには，ビームフォーミングが必要な技術要素であるが，フェーズドアレーを用いる場合，位相器やアンプを多用することからコストが大きくなってしまう．そこで我々は，リフレクトアレーを用いてビームフォーミングを行う，低コストの部品構成で実現可能な WPT システムを検討している．本稿では，2.45 GHz 帯 1 ビットリフレクトアレー[1, 2]の開発から，集光制御による受電電力の向上について，さらに受電電力の距離依存性，および角度依存性について評価した結果を報告する．

2. 1 ビットリフレクトアレーの開発

開発した 2.45 GHz 帯 1 ビットリフレクトアレーを図 1 に示す．ユニットセルは銅製パッチと PIN ダイオ

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©2026 by IEICE

ードで構成され，直流電圧を印加することで 2.45 GHz 帯で反射する電波の位相を反転させる特性を持つようにパターンを調整した．設計した素子で 15×15 のアレーを構築して素子数 225 の 1 ビットリフレクトアレーを構築した．各素子の印加電圧 ON / OFF を個別に操作可能な専用基板を別途開発し，全素子の動作状態を動的に制御した．

3. リフレクトアレーの素子制御

リフレクトアレーの制御方式を図 2，図 3 に示す．図 2 は各素子から反射する電波の位相が遠方の特定方向において同相となり，平面波状に進行する平面反射制御の様子を表している．図 3 は各素子の反射波の位相がフレネル領域の特定の点において同相となり，1 点に集光して進行する集光反射制御の様子を表している．リフレクトアレーの制御では，それぞれ目的の反射を実現するべく，目的の位置に到達する電波の位相を揃えるために各素子において補正すべき位相の量を図中の Ψ_{plane}，Ψ_{focus} のように電波の経路長から算出し，素子の動作状態を決定する．ただし，k_0 は波数，ϕ_0 は任意の位相定数を表す．図 4 は素子制御の分布を表すビットマップの例である．各素子の補正位相の値に対して，0～180° であれば 1，180～360° であれば 0 というように 1 ビットに量子化して素子の動作状態（印加電圧の ON / OFF）に割り当てている．

4. 電界強度分布測定

4.1. 集光効果の検証

リフレクトアレーの制御方式を変化させた時の受電電力を確認するため，電界強度分布測定を行った．

実験系の構成を図 5 に示す．リフレクトアレーの正面方向から-20° / 1.5 m の位置に y 軸方向に軸を有する垂直偏波の送電ダイポールアンテナを設置し，受電側は+20° / 1.5 m の位置を中心とした 1 m 角範囲を垂直偏波のダイポールアンテナで走査しながら，ベクトルネットワークアナライザ（N5230C）を用いて S21 の値を測定した．リフレクトアレーの制御条件は，+20° 方向の平面反射と+20° / 1.5 m 地点 O'への集光反射の 2 通りとし，両者の電界強度分布を比較した．

電界強度分布の測定結果を図 6，図 7 に示す．図 6 は平面反射時，図 7 は集光反射時の|S21|分布を表しており，バツ印は各分布の最大受電点を示している．設計した集光位置 O'における S21 は，平面反射時で-41.8 dB，集光反射時で-30.6 dB となり，集光制御により受電電力は 11.2 dB 向上した．また，観測領域全体での S21 の最大値は，平面反射時で(z', x')=(-500, 60) [mm]において-35.4 dB，集光反射時で(z', x')=(-300, 60) [mm]において-28.2 dB が観測された．平面反射では距

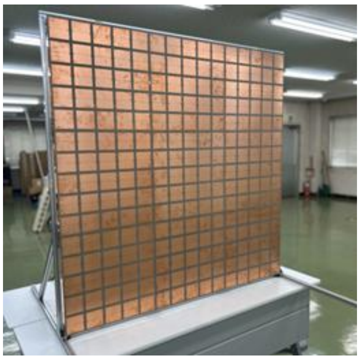
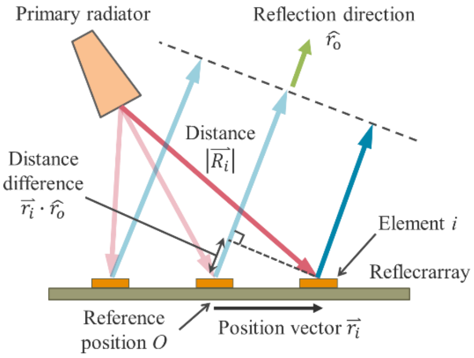
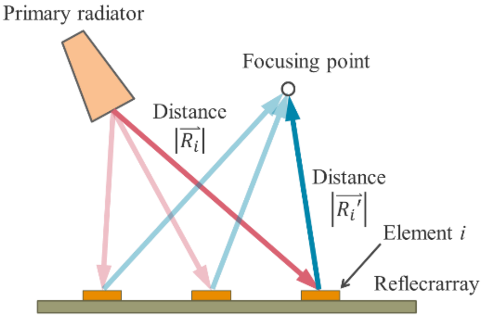


図 1: 2.45 GHz 帯 1 ビットリフレクトアレー



Correction Phase: $\Psi_{\mathrm{plane}} = \left(k_0|\vec{R_{\mathrm{i}}}| - k_0\vec{r_{\mathrm{i}}}\cdot\hat{r_o} + \phi_0\right) \bmod 2\pi$

図 2: 平面反射制御



Correction Phase: $\Psi_{\mathrm{focus}} = \left\{k_0\left(|\vec{R_{\mathrm{i}}}| + |\vec{R_{\mathrm{i}}}'|\right) + \phi_0\right\} \bmod 2\pi$

図 3: 集光反射制御

1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1

図 4: ビットマップの例（15×15 素子の場合）

離減衰の影響を受けてリフレクトアレーからの距離が近い位置で S21 が最大となっており，最大となる位置は集光反射についても設計した集光位置 O'付近からわずかにリフレクトアレー側へずれる結果となった．

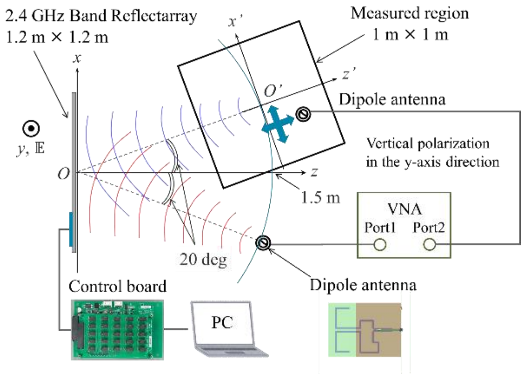


図 5: 電界強度分布測定の実験系

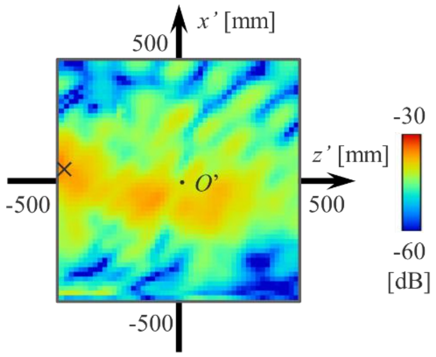


図 6: 平面反射時の S21 分布

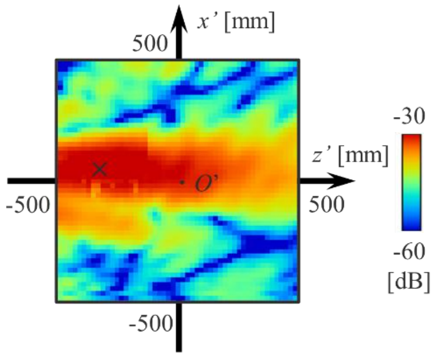


図 7: 集光反射時の S21 分布

4.2. 集光位置を電子的に変化させた場合

リフレクトアレーを用いた WPT システムでは，送電側の設備 1 式で複数のデバイスに対して給電するアプリケーションが想定される．リフレクトアレーに対して様々な位置に設置される各デバイスに向けて送電した際の受電電力を見積もるべく，集光位置を電子的に変化させた場合の受電電力を検討した．

実験系の構成を図 8 に示す．送電側のアンテナにはホーンアンテナを，受電側のアンテナにはパッチアレーアンテナを使用した．使用したパッチアレーアンテナの放射パターンを図 9 に示す．正面の動作利得は 12.3 dBi，3 dB ビーム幅は E 面 H 面ともに 18° である．送電アンテナは(θ, L)=(-20°，1.5 m)の位置に固定し，受電アンテナの角度 θ，距離 L を変化させた．リフレクトアレーの制御条件は，制御なし(Not in control)，角度 θ へ向けた平面反射制御(Plane reflection)，(θ, L)への集光反射制御(Focusing reflection)の 3 通りとし，|S21|の値を比較した．ここで集光反射制御では，例えば(θ, L)のうち θ を固定し L を変化させた場合，その変化に応じて集光位置を電子的に追従させている．

θ=20° に固定し，L を変化させたときの S21 の距離依存性を図 10 に示す． L>3 m では，集光反射制御，平面反射制御，制御なしの順で高い受電電力が観測された．集光反射制御の場合，L=3 m の位置で最大の受電電力が観測された．この結果について考察する．(θ, L)= (20°, 3 m)のときのパッチアレーアンテナがリフレクトアレーを見込む角度は 21.4° であり，この値はパッチアンテナの 3 dB ビーム幅 18° と概ね等しい．すなわち，L が 3 m 以上では見込む角度よりもビーム幅が大きくなりスピルオーバーによって受電電力が低下し，L が 3 m 以下ではパッチアレーアンテナのビーム幅がリフレクトアレーの見込み角度よりも小さく照射効率が低いために受電電力が低下したものと考えられる．

ただし，評価している(θ, L)の範囲はいわゆるフレネル領域に位置しており，アンテナの遠方界パターンを用いた評価には難点を残すため，別の視点での解釈もここで試みる．光学分野でよく用いられる回折パターンの定義では，第 1 暗線のヌル間距離としてエアリーディスクが定義されている．このディスク径をスポット径 Dと呼ぶことにする． L が増加するにつれてこのスポット径 Dは増加するが，パッチアレーアンテナの実効開口幅 Aは変わらない．すなわち， Lが小さいときはD＜A， Lがある値でD＝A， Lが大きくなるにつれて D＞Aとなると考えられ， D＝Aのときに受電電力が極大となったとも解釈できる．

L=3 m に固定し，θ を変化させたときの S21 の角度依存性を図 11 に示す．入射角と反射角が等しくなる θ=20° 付近での受電電力が大きくなっており，θ を 70° まで増加させると制御なしの場合は 30 dB 程度低下した．一方，平面反射制御と集光反射制御では 10 dB 程度の低下に抑えられていることが確認できた．θ=20° における平面反射制御と集光反射制御の差は 2 dB であり，集光反射制御の効果は一見小さく見えるかもしれない．リフレクトアレーの電子制御なしの場合は導体板の場合と同様に反射した電波は球面状に拡散するため受電電力が低下する．平面反射制御の場合は，

この球面位相を平面に変換したものの，開口面積が大きくなるほど受電電力は低下する．一方，集光反射制御では開口面積が増加するほど電力密度を大きくすることが可能である．本研究では 1.2 m 四方（10 λ_0×10 λ_0）のリフレクトアレーを用いているが，さらに大型化すればこの差は大きくなってくるものと考えられる．

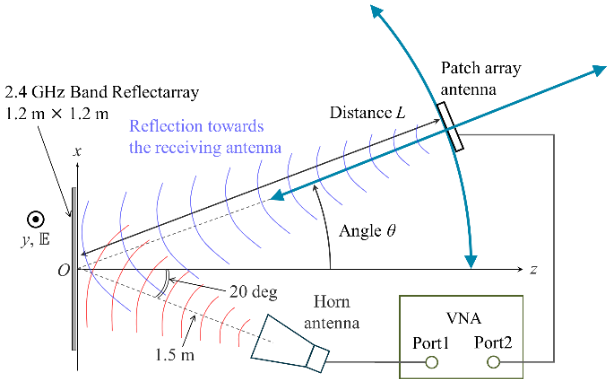


図 8: 集光位置を電子的に変化させた時の測定系

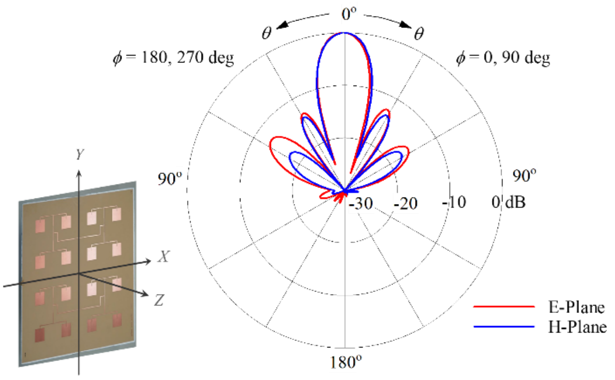


図 9:パッチアレーアンテナの放射パターン

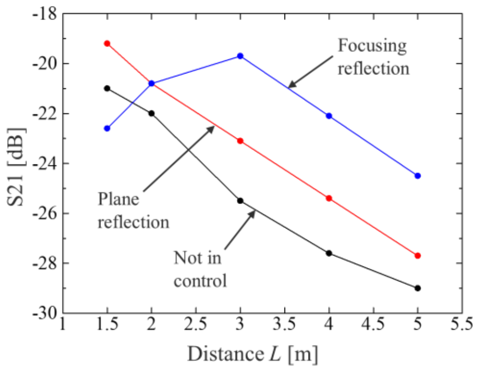


図 10: S21 の距離依存性（θ=20°）

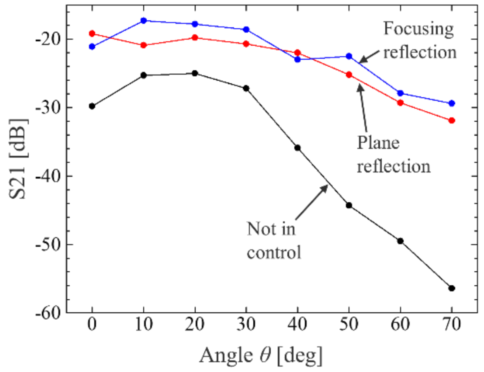


図 11: S21 の角度依存性（L=3 m）

5. まとめ

WPT におけるビームフォーミングを低コストに実現する目的で，リフレクトアレーを用いた WPT システムを検討した．2.45 GHz 帯に対応した 1 ビットリフレクトアレーを開発した．リフレクトアレーの反射波を集光させる集光反射制御により，平面反射制御と比較して受電電力が上昇することを確認した．

文　献

[1] 佐藤弘康，アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ，第 14 回アドバンスドワイヤレスシリーズ（AWS），Intelligent Reflecting Surface 設計・測定の実際，2024 年 3 月 22 日．

[2] 末木聖大，近藤肇，清水俊吾，町田明，佐藤弘康，陳強，“2.45 GHz 帯集光型 1 ビットリフレクトアレーの開発，” 電子情報通信学会総合大会講演論文集，2025 年，B-1B-34．